



東北大學 秦皇島分校
Northeastern University at Qinhuangdao

畢業論文

帶有中斷掉包及信道聚合機制的認知無線網絡 性能分析

院 別	計算機與通信工程學院
專業名稱	計算機科學與技術
班級學號	2153312
學生姓名	儲卓
指導教師	趙媛

2019 年 5 月 22 日

带有中断掉包及信道聚合机制的认知无线网络性能分析

摘 要

随着互联网的不断普及和发展，无线网络也逐渐渗透进人们的日常生活。无线网络本来是用于军事目的的技术，在从军用到工业应用再到民用的过程中，他开始了一轮又一轮发展的浪潮。一方面，无线通讯理论不断发展，带来了新的机遇，另一方面，陈旧的静态频谱分配模式，导致频谱资源愈发稀缺，无法满足企业和个人用户多样化的需求。频谱资源的浪费，一定程度上是因为其在时间和空间两个层面上分配、使用不平衡而导致的。而认知无线网络的关键思想就是减少频谱空缺的产生，认知用户在特定的时机下机会式地占用授权用户的空闲时段，来有效地提高频谱利用率。本文将对认知无线网络中认知用户的传输机制及性能做进一步的分析。

首先，为了保证授权用户数据传输的可靠性，又能尽量的减少认知用户的阻塞率以及平均延迟时间，提出带有中断掉包及信道聚合机制的认知无线网络模型，构建与之相映射的状态转移矩阵，通过高斯-赛德尔迭代法，得到各状态的稳态分布概率。在已经得到稳态概率的基础上，计算出认知用户的各项性能指标。

其次，通过数值实验，较为准确的刻画了本文介绍的带有中断掉包及信道聚合机制的认知无线网络模型，并与已有的中断返回机制模型进行对照，比较两种机制下的各项性能差异。

最后，为了对认知无线网络中认知用户的缓存队列长度进行优化，对认知用户各项性能指标进行权衡加权后，得到最大效益函数，并通过数值实验对结果进行定量分析。

关键词： 认知无线网络，中断掉包，信道聚合，最优化

Performance Analysis of Cognitive Radio Networks with Interrupt Packet Dropping and Channel Aggregation Schemes

Abstract

With the continuous development and popularization of the Internet, wireless network has gradually penetrated into people's daily life. Wireless network was a technology for military purpose, during the process from military to industrial to civil, it started a wave of development one after another. On the one hand, the continuous development of wireless communication theory brings us new opportunities. On the other hand, the old static spectrum allocation mode leads to the increasingly scarce resources, unable to meet the various needs of enterprises and individual users. The wastage of spectrum resources is partly due to the unbalanced distribution and use of spectrum resources at both time and space levels. And the key idea of cognitive radio networks is to reduce the generation of spectrum vacancies, secondary users occupy the idle time of primary users opportunistically at a specific time to effectively improve spectrum utilization. In this paper, the transmission mechanism and performance of secondary users in cognitive radio networks will be further analyzed.

Firstly, in order to ensure the reliability of primary user data transmission and reduce the blocking rate and average delay time of secondary users as much as possible, a cognitive radio network model with interrupt packet dropping and channel aggregation mechanism is proposed, and a state transition matrix mapping with it is constructed. Through specific mathematical methods, the steady-state distribution probability of each state is obtained.

Secondly, through numerical experiments, the cognitive radio network model with interrupt packet dropping and channel aggregation mechanism introduced in this paper is more accurately characterized and compared with the performance indicators of the existing interrupt return mechanism model, and the differences between the two mechanisms are compared.

Finally, in order to optimize the buffer queue length of secondary users in cognitive radio networks, after weighting the performance indicators of secondary users, the maximum benefit

function is obtained, and the results are quantitatively analyzed by numerical experiments.

Key Words: Cognitive Radio Network, Interrupt Packet Dropping, Channel Aggregation, Optimization

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本文研究内容	3
1.4 论文组织结构	4
2 相关知识	5
2.1 无线认知网络	5
2.1.1 定义	5
2.1.2 特征	5
2.1.3 系统架构	6
2.1.4 认知循环	6
2.2 无线认知网络核心技术	7
2.2.1 频谱感知	7
2.2.2 频谱共享	9
2.2.3 频谱分配	10
2.3 排队论	11
2.3.1 概念	11
2.3.2 模型分类	11
2.3.3 基本组成部分	12
2.4 马尔可夫链	12
2.4.1 马尔可夫链简介	12
2.4.2 形式化定义	13
2.4.3 马尔可夫链的平稳分布	13
3 带有中断掉包及信道聚合机制的认知无线网络性能分析	14
3.1 工作机制	14
3.1.1 认知用户的接入机制	14

3.1.2 授权用户的接入机制.....	15
3.2 基于认知用户具有可变服务率的系统模型.....	17
3.2.1 模型解释.....	17
3.2.2 转移概率矩阵.....	18
3.2.3 稳态概率.....	21
3.3 性能指标.....	22
3.3.1 认知用户中断丢失率.....	22
3.3.2 认知用户阻塞率.....	22
3.3.3 认知用户吞吐量.....	23
3.3.4 认知用户平均延迟.....	23
4 数值实验分析.....	25
4.1 中断丢失率变化趋势.....	25
4.2 阻塞率变化趋势.....	26
4.3 吞吐量变化趋势.....	27
4.4 平均延迟变化趋势.....	28
5 优化分析.....	30
5.1 用户效益函数.....	30
5.2 系统优化参数.....	30
5.3 用户效益变化趋势.....	31
结 论.....	34
致 谢.....	35
参考文献.....	36
附 录.....	38
附录 A.....	39

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

技术不断发展,时代不停进步,与这些相伴的,困扰于落后通信方式的人类进入了无线网络的新时期。无线网络俨然已成为通信的基本途径,在社会、经济的方方面面辐射着愈发重要的影响。无线网络在每个人周围悄悄地存在着,发展着,为人类的每天的生活带来了非常大的方便。想象一下不存在无线网络的情况,每个人都不能使用手机,电子商务和无线互联网等新潮概念也不知从何谈起^[1]。注意观察,很简单就可以发现,现代的组织、企业、公司都需要使用电子产品,例如个人计算机以及其他的智能设备,这些设备之间进行合作共享、信息交流的媒介,大部分都是无线网络。这也揭示了无线网络可能拥有的未来前景,非常可观,令人叹为观止。然而,随着无线网络普及的大趋势,在各个方面,它也面对着非常之大的挑战^[2]。研究表明,在无线个人网和无线局域网高速发展的过程中,连接到无线网络的人数显著增加了。然而,与日渐稀少的授权频段(licensed spectrum)相比,有需求使用授权频段的人却越来越多^[3],相对而言,频谱利用率也不算太高^[4]。频谱资源的浪费,在相当大的程度上,可以说是由这些因素导致的。

事物的发展规律,都具有两面性。显然,无线网络的潜力非常之大,令人惊奇,发展也非常之快速^[5],其在社会生产中的方方面面所发挥出的作用不容忽视^[6]。可是,在初期粗放的野蛮生长之后,也隐藏着一些致命性的隐患。频谱资源的短缺问题,随着无线网络技术的发展被无限放大,传统的固定信道分配模式、陈旧的静态频率分配策略、时间和空间层面上,频谱资源利用极度的不平衡^[7]。这些问题都亟待解决。

为了解决上述问题,1998 年的夏天,在斯德哥尔摩皇家技术研究所(KTH)会议上,Josaph Mitela 首先提出了认知无线电(CR, Cognitive Radio)的概念^[8]。1999 年,全面具体地解释了这一新思想。一般来说,无线设备的算力优势,具体表现为其在通信领域的智能计算能力,是他区别于传统通信设备的最大特征之一,认知无线电应该充分利用这一优势。例如,无线设备应该能够感知网络状况和无线环境,并了解频谱的访问情况。通过侦测、处理和决策,适时地采用灵活的适当的接入方法,适应各式各样的用户需求,与此同时,无线频谱资源的浪费情况也就随之减少了。Josaph Mitela 表达了一个重要的想法,认知无线电,从本质上来说,应该是软件无线电的一种扩展应用。软件无线电,业内对其已经有较多的研究,因此可作为一个基础框架。在软件无线电的基础之上,做

一些智能化的处理，就成为了认知无线电。但与此同时，也应该认识到，智能正是实现认知无线电的技术难点。

从一个角度看，无线通信网络是无线电的网络实现，其核心是研究将认知特征应用于无线通信网络的方式方法。与认知无线电相比，认知无线网络的特征基本一致，两者都包含两部分内容，即认知和学习过程。从另外一个其他的角度来看，认知无线网络也是一种革命性的新技术，可以显著提高频谱资源的利用率。这项新技术将从根源上，较为彻底地调整无线频谱的分配策略，然后，顺其自然地优化频谱分布的情况。这项新技术的基本特征是对网络环境的感知能力，它拥有获取现有无线环境、网络状态等基本功能，随后，对获取到的无线环境的信息进行处理，变成可以进行运算的具体数据，利用这些数据和以往的经验，实时地为信道分配等决策事件提供有力的依据^[9]。因此，认知无线电能够动态地适应无线环境的变化，最终达到无线网络的最佳状态，以此实现最终的目标，更有效率地利用无线频谱资源。

1.2 国内外研究现状

立足当下，可以看到，随着信息技术普遍应用在社会生产、日常生活中，无线通信网络在各行各业中渗透的越来越深。在发展、普及的过程中，这类技术面临的挑战也越来越严峻。联邦通信委员会(FCC, Federal Communications Commission)就曾经报道过，某些频段会被赋予过多的压力，昼夜无休，例如 GSM 移动通信所使用的频段，而有些幸运的频段长时间无人问津，始终处于空闲状态^[10]。需要认识到，这些问题的出现，大部分都是技术发展的局限性和不成熟性导致的。传统的静态网络缺乏必要的灵活性，几乎没有能力适应周围环境的变化。提高信道资源的利用率，已然成为近些年来无线网络技术发展的主要方向之一。认知无线网络技术的出现，可以有效地提高信道资源利用率。

在传统的信道分配策略里，拥塞频段的用户在任何情况下都不能占用空闲频段，这一死板的固定频谱管理方法使频谱分配效率无从谈起。动态频谱管理(DSM, Dynamic Spectrum Management)是解决这一问题的一种新兴通信技术^[11]。虽然一直受到关注，但这是一个非常复杂的研究课题，仍处于起步阶段，还没有达到可以成熟应用的地步，所以仍然需要在未来做进一步的改进。2000 年，一种简单的动态频谱管理机制和流程，被 Leaves P 等人提出了。在这些相关的研究中，系统会定期触发 DSM，也就是说，频谱分配是定期进行的^[12]。管理的基本过程四个基本阶段组成，沟通需求预测、频谱需求估计、

频谱分配以及载波配置^[13]。大多数 DSM 现在都是基于这个思考过程。

对于同构网络的动态频谱管理，典型的研究成果是两种宽带码分多址(WCDMA, Wideband Code Division Multiple Access)频谱分配方法，他们基于的算法不同，即基于退火算法的 WCDMA 频谱分配方法和基于遗传算法的 WCDMA 频谱分配方法。同时，他们考虑问题的角度也有较大差异。在基于退火算法的 WCDMA 频谱分配研究中，主要考虑对环境的变化作出反应，做出一个矩阵来表征环境变化大小程度的某一项属性(例如干扰强度)，然后通过退火算法，有效地实现频谱分配。基于遗传算法的 WCDMA 频谱分配原则是更多的考虑精简必要的开销，希望能够实现资源(如载波)与需求的最佳匹配，释放不必要的资源，从而保证大容量传输的质量，提高频谱资源利用效率^[14]。

作为一项能够解决目前无线网络通信问题的关键技术，认知无线网络，是一种理想方法。它可以合理地配置频谱资源，提高用户端到端体验，有效地利用各项网络资源。通过自身所具有的智能计算能力，认知无线网络能够分析各项环境参数，依据任务所需，更好地管理复杂、混乱网络环境下的频谱资源，并且可以满足大带宽的需求，提供更佳的用户体验。

目前的研究主要基于授权用户(PU, Primary User)和认知用户(SU, Secondary User)共同参与的无线网络。投资于认知无线网络的国外机构非常之多，甚至连美国军方也是研究主力之一。美国和德国的大学，如加州大学、麻省理工和墨尔本大学等，也投入了大量的人力。在国内科研领域，对于这一块的研究稍显迟缓，但该来的时候，中国总是不会迟到。2005 年，国家公布了“863”计划，在其中首次支持认知无线电的研究。清华大学、中国科学技术大学等国内顶尖高校对认知无线网络进行了大量科研投入。

1.3 本文研究内容

为了避免认知用户对授权用户的影响，实现认知用户透明化，同时考虑认知用户在快速响应方面的需求，提出了一种带有中断掉包及信道聚合机制的认知无线网络。

本文采用离散时间排队分析对认知无线网络的系统性能进行了评估。通过建立离散时间的简单排队模型，构造了一个离散的马尔可夫过程，得到了其转移概率矩阵。然后，得到了系统的稳态分布概率矩阵，依据概率矩阵，通过逻辑分析、数学推导，得出了各类性能上的指标，最后，考虑到这些指标对于认知用户的影响程度，经过加权处理，构建出效益函数，并对其进行优化分析。

