感知中继网络中继选择和功率分配策略研究

专 业： 通信与信息系统

硕士生： 林楷鑫

指导教师： 张琳 副教授

摘 要

无线频谱资源有限，并且以往固定的频谱分配方式导致频谱使用效率低下，使得可用于新业务的频谱资源极为有限，成为制约无线通信发展的瓶颈。如何充分提高有限频谱资源的使用效率以满足越来越高要求的数据业务的问题成为各国学者及工业界的研究热点之一。

感知无线电技术（Cognitive Radio，CR）能实现不同无线电系统频谱资源的有效共享和动态分配使用，可以有效缓解频谱分配与利用之间的矛盾。在感知无线电Underlay频谱共享模型中，感知用户和授权用户可以共享授权频谱，前提条件是感知用户对授权用户产生的干扰不会超过授权用户能够承受的最大干扰的条件。感知用户为了使用该段频谱和满足这一条件只能是降低自身的发射功率。当授权用户可接受的最大干扰较小的时候，感知用户的发射功率就会受到严重的限制，再加上衰落的影响，使得信息传输质量下降，难以满足感知用户的需求。协作中继技术能够有效地对抗衰落，能以较小的发射功率获得较好的通信性能，将协作中继应用到感知无线电中，能够在保护授权用户信息传输有效性及可靠性的条件下提高感知用户的信息传输性能。

本文将协作中继应用于感知无线电系统，并对其中继选择和功率分配策略进行了研究，提出了最小化发射功率的中继选择和功率分配策略。论文首先简要介绍了感知无线电技术和协作通信的概念以及基本原理，分析了感知中继网络关键技术，然后针对中继选择和源节点与中继节点之间的功率分配问题，将最小化发射功率的中继选择和功率分配策略应用到感知中继网络中来，并从理论上推导提

出了放大转发（Amplify-Forward，AF）和解码转发（Decode-Forward，DF）中继系统的最小化发射功率的分配方案，最后在MATLAB平台上对该策略进行性能仿真。理论分析和仿真结果表明，该算法在确保感知用户不对授权用户产生有害干扰和满足感知用户的QoS要求下，能够进一步的降低总发射功率，从而减少感知用户对授权用户和其他网络的干扰、减少感知用户的能量开支，延长无线终端的电池使用时间。

关键词：感知无线电，中继选择，功率分配，放大转发（AF），解码转发（DF）

Research on the Strategies of Relay Selection and Power Allocation in Cognitive Relay Network

Major: Communication and Information System

Name: Kaixin Lin

Supervisor: Associate Prof. Lin Zhang

ABSTRACT

Radio spectrum resources are limited, and the existing fixed spectrum allocation method has resulted in low spectrum utilization, both making spectrum resources for new service available become more and more scarce. Spectrum deficiency has been a bottleneck for the development of wireless communications. How to improve the limited spectrum resources utilization and efficiency to meet the growing demands of data services has become one of the hot research topics of scholars around the world and industry.

Cognitive Radio (CR) technology can be used in different radio systems to share and use the spectrum resources in dynamic allocation, and thus the conflict between the spectrum allocation and usage can be reduced. In the cognitive radio's underlay spectrum sharing model, the second user and the primary user can share the licensed spectrum under the condition that the interference to the primary user created by the second user does not exceed the maximum interference that the primary user can bear. In order to use the spectrum and meet this condition, the second user has to reduce his transmitting power. When the primary user's maximum acceptable interference is small, the second user's transmitting power will be severely restricted, coupled with

the impact of the fading, the information transmission quality of the second user will decline, as a result, it is hard to meet the needs of the second user. As the relay cooperation technology can combat fading effectively and use smaller transmission power to obtain better communication performance, so if it can be applied to cognitive radio network, the transmission performance of the second user will be improved under the conditions of protection the validity and reliability of information transmission of the primary user.

This thesis applies cooperative relay technology for cognitive radio system, studies the relay selection and power allocation strategy of this system, and proposes the minimum transmission power of relay selection and power allocation strategy. We firstly briefly introduces the concept and basic principles of cognitive radio and cooperative communication. and analyzes the key technologies of cognitive relay network. Then we exploit the minimum transmission power of relay selection and power allocation strategy to deal with the problems of relay selection and the power allocation between the source and the relay node in the cognitive relay network and derived from the theoretical minimum transmit power allocation schemes in the Amplify-Forward(AF) and Decode-Forward(DF) relay systems, and finally simulate the performance of the strategy on MATLAB. Theoretical analysis and simulation results show that it can further reduce the total transmission power cost under the conditions of ensuring that the second user does not cause harmful interference to the primary user and meeting the second user's QoS requirement, thereby reduce the second user's interference to the primary user and other networks and energy costs to extend the battery usage of wireless terminals.