(1)选择抢占式排队模型，采用数学建模的方法通过建立离散时间马尔可夫模型，应用数值分析中常用的迭代法，求出系统稳定状态下的概率分布，依据分布推导出了一些系统的性能指标。

(2)其核心是推导转换概率矩阵，并用 python 绘图表示，得到认知用户的中断丢失率，阻塞率，平均延迟等图表。并与另外的中断返回机制进行对比，得出两种机制的特征差异。

(3)最后，综合考虑各项性能指标对认知用户的影响力度，有根据的进行加权处理，拟合出了认知用户的综合效益函数。考虑两种模型，不同参数情况下，认知用户的最优效益。

1.4 论文组织结构

第一章：绪论。

第二章：摘录了无线认知网络的一些基本知识，对本文所用到的马尔可夫链、排队论等数学知识进行了简单介绍。

第三章：性能分析。建立排队模型，构建转移矩阵，计算稳态概率，推导性能指标。

第四章：数值实验。在第三章的基础上，确定一些系统参数，观察两种不同机制下，随着系统可变参数的改变，性能参数的变化情况。

第五章：经过合理分析，构建认知用户效益函数，然后进行优化处理。

2 相关知识

2.1 无线认知网络

2.1.1 定义

认知无线网络发展于认知无线电。它是一个独立的，具有认知能力的网络。认知无线网络的关键能力在于，它可以识别当前所处网络环境的状态，并且拥有足够的性能来理解这些状态，因此，环境信息对于它来说不再是杂乱无章的噪音，通过分析这些实时的、具体的状态信息，可以为下一步的规划、决策以及响应提供支持。为了保证设备之间的传输性能，认知无线网络能够在过去的行动中学习，并且可以将这些经验应用于未来的决策。为了实现自主认知能力，认知无线网络需要对当前的环境进行感知和响应。在真实的网络环境中存在着许多各式各样的问题，这些问题需要被合理的对待，考虑到各种问题的灵活性，认知无线网络需要有基本的思考能力。将已经接收、感知到的各类信息作为输入，结合已经了解的各种方法，做出有效的决策^[15]。同时，无线认知网络拓扑结构复杂，因此，它的每个独立的子网络都可以向它提供必要的环境的信息，这些信息汇总在一起，认知无线网络就会对整体的网络状态有所了解。

2.1.2 特征

一个简单的，健壮的认知无线网络，需要一些必不可少的功能，这些功能作为认知无线网络的一部分，有力地支撑了上文提到的识别、分析、规划、决策以及响应等功能，经过一些信息搜集，综合多个文献，可以得到一些认知无线网络公认的应该具有的功能：

- (1)每个位于网络中的子单位都有相互合作、信息共享的能力，这是构建高效率、低延迟、低负荷网络的关键；
- (2)对周边的环境有着充分的认识；
- (3)适应性较强，能够及时响应内部以及外部的环境变化，这样在比较复杂的网络中，也能保持网络的性能；
- (4)有学习能力，对过去的环境变化有一些记忆能力；
- (5)保证信息传输的质量高度可靠可信；
- (6)能够动态地管理各项各种网络资源，其中最为重要的，即为频谱资源；
- (7)可以重新构造服务于它的系统协议以及各类功能性模块。

2.1.3 系统架构

认知无线网络的系统架构主要是由两部分组成，非授权网络(Unlicensed Network)和授权网络(Primary Network)。这两种网络是通过它们所处的网络频段来区分的。非授权网络工作在非授权频段，授权网络工作在授权频段。此外，还有几个重要的概念，授权用户，认知用户，主用户网络，次级网络，PU，SU 等等。他们之间的关系如表 2.1。

表 2.1 概念解释

分类	工作的网络	英文	详细解释
授权用户	主用户网络	PU(Primary User)	工作在授权网络上的用户
认知用户	次级网络	SU(Secondary User)	工作在非授权网络上的用户

对于授权网络来说，集中式架构被采用的比较多。在这里，频谱管理实体(SME, Spectrum Management Entity)的概念被引进，他就像是交通管理系统中的管理员，可以来协调处理授权用户进入系统、使用信道的请求。当一个授权用户请求使用信道进行数据传输，他向 SME 发出一个请求，SME 根据已知信息决定是否同意请求。考虑到授权用户是授权频道的合法拥有者，理所当然的，认知用户不会影响到他的传输。

非授权网络的选择比较多，一般集中式和分布式的控制方式都是可以接受的。其中集中式的控制方式，是集中控制频谱；分布式的控制方式，是由每个节点进行分布式地控制。集中式控制方式的好处是所有资源能够一起规划管理，对网络性能进行整体性优化较为简单。可是也如许多已被熟知的集中式系统，它有明显的缺陷，如灵活性差，系统负荷大，等等。考虑到分布式的控制方式，多个资源管理实体共同协调管理整个无线网络系统的资源，各个终端可以分摊系统负荷，所以在结构上来说，灵活性要明显优于集中式，且构建成本低^[16]。然而，与之对应的，各个管理实体在互相分享信息时，会大量占用系统资源。另外，分布式架构还有一个缺点不能忽视，那就是，对于局部网络状况的实时变化，整个网络体系很难跟随变化及时做出调整^[17]。

2.1.4 认知循环

在无线认知网络中，认知循环是一个特别重要的概念，网络的认知过程，可以用它

来高度地概括。认知循环的目的是形成一个完美闭环，用以适应周围的环境。一般来说，观察、面向、决策、动作^[18]，这四点就基本上形成了一个基础的认知循环。但同时，认知循环还需要考虑到动态的网络环境对它产生的影响，如图 2.1 所示，一个经典的认知循环过程其实并不复杂。

(1)观察 一个新的认知循环会在两种情况下生成，系统接受外部输入刺激或者先前的认知循环完成。外界的新信息不断到来，系统会对比当前的结果和之前的结果，如此一来，一种新的情况出现时，旧的经验可以及时地被更新。

(2)面向 系统在成功的观察后，会根据所获得的信息，及时地对系统架构进行适当的调整。

(3)决策 系统在观察到环境信息，做出机构调整后，选择最合适的候选目标，做出决策。

(4)动作 决策产生结果后，系统会做出一系列改变系统外状态的动作，这些动作会刺激新一轮的认知循环产生。

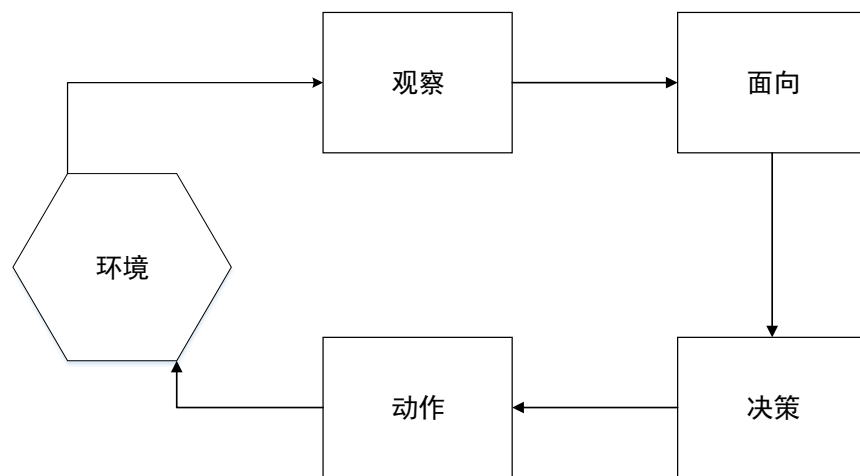


图 2.1 认知循环

2.2 无线认知网络核心技术

2.2.1 频谱感知

使网络具有频谱感知能力，这是实现认知网络的关键。要想实现频谱管理和频谱共享这两个目标，必须以之作为基础。

上文已经提到过，一个完整的认知循环由四个基础的部分组成，即观察、面向、决策和动作。而频谱感知即为观察阶段一个必不可少的功能，只有具备频谱感知能力，无

线认知网络,或者说其中的终端设备,才能拥有侦测网络环境,得到最基础的输入数据。如果没有频谱感知的功能,或者这一功能的准确性不高、稳定性不够,都会严重影响整个的无线网络传输过程。没有完善的、可靠的频谱感知能力,无线认知网络就如同空中楼阁,无从谈起。

一般情况下,授权用户由 SME 接入,所以频谱感知主要是由认知用户实现的,主要用来侦测频谱信息,捕捉频谱空缺。频谱感知的功能主要分为两部分,一是观察授权信道是否空闲,这一部分功能是在还未接入系统的时候用到的;二是在认知用户占用信道的时候检测授权用户是否到来,这是为了保证授权用户的服务质量,确保有需要时能够时迅速退出。

图 2.2 展示了常见的频谱感知技术。

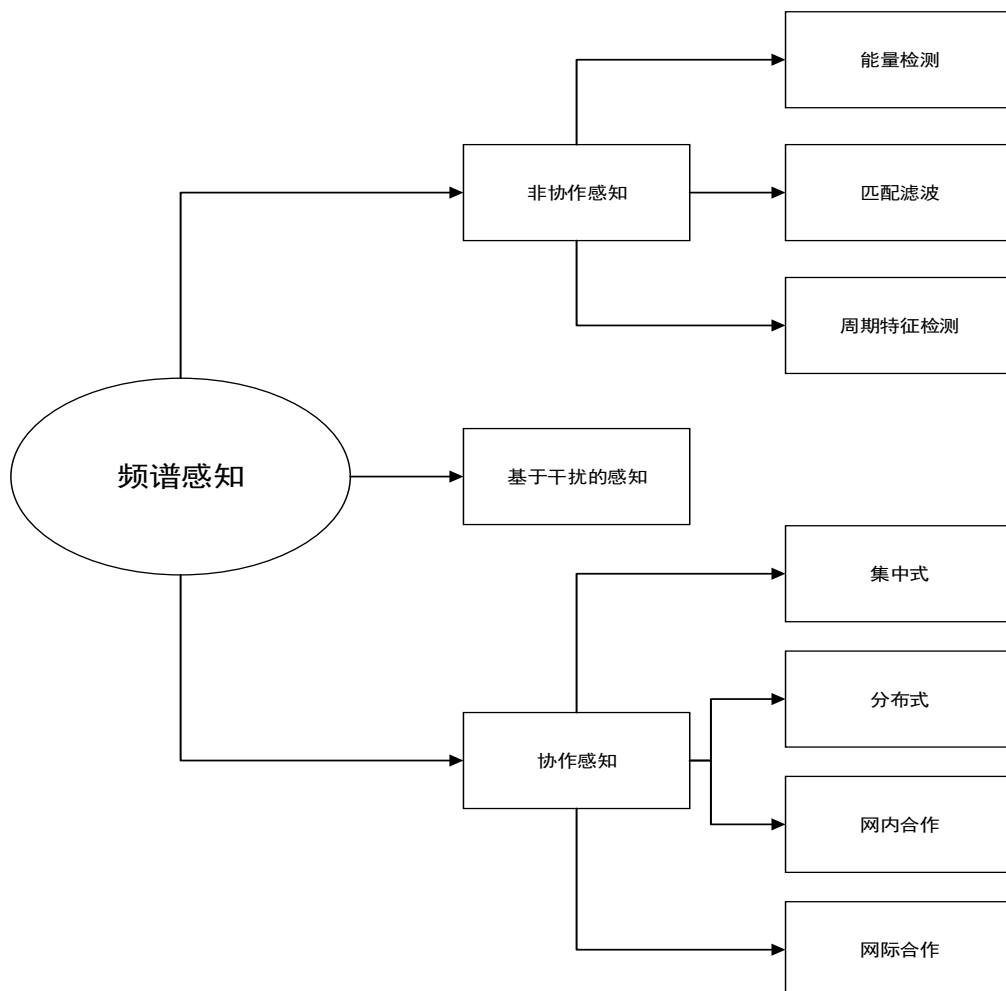


图 2.2 频谱感知分类

按照不同的标准,可以粗略地将频谱感知技术分为三大类:非协作感知、基于干扰

的感知和协作感知^[19]，这些方法主要的区别在于他们所需的计算资源和能够提供的感知质量。一般来说，更多的资源，意味着更好的质量。因此，选择哪种方法取决于具体需求，取决于能够提供多少资源，需要何等质量的服务。

2.2.2 频谱共享

上文已经提到，授权频谱是分配给授权用户使用的，因此授权用户的权益必须被保证。而频谱共享，就是在上述前提下，让认知用户有机会分享授权用户的频谱。如文献[20]中所介绍的，频谱共享主要有四种方式，如表 2.2 所示。

表 2.2 频谱共享分类

频谱共享方式	别名
覆盖方式(Overlay)	干扰控制
重叠方式(Underlay)	干扰减轻
交织方式(Interweave)	干扰避免
聚合方式(Aggregation)	干扰跳过

(1)覆盖方式 覆盖方式是一种相对温和的共享方式，他对认知用户相对“仁慈”。认知用户和授权用户可以同时访问信道，同时进行数据传输。唯一要注意的一点就是，授权用户需要明确自己可以接受的干预阈值，认知用户自觉地控制流量，保证不高于这个值。这种方法的好处，就是尽最大努力提高了认知用户的传输效率，减少了丢包。

(2)重叠方式 重叠方式和覆盖方式类似，认知用户在特定的情况，可以和授权用户同时使用信道进行数据传输，但与覆盖方式不同的时，在每一次传输之前，认知用户都需要和授权用户进行交流。并且类似于协同通信的原理，认知用户需要帮助授权用户完成数据传输。这种方法的好处在于，比较灵活，缺陷也很明显，难以确认干扰的边界，对授权用户不够友好。

(3)交织方式 交织方式保证了授权用户的绝对优先权。为了避免所有可能对授权用户的干扰，保证认知用户的透明性。认知用户必须活跃地感知网络状态，在时间、频谱、能量等三个层面寻找频谱空缺。一旦发现机会，认知用户就会机会式地占用信道数据传输。一旦有可能发生和授权用户的冲突，立刻让出信道，离开系统。交织方式也是目前应用最多的认知无线网络方案。

(4) 聚合方式 聚合方式是在交织方式的基础上改良而来，是比较新潮的概念。它考虑到多信道系统的问题，引入了聚合机制。如果系统中有多余的空闲信道，那么可以将它们聚合起来供数据传输之用。聚合方式有效地提高了资源利用率，降低了延迟。

2.2.3 频谱分配

频谱分配，毫无疑问，也是高效、合理地实现无线认知网络的关键技术之一。

随着用户需求的日益增加，频谱资源短缺问题愈加明显，已经成为不容忽视的决定性问题。并且，可以得知，频谱资源的分配策略直接决定其利用率。寻找一种高效、理性、公平的频谱分配策略，已经成为认知无线网络的关键目标。

可以对频谱分配方法进行分类，具体的分类依据可以有很多种，例如，授权用户和认知用户进入系统的方式，授权用户同时存在的可能性，可以存在的最大个数等等。再比如网络结构也是一个很好的分类方法。最后，认知用户与整个网络环境或者中心管理系统之间的信息交互方式，认知用户在做出决策之前有没有与其他的设备断电进行任何形式的信息分享和交流。

如表 2.3 所示，下面是一些常见的频谱分配技术。

表 2.3 常见频谱分配技术

分类依据	分配技术	技术介绍
频谱接入方式	半受限	对 SU 的功率进行限制，PU 和 SU 可以一起使用信道进行数据传输
	全受限	系统综合考虑频谱的占用情况，集中分配
网络架构	集中式	拥有集中式的中央控制器，信道分配由中央管理器进行管理
	分布式	没有中央控制器，SU 可以感知网络环境，共享式地分配信道
交互方式	合作式	综合分析每个 SU 感知到的环境，得到更全面的信息，然后分配频谱
	自主式	每个 SU 都是独立的，自主感知，自主决策，自主分配

2.3 排队论

2.3.1 概念

排队论(queueing theory)，亦可以称之为随机化服务系统理论。又名阻塞论、排队理论。它是数学上的理论，属于运筹学的分支学科^[21]。它通过研究服务系统，观察其中的排队现象，从而进一步总结出其表现出的随机规律。排队论广泛应用于运输工程、电子信息、计算机应用等随机服务系统^[22]和工场、市场、学校、办公室的设计^[23]。

排队系统中一个必不可少的条件是消费者和服务台。它们的名称很清楚地表明了它们的工作。消费者请求服务，服务台提供服务。在设计或者运营服务系统时，这两个方面都必须要考虑清楚，权衡得失。

排队论研究的内容主要有有 3 个方面^[24]：统计与推断，系统的性质，系统的最优化问题。

具体如表 2.4 所示。

表 2.4 排队论研究内容

名称	具体解释
统计推断	根据已有的资料建立合适的模型
系统性质	得出各类数量指标的概率分布规律
系统优化	设计各个模块，使性能最佳

2.3.2 模型分类

一般情况下，可以根据排队系统中等待队列的数量、服务台的数量，以及等待队列和排队台之间的对应关系这三项对排队系统进行划分。

表 2.5 给出了排队模型一些常见的分类。

表 2.5 排队模型分类

排队论模型分类	简单介绍
单服务台	系统中只有一个服务台，一个等待队列
多服务台单队列	系统中有多个服务台，只有一个等待队列
多服务台多队列	系统中有多个服务台，每个服务台拥有一个等待队列

2.3.3 基本组成部分

消费者在排队服务中请求服务，如果有空闲的服务台，那么它去服务台接受服务，服务台消耗一定的时间，完成服务；如果所有的服务台都忙碌，它可以选择直接离开系统；或者，如果系统中有未满足的队列，它可以选择排队。

一个基本但完善的排队模型由三部分组成，分别是输入过程、服务机构以及排队规则。下面是详细的描述：

(1)输入过程 消费者到达系统的规律

(a)消费者独自还是成群进入系统

(b)能够接收的消费者是无穷还是可数的

(c)多位消费者以怎样的间隔进入系统

(2)服务机构 服务台的质量和数量，可以提供的服务时间，消费者需要的服务时间

(3)排队规则 如果阻塞了怎么办，能否排队，队列长度，消费者是否愿意排队

系统阻塞时，服务机构可以有以下几种机制

(a)损失制：服务台被占用，系统不允许排队，那么被阻塞的用户直接离开系统

(b)等待制：服务台被占用，但允许排队，如果队列未满足，那么用户可以等待

如果服务机构采用的是等待制度，那么服务台如何选择下一个服务的客服呢，下面是一些方法：

(a)随机服务：每当服务台空闲时，它从等待队列中随机选择一位消费者

(b)先来先服务：服务台按照到达时间提供服务

(c)后到先服务：服务台为后到的消费者先接受服务。

(d)优先权服务：系统确定每一位消费者的优先级，按优先级从高到低提供服务

2.4 马尔可夫链

2.4.1 马尔可夫链简介

马尔可夫链(Markov chain)，它的全称叫做离散时间马尔可夫链(DTMC^[25], discrete-time Markov chain)，因俄国数学家安德列·马尔可夫得名。它表示的是，在一定的状态空间内，系统从一个状态变化到另一个状态的随机过程。该过程要求具备“失忆”的性质：下一个状态的分布由且仅由当前状态决定，在此之前的状态、事件都与它无关。这种特定类型的“失忆”性质称作马尔可夫性质。马尔可夫链作为实际过程的统计模型在

统计学、工程学以及计算机科学领域具有众多的应用之处。

在马尔可夫链的每一步，系统根据特定概率分布，可以从当前状态变到其他不同的状态，也可以保持当前状态不变。状态的改变过程通常被称作转移，与转移相关的概率通常被称作转移概率。

2.4.2 形式化定义

对于随机过程 $X(t)$ ，这里设 $t_0 < t_1 < \dots < t_k < t_{k+1}$ ，当它的条件概率密度函数满足 $f[x(t_{k+1}) | x(t_k), x(t_{k-1}), \dots, x(t_1), x(t_0)] = f[x(t_{k+1}) | x(t_k)]$ ，那么就称 $X(t)$ 为马尔可夫过程。

从它的定义中就可以看出， $x(t_{k+1})$ 的概率密度函数仅仅取决于 $x(t_k)$ 的状态，而与 $x(t_{k-1}), \dots, x(t_1), x(t_0)$ 状态无关。也就是说，“现在”的状态 $x(t_k)$ 才对“将来”的状态 $x(t_{k+1})$ 有影响，而“过去”的状态 $x(t_{k-1}), \dots, x(t_1), x(t_0)$ 对“将来”没有影响。

如果一个特定的马尔可夫过程，它的时间是离散的，状态空间由若干各点组成，那么数学上也称之为马尔可夫链。

2.4.3 马尔可夫链的平稳分布

对于一些特定的马尔可夫链，它有一些很好的性质，如果从任意的初始分布出发，发生多次转移过程，即当 n 趋向于无穷大时， X_n 的分布趋向不变，数学上称这个分布为平稳分布^[26]。

若一个马尔可夫链满足平稳分布，他需要满足一些限制，如表 2.6 所示。

表 2.6 平稳分布的条件

性质	解释
有限性	状态空间是有限的
不可约	状态之间经若干步可达
非周期	当前状态转移到自身，所有路径长度互质
正常返	每个时刻，各状态的概率之和总为 1

3 带有中断掉包及信道聚合机制的认知无线网络性能分析

3.1 工作机制

本文将认知无线网络进行逻辑上的简化，将数据包的接入抽象为一个排队过程。在这个排队系统中，存在多个服务台，但只有一个等待队列。系统采用集中式频谱控制方法，也就是说，存在着一个“全知全能”的中央控制器，多条授权信道对应着多个服务台，认知用户拥有大小为 k 的缓存队列长度，对应着排队系统中的等待队列。按照先来先服务的原则，授权信道为排队的认知用户提供服务。这里，将连续的时间划分为若干个等长的时隙，并假设数据包的到来、传输完成都是在时隙开始处发生的。

授权用户并不是每时每刻都占据着信道，百分之百的占用率显然是不切实际的。这时候，就是认知用户的机会。认知用户需要时刻监视网络状态，这正是前面提到的频谱感知功能。当它发现授权信道是空缺的，那么他就会尝试占用信道完成数据传输。如果信道被其他用户占据，那么，为了避免可能存在的冲突，以及在授权用户面前保持透明性，它不会发起占用信道的请求。一旦认知用户获得了传输机会，它也必须监控授权用户的情况，及时为授权用户让出信道。

SME 在接收到认知用户传输给它的感知信息后，根据不同的情况确认是否分配信道，分配多少信道。随后认知用户/授权用户完成数据传输。

综上所述，在每个时隙首刻，我们可以把系统需要完成的工作分为频谱感知、信道分配和数据传输这三个阶段。

3.1.1 认知用户的接入机制

(1)频谱感知：对于新到达的认知用户，如果某个认知用户或者授权用户正在使用信道进行它的数据传输，那么新到达系统的认知用户会尝试在缓存队列中寻找一个空闲区域，如果缓存队列已满，这个认知用户数据包就会被直接阻塞和抛弃。

(2)信道分配：在新到达用户将感知结果反馈给中央控制器后，中央控制器根据状态信息确定信道是否空闲以及是否应将信道分配给用户。对于一个获得传输机会的认知用户，考虑到认知用户相对较低的优先级，以及整个通信网络对于拥塞控制的考虑，并不会为该认知用户数据包分配全部的可用信道进行传输，而是根据当前系统中认知用户的数量进行动态分配。