Keywords: Cognitive Radio, Relay Selection, Power Allocation, Amplify-Forward, Decode-Forward

原创性声明

本人郑重声明：

所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：林楷鑫　　日期：2010 年 6 月 3 日

学位论文使用授权声明

本人完全了解中山大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆、院系资料室被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，可以采用复印、缩印或其他方法保存学位论文。

学位论文作者签名：林楷鑫　　日期：2010 年 6 月 3 日

导师签名：张琳　　日期：2010 年 6 月 3 日

第1章 绪论

本章首先介绍了本论文工作的研究背景，引出了课题的研究意义，接着介绍了感知无线电和协作通信技术的相关概念；然后通过对感知无线电与协作通信发展现状的分析，提出本论文所要研究的主要内容和目标；最后，阐述了论文工作的贡献、论文结构和内容安排。

1.1 研究背景和意义

自1896年意大利人马可尼首次用人造电磁波传递消息，并建立了第一座无线发射和接收电台以来，无线通信经历了100多年的发展。无线通信系统已从早期简单的模拟系统发展到当前的高速数字系统，从提供单纯的语音业务发展到了提供形式多样的数据业务，但是依旧无法满足人们日趋增长的高速、高质量通信需求，因此，越来越多新的无线通信系统被部署，大量新的无线业务陆续开展。然而，如此繁多的通信业务（或者系统）也占据了大量的频谱资源，使得频谱资源变得越来越紧张，导致可用于新业务的频谱资源不断减少，已成为制约无线通信发展的瓶颈。导致有限的频谱资源难以满足通信需求的原因主要包括：

1、频谱划分和使用政策的约束。由于无线频谱是一种稀缺的自然资源以及为了避免通信干扰，频谱的分配和利用都是由专门的无线电法规部门进行统一管理，目前主要按照不同通信业务或者通信系统类型，采用静态（固定）的频谱分配方案。在此方案下，频谱管理部门将可用频谱资源划分成非重叠、大小固定的频谱块，并将这些频谱块以独享的方式分配给不同的团体或者个人（通信业务或者通信系统由团体或个人经营），分配到这些频谱块的用户被称为授权用户（Primary User，PU），例如：移动通信运营商、广播电视、军事和相关公共安全部门，获得频谱的授权用户将长期独占该频谱使用权。另外，为了保证无线设备的兼容性和人们通信的方便，频谱分配方案在全世界或一个国家范围是基本一致的，目前很多国家的可用频谱资源差不多已经分配完毕。美国$3KHz \sim 300GHz$频谱分配情况如图1-1所示[1]：

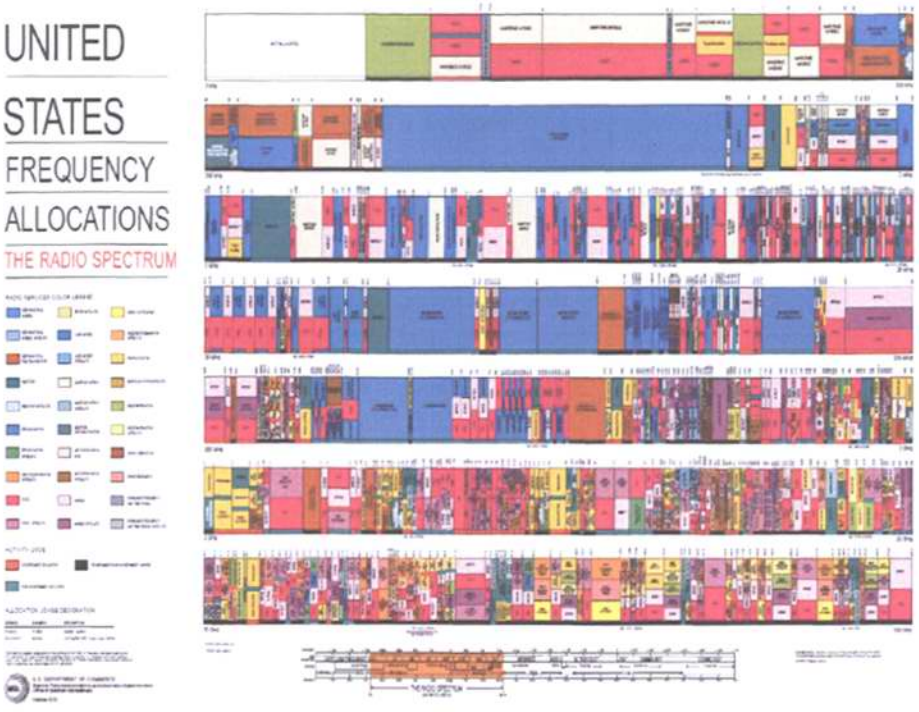

图 1-1　美国 3*KHz*～300*GHz* 频谱分配情况

从图中可以看出，留给新的系统、业务或者技术的频谱非常少，这严重阻碍了新技术和业务的商用推广进程。比如在美国留给第三代移动通信系统（3G）的频谱仅为几十 *MHz*，这远远不够，即使与 ITU 的 230*MHz* 的统一分配也相差很多；又如目前难以为 WiMAX 系统找到合适的频段，尽管 WiMAX 是一个很好的系统，但由于频谱问题不得不使得它的商用推广进程大大减慢，这样就迫使它去争夺本来就已经很紧张的 3G 频段[2]。