(3)数据传输：当中央控制器同意用户的信道访问请求后，用户将占用频谱资源，考虑聚合的信道数量和认知用户数据包自身的属性，在一个或若干个时隙后完成数据传输。

假设认知用户感知信道过程是完全理想的，不会发生感知错误。认知用户接入过程如图 3.1 所示。

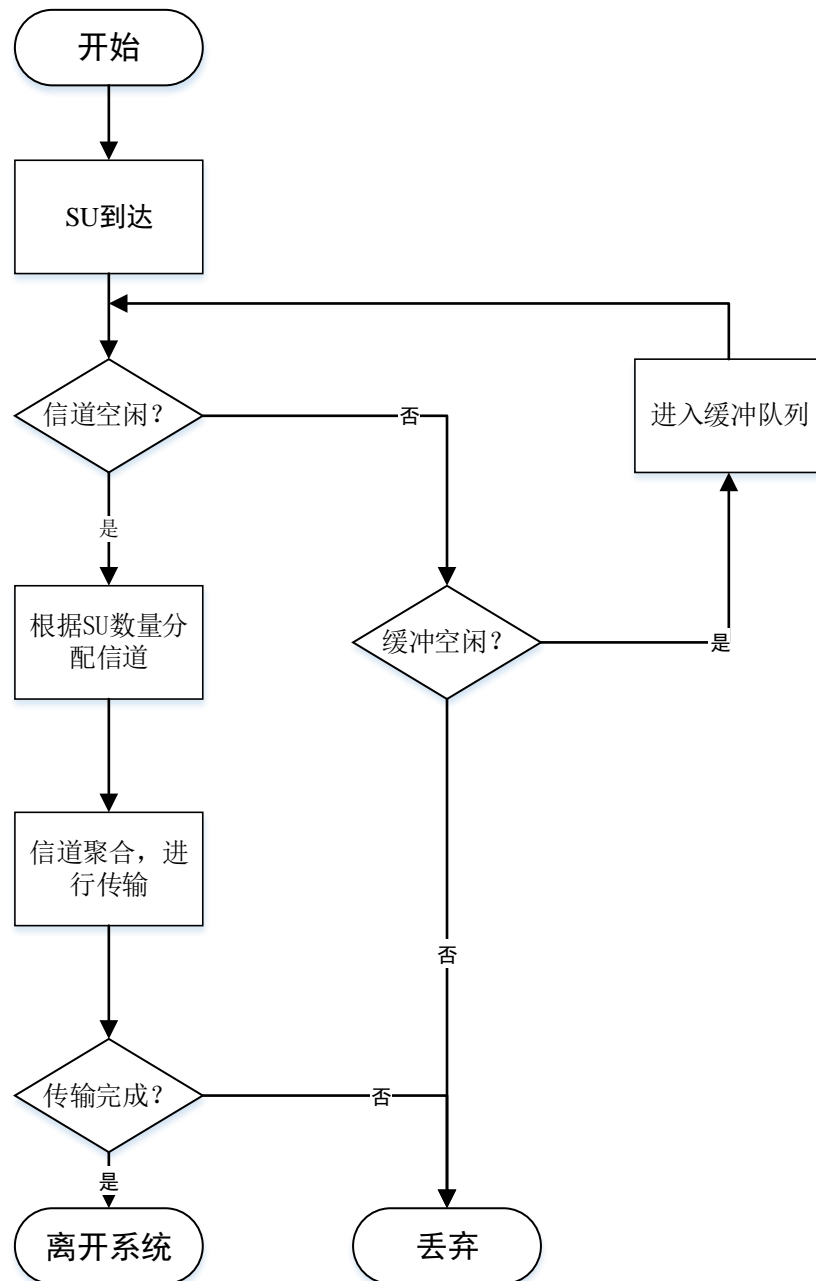


图 3.1 认知用户的接入过程

3.1.2 授权用户的接入机制

同样的，假设授权用户感知信道过程是完全理想的，不会发生感知错误。授权用户

接入过程如图 3.2 所示。

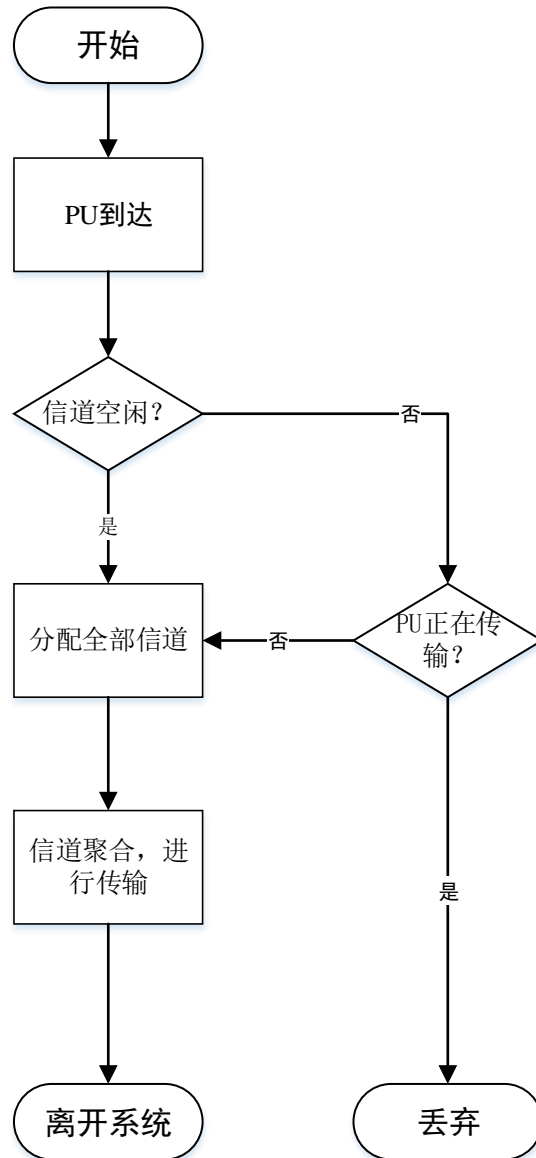


图 3.2 授权用户的接入过程

(1)频谱感知：在时隙首刻，一个尝试接入系统的授权用户可以通过自身的一些传感设备感知到信道的状态。如果，他发现系统中还有另外一个授权用户，那么，为了避免冲突，它会直接离开系统。但是，如果感知到信道被某个认知用户占用，则新到达的授权用户有绝对优先权中断认知用户的数据传输并占用信道，直接丢弃被中断的认知用户数据包。

(2)信道分配：在新到达授权用户将感知结果反馈给中央控制器后，中央控制器根据状态信息确定信道是否空闲以及是否应将信道分配给它。一旦某一个授权用户获得使用

信道的机会，考虑到它的绝对优先权，系统为其分配全部可用的信道，以保证数据传输的质量。

(3)数据传输：当中央控制器同意用户的信道访问请求后，用户将占用频谱资源，考虑聚合的信道数量和授权用户数据包自身的属性，在一个或若干个时隙后完成数据传输。

3.2 基于认知用户具有可变服务率的系统模型

3.2.1 模型解释

考虑到真实的无线通信网络系统工作机制，综合前面介绍的排队论知识，认为两种用户的数据到达、离去都发生在时隙开始的一瞬间，在这个时间点上，可以做出以下假设：

(1)系统中授权用户和认知用户的数据包到达率都服从几何分布，设授权用户在一个时隙首刻的到达率为 λ_1 ，认知用户的到达率为 λ_2 。

(2)系统的信道总数为 N_c ，授权用户到达时，启动全部信道，聚合后进行数据传输，传输时间符合几何分布，设服务率(传输成功率)为 μ_1 。

(3)将系统的缓存队列长度设置为 k ，认知用户到达时，根据系统中认知用户的数量分配信道，进行聚合后进行数据传输。这里本文假设认知用户单信道传输时间符合几何分布，服务率为 μ_2 ，如果系统中存在 m 个认知用户，本文用 \mathcal{G}_m 表示信道聚合后认知用户数据包的服务率，则可以得到认知用户数据包服务率 \mathcal{G}_m 的计算方法如公式(3.1)所示。

$$\mathcal{G}_m = \lceil mN_c / (k+1) \rceil \mu_2 \quad (3.1)$$

其中， $m/(k+1)$ 是当前认知用户数据包数占系统中认知用户数据包理论上限的比例， N_c 是系统中的信道总数，当认知用户数据包占满系统时，中央控制器开放全部信道供其传输。同时，为了保证上式中的 $0 < \mathcal{G}_m < 1$ ，这里假设认知用户 SU 数据包在单个授权信道上的服务率服从 $0 < N_c \mu_2 < 1$ 。

用 A_n 表示在 n^+ 时隙首刻时系统中的用户总数， P_n 表示该时刻系统中授权用户数，

则 $\{(A_n, P_n), n \geq 0\}$ 可构成一个离散时间的二维 Markov 过程，其状态空间如公式(3.2)所示。

$$\Omega = (0, 0) \cup \{(i, j): 1 \leq i \leq k+1, j = 0, 1\} \quad (3.2)$$

3.2.2 转移概率矩阵

用 T 表示上文所述马尔可夫过程的概率转移矩阵，程度 i 表示系统中存在 i 个数据包的两种状态， $T_{i,j}$ 即为系统从程度 i 转移到程度 j 的转移子矩阵，以 $T_{1,2}$ 为例，程度为 1 的情况有 $\pi_{1,0}$ 和 $\pi_{1,1}$ 两种，程度为 2 的情况有 $\pi_{2,0}$ 和 $\pi_{2,1}$ 两种，因此 $T_{1,2}$ 是一个 2×2 的矩阵，其他情况类似。

矩阵 T 用子矩阵表示如公式(3.3)所示：

$$T = \begin{pmatrix} T_{0,0} & T_{0,1} & T_{0,2} & 0 & 0 & 0 \\ T_{1,0} & T_{1,1} & T_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_{2,1} & T_{2,2} & T_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{k,k-1} & T_{k,k} & T_{k,k+1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{k+1,k} & T_{k+1,k+1} \end{pmatrix}_{(k+2) \times (k+2)} \quad (3.3)$$

下面对各个子阵做详细解释。

(1) $T_{0,0}$ 表示系统由程度 0 转移成程度 0 的转移概率，授权用户和认知用户均未到达即可，如公式(3.4)所示。

$$T_{0,0} = (\bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2)_{1 \times 1} \quad (3.4)$$

(2) $T_{0,1}$ 表示系统由程度 0 转移为程度 1 的概率，两种数据包有且只有 1 个到达即可， $\bar{\lambda}_1 \lambda_2$ 表示只有授权用户到达， $\lambda_1 \bar{\lambda}_2$ 表示只有认知用户到达， $T_{0,1}$ 如公式(3.5)所示。

$$T_{0,1} = (\bar{\lambda}_1 \lambda_2 \quad \lambda_1 \bar{\lambda}_2)_{1 \times 2} \quad (3.5)$$

(3) $T_{0,2}$ 表示系统由程度 0 转移为程度 2 的概率，其中， $\pi_{0,0} \rightarrow \pi_{2,0}$ 的概率为 0，

$\pi_{0,0} \rightarrow \pi_{2,1}$ 的概率为 $\lambda_1 \lambda_2$ ，所以 $T_{0,2}$ 如公式(3.6)所示。

$$T_{0,2} = \begin{pmatrix} 0 & \lambda_1 \lambda_2 \end{pmatrix}_{1 \times 2} \quad (3.6)$$

(4) $T_{1,0}$ 表示系统由程度 1 转移为 0 的概率，其中， $\pi_{1,0} \rightarrow \pi_{0,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 g_1$ ， $\pi_{1,1} \rightarrow \pi_{0,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 \mu_1$ ，因此 $T_{1,0}$ 如公式(3.7)所示

$$T_{1,0} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 g_1 \\ \bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 \mu_1 \end{pmatrix}_{2 \times 1} \quad (3.7)$$

(5) $T_{1,1}$ 表示系统由程度 1 转移到程度 1 的概率。其中， $\pi_{1,0} \rightarrow \pi_{1,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 (\bar{\lambda}_2 \bar{g}_1 + \lambda_2 g_1)$ ，即授权用户未到来，认知用户未传输完成或者认知用户被替代； $\pi_{1,0} \rightarrow \pi_{1,1}$ 的概率为 $\lambda_1 \bar{\lambda}_2$ ，即授权用户到来，认知用户未到来； $\pi_{1,1} \rightarrow \pi_{1,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 \lambda_2 \mu_1$ ，即没有新的授权用户到来，正在传输的授权用户传输完成，新的认知用户占用信道； $\pi_{1,1} \rightarrow \pi_{1,1}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_2 (\lambda_1 \mu_1 + \bar{\mu}_1)$ ，即认知用户未到来，正在传输的授权用户传输完成并且新的授权用户到来，或者授权用户传输未结束。 $T_{1,1}$ 如公式(3.8)所示。

$$T_{1,1} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_1 (\bar{\lambda}_2 \bar{g}_1 + \lambda_2 g_1) & \lambda_1 \bar{\lambda}_2 \\ \bar{\lambda}_1 \lambda_2 \mu_1 & \bar{\lambda}_2 (\lambda_1 \mu_1 + \bar{\mu}_1) \end{pmatrix}_{2 \times 2} \quad (3.8)$$

(6) $T_{1,2}$ 表示系统由程度 1 转移到程度 2 的概率，其中， $\pi_{1,0} \rightarrow \pi_{2,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 \lambda_2 \bar{g}_1$ ，即授权用户未到来，当前认知用户传输未结束且有新的认知用户到来； $\pi_{1,0} \rightarrow \pi_{2,1}$ 的概率为 $\lambda_1 \lambda_2$ ，即授权用户和认知用户同时到来，此时授权用户开始传输，认知用户进入缓存； $\pi_{1,1} \rightarrow \pi_{2,0}$ 的概率为 0； $\pi_{1,1} \rightarrow \pi_{2,1}$ 的概率为 $\lambda_2 (\lambda_1 \mu_1 + \bar{\mu}_1)$ ，即认知用户到来，授权用户未离开或信道被新的授权用户占据。 $T_{1,2}$ 如公式(3.9)所示。

$$T_{1,2} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_1 \lambda_2 \bar{g}_1 & \lambda_1 \lambda_2 \\ 0 & \lambda_2 (\lambda_1 \mu_1 + \bar{\mu}_1) \end{pmatrix}_{2 \times 2} \quad (3.9)$$

假设 m 为当前系统的程度。

则当 $2 \leq m \leq k$ 时：

(7) $T_{m,m-1}$ 表示系统由程度 m 转移成 $m-1$ 的概率，其中， $\pi_{m,0} \rightarrow \pi_{m-1,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 \mathcal{G}_m$ ，即授权用户、认知用户均未到达，正在传输的认知数据包未传输完成； $\pi_{m,0} \rightarrow \pi_{m-1,1}$ 的概率为 0； $\pi_{m,1} \rightarrow \pi_{m-1,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 \mu_1$ ，即授权用户、认知用户均未到达，正在传输的授权数据包传输完成； $\pi_{m,1} \rightarrow \pi_{m-1,1}$ 的概率为 0。因此，综合上面所说，可以得到 $T_{m,m-1}$ 如公式(3.10)所示。

$$T_{m,m-1} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 \mathcal{G}_m & 0 \\ \bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 \mu_1 & 0 \end{pmatrix}_{2 \times 2} \quad (3.10)$$

(8) $T_{m,m}$ 表示系统由程度 m 转移成 m 的概率，其中， $\pi_{m,0} \rightarrow \pi_{m,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 (\bar{\lambda}_2 \bar{\mathcal{G}}_m + \lambda_2 \mathcal{G}_m)$ ，即授权用户未到来，认知用户数量不变的概率； $\pi_{m,0} \rightarrow \pi_{m,1}$ 的概率为 $\lambda_1 \bar{\lambda}_2$ ，即授权用户到来，认知用户未到来； $\pi_{m,1} \rightarrow \pi_{m,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 \lambda_2 \mu_1$ ，即正在传输的授权用户传输结束，没有新的授权用户到来，有认知用户到来； $\pi_{m,1} \rightarrow \pi_{m,1}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_2 (\lambda_1 \mu_1 + \bar{\mu}_1)$ ，即没有新的认知用户到来，授权用户数量不变的情况。因此 $T_{m,m}$ 如公式(3.11)所示。

$$T_{m,m} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_1 (\bar{\lambda}_2 \bar{\mathcal{G}}_m + \lambda_2 \mathcal{G}_m) & \lambda_1 \bar{\lambda}_2 \\ \bar{\lambda}_1 \lambda_2 \mu_1 & \bar{\lambda}_2 (\lambda_1 \mu_1 + \bar{\mu}_1) \end{pmatrix}_{2 \times 2} \quad (3.11)$$

(9) $T_{m,m+1}$ 表示系统由程度 m 转移成 $m+1$ 的概率，其中， $\pi_{m,0} \rightarrow \pi_{m+1,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 \lambda_2 \bar{\mathcal{G}}_m$ ，即授权用户未到来，认知用户增加一个的概率； $\pi_{m,0} \rightarrow \pi_{m+1,1}$ 的概率为 $\lambda_1 \lambda_2$ ，即授权用户、认知用户都到来的概率； $\pi_{m,1} \rightarrow \pi_{m+1,0}$ 的概率为 0； $\pi_{m,1} \rightarrow \pi_{m+1,1}$ 的概率为 $\lambda_2 (\lambda_1 \mu_1 + \bar{\mu}_1)$ ，即有新的认知用户到来，但这时候授权用户未传输完成，又或者该授权用户传输完成但随即被新的授权用户替代。这里，综合上面各式，可以得到 2×2 的 $T_{m,m+1}$ 如公式(3.12)所示。

$$T_{m,m+1} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_1 \lambda_2 \bar{\mathcal{G}}_m & \lambda_1 \lambda_2 \\ 0 & \lambda_2 (\lambda_1 \mu_1 + \bar{\mu}_1) \end{pmatrix}_{2 \times 2} \quad (3.12)$$

当 $m = k + 1$ 时，情况略有不同：

(10) $T_{m,m-1} = T_{k+1,k}$ 表示系统由程度 $k + 1$ 转移成 k 的概率，其中， $\pi_{k+1,0} \rightarrow \pi_{k,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 \mathcal{G}_{k+1}$ ，即授权用户、认知用户均未带来，正在传输的认知用户传输结束； $\pi_{k+1,0} \rightarrow \pi_{k,1}$ 的概率为 0； $\pi_{k+1,1} \rightarrow \pi_{k,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 \mu_1$ ，即授权用户、认知用户均为到来，授权用户传输完成； $\pi_{k+1,1} \rightarrow \pi_{k,1}$ 的概率为 0。因此， $T_{k+1,k}$ 如公式(3.13)所示。

$$T_{m,m-1} = T_{k+1,k} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 \mathcal{G}_{k+1} & 0 \\ \bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_2 \mu_1 & 0 \end{pmatrix}_{2 \times 2} \quad (3.13)$$

(11) $T_{m,m} = T_{k+1,k+1}$ 表示系统由程度 $k + 1$ 转移到 $k + 1$ 的概率，其中， $\pi_{k+1,0} \rightarrow \pi_{k+1,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 (\lambda_2 + \bar{\lambda}_2 \bar{\mathcal{G}}_{k+1})$ ，即授权用户未到来，认知用户到来或者认知用户未离开； $\pi_{k+1,0} \rightarrow \pi_{k+1,1}$ 的概率为 λ_1 ，即授权用户到来即可； $\pi_{k+1,1} \rightarrow \pi_{k+1,0}$ 的概率为 $\bar{\lambda}_1 \lambda_2 \mu_1$ ，即授权用户未到来，认知用户到来，正在传输的授权用户传输完成； $\pi_{k+1,1} \rightarrow \pi_{k+1,1}$ 的概率为 $\lambda_1 \mu_1 + \bar{\mu}_1$ ，即授权用户数量不变的概率。因此， $T_{k+1,k+1}$ 如公式(3.14)所示。

$$T_{m,m} = T_{k+1,k+1} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_1 (\lambda_2 + \bar{\lambda}_2 \bar{\mathcal{G}}_{k+1}) & \lambda_1 \\ \bar{\lambda}_1 \lambda_2 \mu_1 & \lambda_1 \mu_1 + \bar{\mu}_1 \end{pmatrix}_{2 \times 2} \quad (3.14)$$

综上所述， $\{(A_n, P_n), n \geq 0\}$ 所表示的二维 Markov 过程的全部概率矩阵已经给出。

3.2.3 稳态概率

这里，考虑到转移概率矩阵 W 的结构，显然得知， $\{(A_n, P_n), n \geq 0\}$ 所表示的二维马尔可夫过程状态空间有限，并且是非周期、不可约、正常返的。令 $\pi_{k,l}$ 表示二维 Markov 的稳态分布，则可以得到 $\pi_{k,l}$ 如公式(3.15)所示。

$$\pi_{k,l} = \lim_{n \rightarrow \infty} P\{A_n = k, P_n = l\} \quad (3.15)$$

记 $\Pi = (\pi_{0,0}, \pi_{1,0}, \pi_{1,1}, \dots, \pi_{k,0}, \pi_{k,1}, \pi_{k+1,0}, \pi_{k+1,1})$ 。依据平衡方程以及归一化条件得知通过若干次迭代，稳态概率收敛，由此得到了系统稳态概率分布 Π 。

$$\begin{cases} \Pi T = \Pi \\ \Pi e = 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

3.3 性能指标

3.3.1 认知用户中断丢失率

在单等待队列多服务台的认知无线网络中，恰好有一个认知用户在信道上传输数据。此时，有着绝对优先级的授权用户需要占用信道来传输数据，而认知用户的传输被强制中断从而离开系统，这种现象被称为认知用户的中断丢失。在单位时间间隔内，即一个时隙内，被中断丢失的认知用户数据包的数量，即为认知用户的中断丢失率。

在缓存队列长度为 k 的情况下， $\Pi = (\pi_{0,0}, \pi_{1,0}, \pi_{1,1}, \dots, \pi_{k,0}, \pi_{k,1}, \pi_{k+1,0}, \pi_{k+1,1})$ 共有 $2k+3$ 个概率分量，代表 $2k+3$ 中不同的系统状态存在的概率。认知用户的中断丢失率是认知用户在各种状态下被中断强制离开系统的概率加权和。举个例子，系统在 $\pi_{1,0}$ 状态下，正在传输的认知用户数据包尚未传输完成，概率为 \bar{g}_1 ，这时一个授权用户数据包到来，概率为 λ_1 ，那么此时发生中断掉包的概率就是 $\pi_{1,0} \lambda_1 \bar{g}_1$ 。由此，可以得到认知用户数据包中断丢失率 γ 的表达式如公式(3.17)所示。

$$\gamma = \sum_{i=1}^{k+1} \pi_{i,0} \lambda_1 \bar{g}_i \quad (3.17)$$

其中， $\pi_{i,0}$ 表示系统中存在 i 个用户，其中 0 个授权用户，这种情况的稳态概率。

3.3.2 认知用户阻塞率

在多服务平台单等待队列的认知无线网络中，新到达的认知用户因为认知用户缓冲区是满的，而授权信道正被其他用户用来传输数据(在这种情况下，授权用户或认知用户

可能占用信道), 当新到的认知用户发送一个信道访问请求时, 控制中心拒绝了该请求, 因此用户被迫离开系统的现象称为认知用户的阻塞。阻塞率是指单位时隙内被阻塞的认知用户数。显然, 认知用户数据包的阻塞只会在缓存队列充满的情况下才会发生, 可以得到认知用户数据包的阻塞率 β , 其具体的计算方法如公式(3.18)所示。

$$\beta = \lambda_2 \left(\pi_{k+1,1} (\bar{\mu}_1 + \mu_1 \lambda_1) + \pi_{k+1,0} (\bar{g}_{k+1} + g_{k+1} \lambda_1) \right) \quad (3.18)$$

其中 $\lambda_2 \pi_{k+1,1} (\bar{\mu}_1 + \mu_1 \lambda_1)$ 指的是缓存队列已满, 且信道正在被授权用户占据, 这种情况下, 授权用户未能传输完成或者完成了传输随即又被新到来的授权用户抢占信道。

$\lambda_2 \pi_{k+1,0} (\bar{g}_{k+1} + g_{k+1} \lambda_1)$ 指的是缓存队列已满, 信道被某一个认知用户占据, 此时, 这个正在传输数据的认知用户未传输完成, 或者正在传输的认知用户传输完成但随即又被新接入授权用户抢占, 这两种情况都会导致刚刚新进入系统的认知用户的阻塞。

3.3.3 认知用户吞吐量

单位时间内, 若干个认知用户成功机会式地抢占到了授权信道, 并且完成了数据传输, 我们将这些认知用户的数量称之为认知用户的吞吐量。

考虑到一个认知用户尝试接入系统, 只有三种走向:

- (1) 因缓存队列限制被阻塞;
- (2) 获得传输机会但被授权用户中断丢失;
- (3) 顺利完成传输。

考虑到认知用户的到来率为 λ_2 , 认知用户的终端丢失率为 γ , 认知用户数据包的阻塞率为 β , 因此得到认知用户数据包的吞吐量 θ , 计算方法如公式(3.19)所示。

$$\theta = \lambda_2 - \gamma - \beta \quad (3.19)$$

3.3.4 认知用户平均延迟

当系统中缓存队列长度为 k 时, 系统共存在 $2k+3$ 种状态, 因此, 平均队长 $E[SU]$ 就等于这 $2k+3$ 种状态下认知用户缓存队列的长度平均值, 自然地, 可以得到平均队长 $E[SU]$ 的计算方法如公式(3.20)所示。

$$E[SU] = \sum_{i=1}^{k+1} (i\pi_{i,0} + (i-1)\pi_{i,1}) \quad (3.20)$$

将认知用户的平均延迟时间定义为从认知用户数据包进入系统到认知用户数据传输完成后离开系统的时间间隔。那么延迟时间由两部分组成，认知用户在缓存队列中的排队时间以及它在授权信道中进行传输所需的时间。

根据文献[27]，用 N 表达消费者的平均数量， λ 表示消费者的平均服务率， T 表示平均服务时间，那么它们之间的关系如著名的莱特公式(Little Theorem)所示：

$$N = \lambda T \quad (3.21)$$

根据公式(3.21)，可以得到认知用户的平均延迟时间 ζ 的计算方法如公式(3.22)所示。

$$\zeta = \frac{E[SU]}{\lambda_2 - \beta} \quad (3.22)$$

本章内容阐述的是，在单等待队列多服务平台的无线认知系统中，为认知用户设置了一个有限容量的缓存队列，授权用户具有抢占信道的绝对优先级，认知用户能够感知系统状态。通过建立离散时间优先排队模型，采用二维马尔可夫(Markov)方法构造了状态转移矩阵，得到了稳定情况下各状态的概率密度。通过稳态分析，给出了认知用户的阻塞率、中断丢失率、系统吞吐量和平均延迟时间等系统性能指标表达式。

4 数值实验分析

实际实验过程中往往会遇到许多情况，对带有中断掉包及信道聚合机制的无线网络系统性能造成干扰，比如因为授权用户数据包的到达而产生的对认知用户数据包的传输中断，认知用户数据包的实际到达率及认知用户缓存队列长度等等。因此用 python 进行了一系列数值实验，方便直观地研究带有中断掉包及信道聚合机制的无线网络系统性能。

与本文中接受的中断掉包机制，即认知用户数据包被中断后直接离开系统的机制(以下简称掉包模型)对比，另一种机制为中断返回机制(以下简称返回模型)，认知用户数据包被中断后会尝试重新进入缓存队列排队。

在本章中，用折线图的方式，直观地表现出了两种不同机制下，设定一些固定的系统参数，随着可变参数缓存队列长度 k 的变化，系统的各项性能参数随之改变的情况。并且将对折线图的整体变化趋势，各种细微差异进行详细的解释。

这里设定一些系统公共参数如表 4.1 所示。

表 4.1 系统公共参数

参数名称	数值范围
认知用户缓存队列长度 k	1-10
授权用户到达率 λ_1	0.04 0.16
认知用户到达率 λ_2	0.3
授权用户服务率 μ_1	0.1
认知用户单信道服务率 μ_2	0.03
信道总数 N_c	15

4.1 中断丢失率变化趋势

如图 4.1 所示，刻画了在大小不同的两种授权用户到达率 λ_1 下，随着用户缓存队列长度 k 在一定范围内均匀变化，在中断掉包机制下，得出特定缓存队列长度下的认知用户中断丢失率，绘出折线图表现出变化趋势。作为对比，同等条件下中断返回机制下认知用户中断丢失率的变化情况也被绘出。

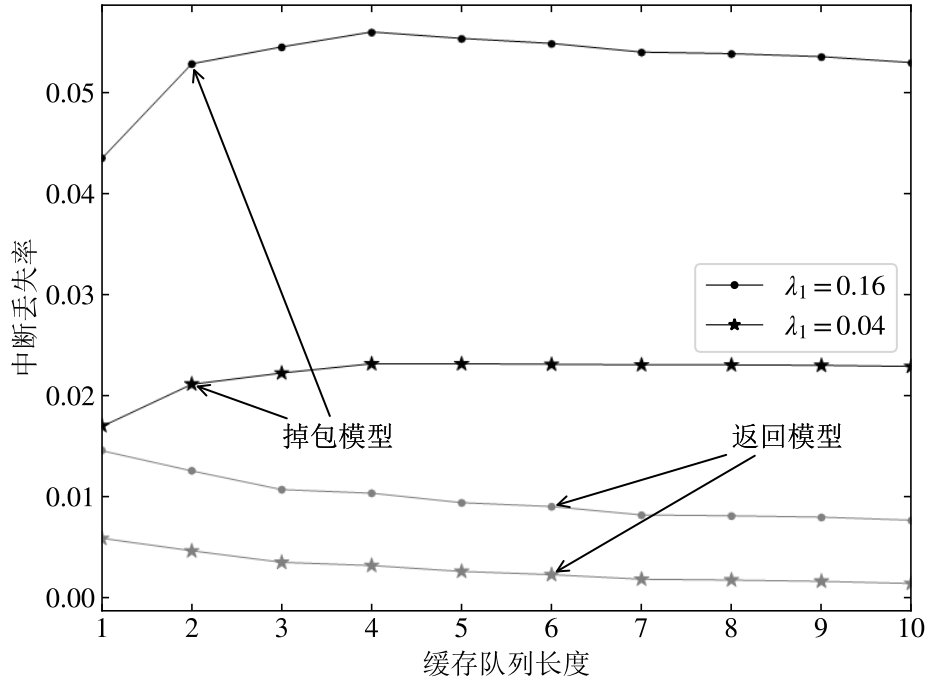


图 4.1 中断丢失率变化趋势

首先，在参数相同(λ_1, k)的情况下，中断返回机制下的系统，认知用户的中断丢失率明显较低，这是因为相对于中断掉包机制，被抢占信道的认知用户会尝试回到缓存队列，而不是直接离开系统。

无论是哪种机制，当 λ_1 较大时，中断丢失率也会明显增大，这是因为授权用户数量增加，认知用户可利用的频谱空缺减少了，自然就容易被中断掉包。

对于中断返回机制，在一定范围内，缓存 k 的增长意味着进入系统的机会增多，所以中断丢失率会随着缓存队列长度的增加而减少；对于中断掉包机制，情况较复杂，因为只要被抢占信道，中断掉包就会发生，参考中断丢失率表达式(3.17)，可以很容易得到结论。

当 k 较小时， \mathcal{G}_i 变化幅度不大，而随着 k 的增大， $\pi_{i,0}$ 会逐渐增大，因此可以理解前期中断丢失率的增加； k 稍微变大后， \mathcal{G}_i 数值较大，导致掉包率反而逐渐减小。

4.2 阻塞率变化趋势

图 4.2 刻画了在不同的授权用户到达率 λ_1 下，中断掉包和中断返回两种机制下，随用户缓存 k 的变化，认知用户阻塞率的变化趋势。

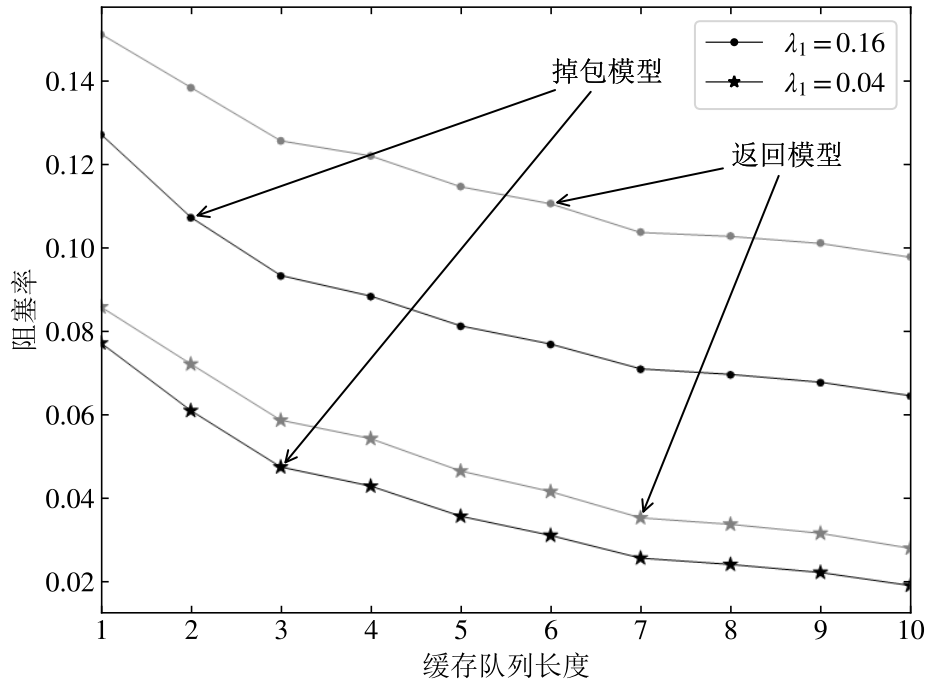


图 4.2 阻塞率变化趋势

由图 4.2 可以看出，随着缓存容量 k 的增长，两种机制下的阻塞率曲线都在不断下降，这是因为缓存的增长意味着进入系统的机会变大，认知用户更难被阻塞。缓存队列长度 k 不变时，无论是掉包模型还是返回模型，当 $\lambda_1 = 0.16$ 时，认知用户的阻塞率都大于 $\lambda_1 = 0.04$ 的阻塞率。对于中断返回机制，这是因为授权用户频繁到达，大量的认知用户被迫进入缓存队列，使得缓存迅速被填满，阻塞率增加。对于中断掉包机制，阻塞情况只出现在缓存队列已满的情况下， λ_1 的增大，毫无疑问会使准备进入系统的认知用户被阻塞的可能性增大。

在参数相同(λ_1, k)的情况下，中断返回机制的阻塞率 β 明显高于中断掉包机制，这是因为在中断返回机制下，被抢占信道的认知用户会返回缓存队列，使缓存队列快速增长，导致阻塞率相对掉包机制较高。

4.3 吞吐量变化趋势

从图 4.3 可以看出，随着 k 的增大，吞吐量成递增趋势，这是因为，吞吐量 θ 指的是单位时隙内抢占到授权信道并且得以成功传输数据的认知用户数目，随着 k 的增大，认知用户逗留在系统中的机会大大增加，可想而知，吞吐量当然会增大。

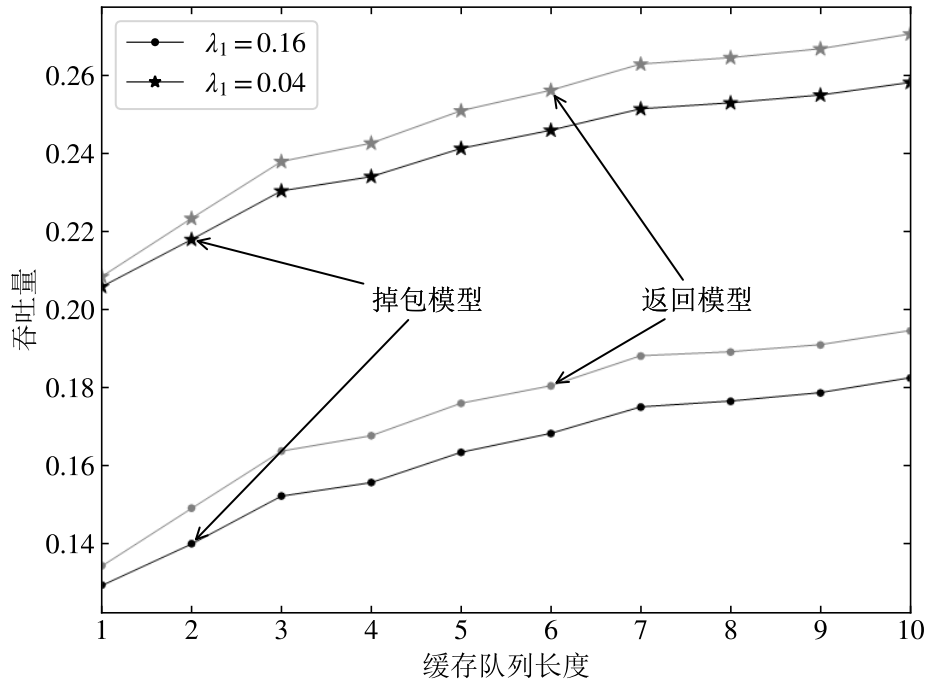


图 4.3 吞吐量变化趋势

授权用户到达率 λ_1 增大时，吞吐量 θ 明显减小。授权用户的到达率增高意味着信道的利用率提高，因此可供认知用户使用的频谱空缺相对就比较少，认知用户难以抓住机会进行完整的数据的传输，吞吐量自然减小。

在相同的参数 (λ_1, k) 下，相比中断返回机制，中断掉包机制的吞吐量比较低，这是因为，在中断返回机制下，被中断的用户可以回到等待队列，期待下一次能够传输成功；中断掉包机制，如果被中断，那么认知用户就会直接离开系统，传输成功的可能性大大降低。这就意味着，网络状态不好的情况下，可靠性较高的中断返回机制反而可能是更好的选择。

4.4 平均延迟变化趋势

从图 4.4 中可以看出，在授权用户到达率 λ_1 不变的情况下，无论是中断返回机制还是中断掉包机制，随着缓存容量 k 的变长，平均延迟明显成正相关，增长明显。这是因为平均延迟时间由两部分组成，及认知用户在缓存队列的等待时间和其在数据传输中花费的时间相加之和，随着 k 的增长，缓存队列变长了，因此认知用户的平均等待时间就会相对增长，整体的延迟也会随之变化。

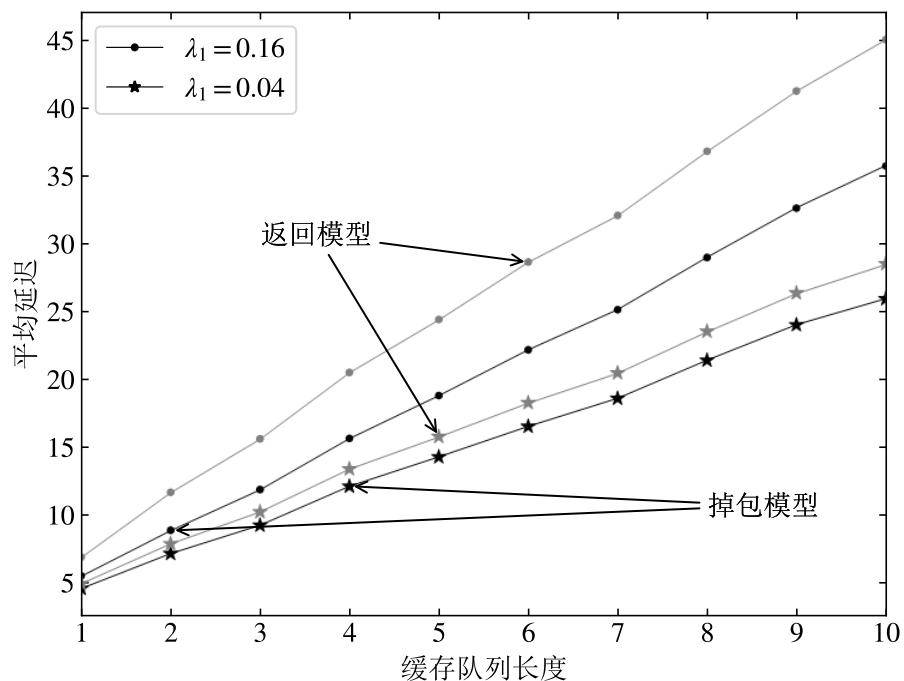


图 4.4 平均延迟变化趋势

在缓存队列长度 k 不变，授权用户到达率 λ_1 比较大的情况下，平均延迟也会相对比较高。当授权用户到达率增加的时候，认知用户就会更有可能被阻塞进入等待队列，这实际上是因为认知用户机会式占用信道的可能性减少了，因此平均延迟也会增加。

在参数相同(λ_1, k)的情况下，中断掉包的平均延迟明显低于中断返回机制延迟，这是因为认知用户在被中断后直接离开系统，这一举动显著地降低了缓存队列的长度，进而取得了较好的延迟性能。这一特点意味着，在可靠性不是格外重要，对延迟反应敏感的情境下，中断掉包是更好的选择。

5 优化分析

在带有中断掉包及信道聚合机制的无线认知网络中，由于授权用户对信道具有绝对的优先传输权，当认知用户使用授权信道进行数据传输时，授权用户来到并中断传输，所以认知用户将被迫离开系统。这会让认知用户数据包丢失，说明认知用户的传输机制不完全可靠。在保证授权用户传输质量的情况下，需要为认知用户提供尽可能好的服务，使它们的利益最优化。问题在于，如何表征认知用户的“利益”。对于一个期望能够完成传输的认知用户，需要考虑的性能参数主要有吞吐量和平均延迟。当认知用户缓存队列长度不断增加，认知用户接受服务的稳定性提高了，吞吐量明显增加，但与之相对的，是不断增长的延时。因此，关键在于，数量和响应速度之间，需要一个平衡点。

5.1 用户效益函数

占在某一个认知用户的立场上，当它成功地利用了频谱空缺，完成了数据传输，那么可以说它是有切实的收益的。自然地，它每停留在系统中一段时间，就造成了令人厌恶的时延。据此，可以做如下设定：

如果一个认知数据包完成了传输，获得大小为 G 的收益，每个单位时间内，如果它停留在系统中，假设它遭受到大小为 E 的损失，据此，如(5.1)所示，得到了认知用户效益函数的表达式：

$$F(k) = G\theta(k) - E\zeta(k) \quad (5.1)$$

观察公式(5.1)，自然而然地，我们可以就缓存队列长度 k 进行优化，从而使 $F(k)$ 保持最大化，最优缓存队列长度 k 的计算方法如公式(5.2)所示：

$$k^* = \arg \max \{F(k)\} \quad (5.2)$$

5.2 系统优化参数

前面，已经介绍了两种模型下各类性能指标随参数改变的变化情况，对比分析了不同情况下两种模型的差异。上一节，将认知用户逗留在系统中的代价定量为 E ，将认知用户一次成功传输得到的益处定量为 G ，并且顺利地得出了认知用户个人效益函数的表达方法。这里，本文设定一些优化参数，来进一步研究两种模型下的认知无线网络，最

佳缓存容量 k^* 的变化，系统优化参数如表 5.1 所示。

表 5.1 系统优化参数

参数名称	大小
认知用户缓存队列长度 k	1-10
授权用户到达率 λ_1	0.04 0.16
认知用户到达率 λ_2	0.3
授权用户服务率 μ_1	0.1
认知用户单信道服务率 μ_2	0.03
信道总数 N_c	15
收益 G	250
成本 E	2

5.3 用户效益变化趋势

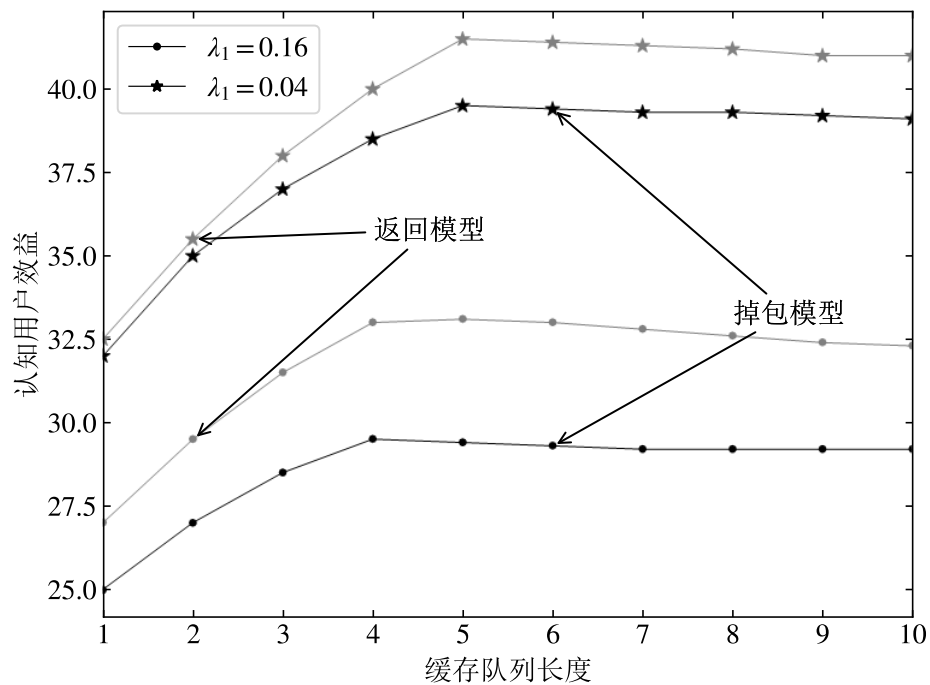


图 5.1 用户效益变化趋势

两种不同的模型下，随缓存队列长度 k 的改变，认知用户效益函数变化趋势如图 5.1

所示。

观察图 5.1，可以看出，对于掉包模型和返回模型，认知用户的效益值都随着缓存队列长度的增加，呈现先增大后减小的趋势。也就是说，当认知用户效益函数上升到最高点时，对应的缓存队列长度大小即为最佳缓存队列长度 k^* ，折线上这一点的函数值即为认知用户所能获得的最高效益。

将不同参数、不同机制下的最佳缓存队列长度及其对应的最佳效益进行记录，如表 5.2 所示。

表 5.2 最佳缓存队列长度及效益

	授权用户到达率 λ_1	最佳缓存队列长度 k^*	最高效益函数 $F(k^*)$
返回模型	0.04	5	41.5
	0.16	4	33.1
掉包模型	0.04	5	39.5
	0.16	4	29.6

由表 5.2 可以看出，无论是返回模型还是掉包模型，随着授权用户到达率 λ_1 变大，对应的认知用户最大效益函数 $F(k^*)$ 都会减小。这是因为，授权用户频繁到达，认知用户被中断的可能性增大，传输成功的概率就会相应减小；认知用户被阻塞的可能性增大了，因此每个认知用户排队的平均时间会增长，相应的花在等待上的花销变大了。

同时，可以发现，伴随着授权用户到达率 λ_1 变大，对应的最佳缓存队列长度 k^* 也变小了。这是因为，授权用户的频繁到达，使得认知用户机会式抢占信道的机会，也就是频谱空缺减少了，因此对于认知用户来说，整个系统更容易达到饱和。更长的缓存队列反而会导致无意义的空等，降低效益。

最后，对比返回模型和掉包模型，可以发现，在相同的条件下，返回模型的最高效益函数值都相对高于掉包模型。这项差异是由它们的机制不同而导致的。对于返回模型，被中断传输的认知用户数据包会返回缓存队列，这在一定程度上保证了系统中认知网络的数量，当频谱出现空缺时，认知用户数据包可以及时地占用信道，完成数据传输，从而提高了效益。而对于掉包模型，一旦认知用户被中断，就会立即离开系统，这在一定

程度上导致了频谱利用率可能相对较低，并且也会使认知用户白白浪费在等待过程中消耗的时间。这些因素导致了，在授权用户到达率相同时，掉包模型的最高效益相对处于劣势。

结 论

为了让系统得到更快的响应速度，本文提出了带有中断掉包及信道聚合机制的认知无线网络。与传统的中断掉包或者分配全部信道的机制相比，本文提出的中断掉包机制准确地识别到了认知用户的真正需求，意识到稳定性并不是首要因素，充分利用频谱空缺，快速地完成数据传输才是重中之重；其次作为认知用户，必须考虑数据传输对整个网络环境造成的外部影响，动态分配信道的信道聚合机制能够有效地减少网络拥塞情况的发生。

根据所提出的机制，本文构造出一个二维马尔可夫链，为了得到系统的转移概率矩阵并进行稳态分析；又构建了一个带有可变服务率的离散时间排队模型，在这个过程中了解、介绍并应用了排队论的相关知识；然后根据系统所得到的稳态概率分布，得出了一系列性能指标。

得到性能指标后，在特定的系统参数下，研究了授权用户到达率、缓存队列长度等变量对认知用户阻塞率、中断丢失率、吞吐量、平均延迟等一系列性能参数的影响，通过 python 语言编程，用 matplotlib 类库绘出各类性能指标图表，与传统的中断返回机制进行了对比，然后经过一系列严谨、合理的推导，验证了带有中断掉包及信道聚合机制在一定网络状态下的性能优势。

最后，考虑吞吐量和延迟之间的矛盾，通过一定的加权，量化了这两项对认知用户个人效益的影响，并通过最优化理论和数值实验，对缓存队列长度这一单一变量进行了分析，得到了各种系统参数下最优的缓存队列长度。

受限于文章长度和本人水平，本文只是对比了中断掉包和中断返回机制的区别，对于单信道分配和信道聚合机制的对比，本文只是简单带过，在之后可以研究这两种机制对外部网络环境的影响，得出更加合理、可观的结论。

致 谢

珍贵的大学时光随着本文的完结，也将走向终点。四年的大学教育带给我的不只是学力上的增长以及眼界的拓宽，还有自主学习的能力，坚持不懈的毅力，终身学习的理念。本科的经历将是我一生最值得回忆的财富。

在这里，我从一个不满十八岁的少年成长为一个独立自主的成年男性，大学的成长已不像中学那样，仅仅是知识的积累，更多的是潜移默化地提高我们的思想觉悟，使我们掌握做人做事的道理。和同学、室友的相处使我的生活变得精彩丰富，众多的社团活动为我带来了别样的生活乐趣，使我拥有了充实快乐的大学生活。

对于本文的撰写，我要特别感谢赵媛赵老师，对待学术的严谨态度让我印象深刻，也让我意识到，严谨客观的态度是科研工作的基石。非常感谢老师从论文的选题、构思、框架设计到论文的规范化、修改提出的宝贵建议，尤其是在我遇到问题的时候，能够很耐心、通俗、不厌其烦地解答我的困惑，再次，我向赵老师表示我最诚挚的感谢。

在我成长的路上能遇到这些尊敬的老师和调皮的同学是我莫大的幸运，赵媛老师的耐心负责、徐长明老师幽默风趣的讲课方式、方淼老师的热情稳健、王鑫老师的谦和沉稳和赵舒怡导师对我们日常琐事的认真负责等等。我得到了许多关怀和帮助，还有我可爱的同学们，我由衷的感谢你们的陪伴。在未来的生活中，我一定会尽自己最大的努力，让自己变成一个更加优秀的人。

自强不息，知行合一。

参考文献

- [1] 张平, 李建武, 冯志勇等. 认知无线网络基础理论与关键技术研究[J]. 电信科学, 2014, 30(2): 1-13.
- [2] 杨淼, 安建平. 认知无线网络中一种基于蚁群优化的频谱分配算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2306-2311.
- [3] 谢先斌, 李新山. 基于频谱感知的认知无线网络容量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 35-38.
- [4] 王正强, 蒋铃鸽, 何晨. 基于合作博弈的多信道认知无线网络中的频谱共享算法[J]. 通信学报, 2014(2): 123-125.
- [5] 王金龙, 龚玉萍, 李玉川. 认知无线网络中的多域认知[J]. 解放军理工大学自然科学版, 2008, 9(6): 565-568.
- [6] 魏急波, 王杉, 赵海涛. 认知无线网络: 关键技术与研究现状[J]. 通信学报, 2011, 32(11): 147-158.
- [7] 刘军, 谢秀峰. 基于排队时延及博弈分析的认知无线网络信道分配算法[J]. 通信学报, 2012, 33(6): 73-81.
- [8] X Wang, Z Li, P Xu, et al. Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks--An Auction-based Approach. [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B Cybernetics, 2010, 40(3): 587-596.
- [9] R Zhang, Y C Liang. Exploiting Multi-Antennas for Opportunistic Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 2(1): 88-102.
- [10] I F Akyildiz. A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Communications Magazines, 2008, 46(4): 40-42.
- [11] A Ghasemi. Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks : Requirements, Challenges and Design Trade-offs[J]. IEEE Communications. Magazines, 2008, 46(4): 32-39.
- [12] H Kim, K G Shin. Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC-Layer Sensing in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5): 533-545.

- [13] D Niyato, E Hossain, Z Han. Dynamics of Multiple-Seller and Multiple-Buyer Spectrum Trading in Cognitive Radio Networks: A Game-Theoretic Modeling Approach[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(8): 1009-1022.
- [14] X Kang, Y C Liang, H K Garg, et al. Sensing-Based Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 4649-4654.
- [15] S Haykin. Cognitive Radio: Brain-empowered Wireless Communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [16] J I Mitola, G Q J Maguire. Cognitive radio: Making Software Radios More Personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [17] T Yucek, H Arslan. A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 116-130.
- [18] 张忠起, 许晓东. 认知无线网络中的频谱切换技术[J]. 移动通信, 2009, 33(18): 17-20.
- [19] S Haykin, D J Thomson, J H Reed. Spectrum Sensing for Cognitive Radio[J]. IEEE Personal Communications, 2009, 97(5): 849-877.
- [20] R H Etkin, A Parekh, D Tse. Spectrum Sharing for Unlicensed Bands.[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 25(3): 517-528.
- [21] A O Allen. Probability, Statistics, and Queueing Theory, Second Edition[M]. Los Angeles: Academic Press, 1978: 45-46.
- [22] Menascé, A Daniel, V A F Almeida, L Dowdy. Performance by Design: Computer Capacity Planning By Example[M]. London: Prentice Hall PTR, 2004: 66-67.
- [23] F Staikowsky, A Lepelletier, I Dandine. Allergic emergencies. Epidemiology in and after the emergency room.[J]. Revue Française D Allergologie Et D Immunologie Clinique, 2001, 41(3): 325-330.
- [24] A Borodin, J Kleinberg, P Raghavan, et al. Adversarial Queuing Theory[J]. Journal of The Acm, 2001, 48(1): 13-38.
- [25] S N Ethier, T G Kurtz. Markov Processes: Characterization and Convergence[M]. London: Prentice Hall PTR, 2008: 76-78.

- [26] S J Russell, P Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach[J]. Applied Mechanics & Materials, 2010, 263(5): 2829-2833.
- [27] F Baccelli, P Bremaud. Elements of Queueing Theory[M]. New York: McGraw-Hill, 1961: 61-65.

附 录

附录 A

Analysis of Cognitive Radio Networks with Channel Aggregation and Imperfect Sensing

Abstract

This paper considers a cognitive radio network where the secondary user has a constant bandwidth which is k times that of a primary user. The primary system consists of constant M primary channels and the cognitive system consists of $N = \lceil M / k \rceil$ channels, where $\lceil x \rceil$ is the largest integer not greater than x . The effects of imperfect spectrum sensing (with false alarms and misdetections) are analyzed using a Markov chain. Explicit expressions for state dependent transition rates are derived for the case $M = 6$ and $k = 2$, and the system performance is evaluated in terms of throughput, blocking probability, and forced termination probability.

I Introduction

With the ever-increasing demand for wireless communications and the popularity of various wireless technologies, the traditional approach to spectrum management based on fixed spectrum allocation, has resulted in scarcity of radio spectrum, due to the fact that most of the available spectrum has been allocated. On the other hand, recent measurements by Federal Communication Commissions (FCC) and others have shown that more than 70 percent of the allocated spectrum in United States is not utilized [1]. As a result, innovative techniques that can offer new ways of exploiting the available spectrum are needed.

Cognitive Radio Networks (CRNs) [2], [3], which are based on Cognitive Radio (CR) terminals and wireless networking technologies have been proposed as the solution to current low usage of licensed spectrum problem. Broadly speaking, the term 'cognitive radio' can be used to refer to various solutions to this problem that seek to overlay, underlay or interweave the secondary user (SU) signals with the primary user (PU) signals in such a way that the primary PUs of the spectrum are as unaffected as possible. In the 'interweave' technique, which is adopted in this paper, the SUs are required to periodically sense and monitor the radio spectrum environment within their operating range to detect the presence/absence of PUs in the

different frequency bands and then opportunistically interweaves the secondary signal through the holes that arise in frequency and time. Spectrum utilization is thus improved by frequency re-use over the spectrum holes.

Most existing works on the performance characteristics of cognitive radios (see e.g., [4]–[9] and references therein) focus on the cases where the SUs are assumed to have less or identical bandwidth requirement as the PU. In [10] The authors considered a CRN where the bandwidth of the SU is wider than or at least identical to that of the PU and proposed two channel aggregation schemes. In [11], channels assembling strategies for CRNs under the scenarios where channels are not time slotted, the time scale of PU activities are comparable with that of the secondary system, and spectrum handover is unavailable are analyzed. However, these works do not consider the impact of imperfect spectrum sensing. Due to feedback delays, quantization error in practical networks, uncertainty of wireless channels, unpredictable interference, and limited SU receiver sensitivity, sensing errors are inevitable. The assumption that SU always obtain the exact channel availability information is therefore unreasonable. Typically, spectrum sensing errors can be classified into two types [6], i.e., miss-detection (MD) and false alarm (FA). Misdetection occurs when the CR network identifies certain frequency bands as being vacant when in reality they are occupied by the PUs network. This type of sensing errors results in transmission collision and influences both PUs' and SUs' current transmission, causing severe interference to the PUs if not kept very minimal. On the other hand, false alarm occurs when the CR network identifies some of the PUs channels as being occupied, when in fact they are idle. This sensing error results in lost opportunities for SUs transmissions and, therefore, reduces the overall throughput of the CR network. It is hence important to conduct performance analysis for both PUs and SUs taking into consideration the impact of imperfect spectrum sensing.

The objective of this paper is to conduct performance analysis of a wideband cognitive radio network, where each SU has a constant bandwidth which is k times that of a PU, with imperfect spectrum sensing and random channel search order. Specifically, continuous-time Markov chains (CTMC) are used to study the interactions between PUs and SUs. It should be noted that, with the notable exception of [7], the existing literature (see e.g., [5], [6], [8]–[10])

about Markov based analysis of cognitive radios do not fully incorporate the state dependence of events such as collisions with PUs or finding free channels for SUs. As a result, in those works, the transition rates depend only on the arrival/service rate. In practice, the transition rates should also depend on the system state. For example, when there are several PUs in the system, the probability of collision increases whereas the probability of finding a free channel decreases. Thus, the state diagram of a Markov based analysis of cognitive radios must have state dependent transition rates at the nodes. Explicit expressions for state dependent transition rates are derived for the case of 6 channels and $k = 2$. These transition rates are found by taking into account the channel state and by going through all the possible search sequences. Using the state diagram, the system performance is evaluated in terms of throughput, blocking probability, and forced termination probability.

The rest of this paper is organized as follows. The system model is described in the next section, where traffic and server models as well as basic assumptions are defined. The performance analysis is carried out in Section III. Numerical results and corresponding discussions are presented in Section IV, before concluding remarks are made in Section V.

II System Model And Assumptions

We consider a cognitive radio network where the SU has a constant bandwidth which is k times that of a PU. It is assumed that the PU and the SU share the same bandwidth for transmission, with PUs having priority over the SUs. Therefore, the presence of SUs is entirely transparent to the PUs. The primary system consists of constant M primary channels and the cognitive system consists of $N = M / k$ channels, where $\lceil x \rceil$ is the largest integer not greater than x . The arrivals processes of both PUs and SUs are assumed to be Poisson-distributed with rates λ_1 and λ_2 , respectively. The corresponding service times are exponentially distributed with service rates μ_1 and μ_2 , respectively. The following assumptions are made:

1) A PU knows the channels occupied by other PUs and hence there is no collisions between PUs.

2) The channel assignment for PUs is transparent to the existence of SUs. When a PU arrives, if the number of PUs in service is less than M , the PU will use one channel regardless

whether there is SU in service over this channel. If the number of PUs in service is M , the PU request is blocked. It is assumed that when a PU arrives to any one of the aggregated channels that are in use by an ongoing service of SU, the secondary will always notice the PU. This results into a very short collision with the PU. After this the SU starts to search for new channels. During this phase, the SU will perform sensing on the remaining channels with random order until it finds k free channels or $M - (k - 1)$ channels are determined to be busy. Due to imperfect spectrum sensing, an idle channel is identified to be occupied with false alarm probability PF and an occupied channel is identified to be idle with miss detection probability $PM = 1 - PD$, where PD is the detection probability.

3) All state transitions are instantaneous, i.e., the time it takes to search for idle channels is assumed to be negligible.

4) A SU knows the channels occupied by other SUs and hence will not sense them.

5) An arriving SU is admitted in the system only when it correctly detects k idle channels

6) When there is collision between a PU and a SU due to miss detection, the SU alone leaves the channels.

7) Idle channels are search in random order. The search stops after k idle channels are found or $M - (k - 1)$ channels are found to be occupied.

8) Each user immediately vacates the system upon service completion.

中文译文 A

带有信道聚合和不完美感知机制的认知无线网络分析

摘要

本文考虑一种认知无线网络，其中，认知用户拥有恒定的带宽，具体来说，授权用户拥有的带宽是它的 k 倍。授权用户系统包含恒定的 M 个信道，认知用户系统包含 $N = M / k$ 个信道。不完美频谱感知(带有误警率和错检率)的效果，我们用马尔可夫链来分析。对于 $M = 6$ 和 $k = 2$ 的情况，导出了状态相关转换率的显式表达式，系统性能用吞吐量、阻塞率、强制中止率来评估。

I 引言

随着对无线通信需求的不断增加和各种无线技术的普及，传统的基于固定频谱分配

的频谱管理方法由于大部分可用频谱已被分配，导致无线电频谱的稀缺。另一方面，联邦通信委员会(FCC)和其他机构最近的测量表明，美国 70%以上的分配频谱没有被利用[1]。因此，需要能够提供利用现有频谱的创新技术。

基于认知无线电中断和无线网络技术的认知无线网络[2],[3]，已经被提名作为当前授权频谱使用率低问题的解决方案。广义地说，术语“认知无线电”可以用来指各种解决这个问题方法，这些方法寻求以尽可能在不影响频谱中授权用户的情况下，覆盖、重叠或交织授权用户信号与认知用户信号。在本文提出的交织技术下，认知用户需要在不同频率的波长上周期性的感知、监控无线电频谱环境来检测授权用户的到场/离开，然后通过时空上的频谱空洞机会式地交织次级信号。因此，频谱利用率通过频谱孔上的频率重复使用得到提高。

大多数关于认知无线电性能特征的现有工作(见[4] - [9]及其参考文献)都集中在假定 SUS 的带宽要求小于或等于 PU 的情况下。在[10]中，作者考虑了 SU 带宽大于或至少等于 PU 带宽的 CRN，并提出了两种信道聚合方案。在[11]中，在信道没有时间间隔的情况下，对 CRN 的信道组合策略进行了分析，发现 PU 活动的时间尺度与二次系统的时间尺度相当，频谱切换不可用。然而，这些工作并没有考虑不完美频谱感知的影响。由于反馈延迟、实际网络中的量化误差、无线信道的不确定性、不可预测的干扰以及 SU 接收机灵敏度的限制，感知错误不可避免。因此，假设 SU 总是获得准确的信道可用性信息是不合理的。通常来说，频谱感知错误可以被分为两类，漏检和误警。漏检发生在认知用户以为信道空闲其实授权用户正在使用的情况。这种类型的感知错误导致传输冲突，影响授权用户和认知用户的传输，如果不能保持最小，会对授权用户产生严重影响。另一方面，误警发生在认知用户以为信道忙其实是空闲的情况。这种感知错误会导致认知用户错失传输机会，因此，会减少认知无线网络的整体吞吐量。因此，考虑不完美感知对系统的影响，对授权用户和认知用户进行性能分析非常重要。

本文的目的是对一个宽带认知无线网络进行性能分析，其中每个认知用户的带宽是一个授权用户的 k 倍，具有不完全的频谱感知和随机信道搜索顺序。具体地说，使用连续时间马尔可夫链(CTMC)用于研究授权用户和认知用户之间的相互作用。应该注意的是，除了[7]的显著例外，关于基于马尔可夫的认知无线电分析的现有文献(如[5]、[6]、[8] - [10])并未充分结合事件的状态依赖性，如与授权用户冲突或为认知用户找到自由通道。作为结果，在这些工作中，传输率仅仅取决于到达率/服务率。在实际情况中，传输

率也应该取决于系统状态。例如，当系统中存在若干个授权用户，冲突率增加而找到空闲信道的几率减少。因此，基于马尔可夫的认知无线电分析的状态图在节点处必须具有状态依赖的转换率。对于 6 个信道和 $k=2$ ，导出了状态相关转换率的显式表达式。通过考虑通道状态和所有可能的搜索序列，可以找到这些转换率。使用状态图，根据吞吐量、阻塞概率和强制终止概率评估系统性能。

本文的其余部分组织如下。下一节将介绍系统模型，其中定义了流量和服务器模型以及基本假设。性能分析在第三节中进行。第四节中给出了数值结果和相应的讨论，然后在第五节中作出结论性评论。

II 系统模型及分析

我们考虑一个认知无线网络，其中授权用户的带宽是认知用户的 K 倍。假设授权用户和认知用户共享相同的传输带宽，授权用户优先级更高。因此，认知用户的存在对授权用户是完全透明的。授权用户系统包含恒定的 M 个信道，认知用户系统包含 $N = M/k$ 个信道。假设授权用户和认知用户的到达过程分别为泊松分布，速率为 λ_1 和 λ_2 。

相应的服务时间分别与速率 μ_1 和 λ_2 呈指数分布。我们做出以下假设：

- 1) 一个授权用户知道其他授权用户占据的通道，因此授权用户之间没有碰撞。
- 2) 授权用户的信道分配对认知用户的存在是透明的。当一个授权用户到达时，如果服务中的授权用户数量小于 M ，则授权用户将使用一个通道，不管该通道上是否有认知用户服务。如果服务中的授权用户数量为 M ，则授权用户请求被阻止。假设当一个授权用户到达正在被认知用户的一个持续服务使用的聚合通道中的任何一个时，认知用户总是会注意到该授权用户。这会导致与授权用户发生非常短的碰撞。之后，认知用户开始搜索新的频道。在此阶段中，认知用户将随机对剩余的通道进行感应，直到发现 k 空闲通道或 $M - (k - 1)$ 通道被确定为繁忙。由于频谱传感不完善，识别出空闲信道被误报概率 PF 占用，识别出占用信道空闲，漏报检测概率 $PM = 1 - PD$ ，其中 PD 为检测概率。
- 3) 所有状态转换都是瞬时的，即搜索空闲通道所需的时间可以忽略不计。
- 4) 一个认知用户知道其他认知用户占据的通道，因此不会感觉到它们。
- 5) 只有在正确检测到 k 空闲通道时，系统才允许接收新到的认知用户。
- 6) 当一个 PU 和一个 SU 之间由于检测失误而发生碰撞时，SU 会单独离开通道。
- 7) 空闲通道按随机顺序搜索。在找到 k 个空闲通道或 $M - (k - 1)$ 通道被占用后，搜

索停止。

- 8) 服务完成后，每个用户立即离开系统。