（2）频谱利用率不高，大量的频谱处于空闲状态。按照频谱分配的原则，无线频谱资源划分为授权频段和非授权频段两类。在授权频段，得到授权频段频谱的团体或个人长期独占该频谱使用权，不允许其他人使用；在非授权频段一般采用竞争方式接入使用，由于缺乏控制系统间干扰的机制，通信质量得不到保障，因而开放频段往往只能用于小范围的通信，如 WLAN 系统。在这些已分配的授权频段和非授权频段中，存在着使用的不平衡性。一方面，授权频段占据整个频谱资源的绝大部分，由于在某一个地点上，授权用户不会时时刻刻都使用该频段，因此不少授权频段都处于空闲的状态；另一方面，占频谱资源很少一部分的非授权频段的用户却很多，业务量拥挤[2]。通过对信号强度的测试，0～6*GHz* 的频谱

使用情况如图 1-2 所示[3]：

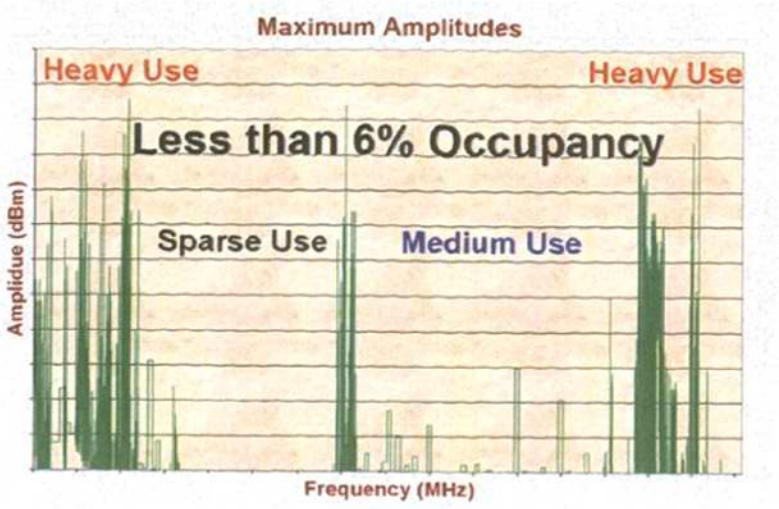

图 1-2　0～6*GHz* 的频谱利用率情况

从图中可以看出，只有少部分频段被频繁使用，大部分频段很少或基本没有使用。美国联邦通信委员会（FCC）的研究表明，授权频段的平均利用率范围在15%-85%之间[4]。

（3）频谱使用是动态变化的。与当前固定频谱分配方案和长期独占频谱使用权完全不同的是，频谱的使用是动态变化的，随着频段、时间、地点和系统（技术）不同而不同。在德国 Lichtenau 对一天中 50*MHz*～1*GHz* 的频谱利用情况测量结果如图 1-3 所示[5]，不同的频段的占用情况完全不同。

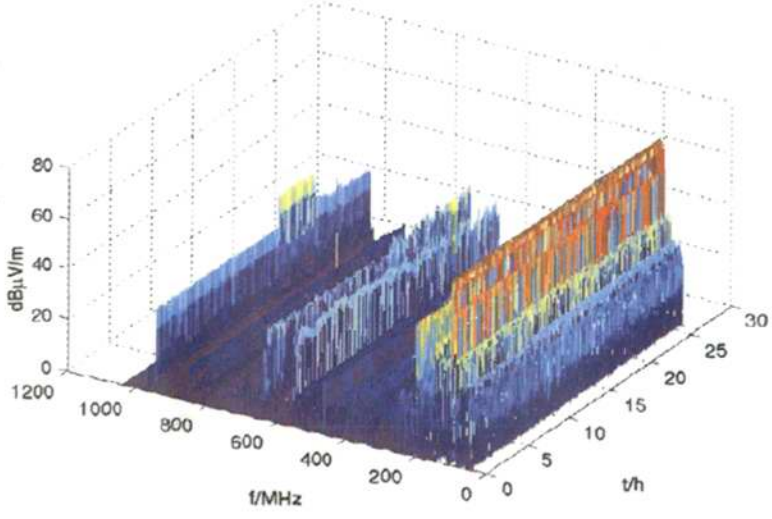

图 1-3　50*MHz*～1*GHz* 的频谱利用情况

对$0GHz \sim 1.2GHz$的检测发现，频谱使用情况在不同的时刻会变化，甚至前一分钟与后一分钟都不同。进一步推测可以得知，不同的地点的频谱使用情况也是相差很大[2]。

因此在目前频谱管理中存在有三大矛盾：频谱使用是动态的，但频谱分配是固定的；频谱是稀缺资源，但频谱利用率不高；剩下可分配频谱很少，但无线通信业务量快速发展，频谱需求量大[2]。虽然目前采用各种复用技术（如频分复用FDM，时分复用 TDM 等）、多址方案（码分多址 CDMA，MIMO 技术等）和高级信号处理技术可以提高频谱利用率，但都不能从根本上解决问题。这是由于导致这三大矛盾的根本原因在于采用固定（静态）的频谱分配方案和独占频谱使用权原则（即业务接入权和频谱准入权），因此现阶段最行之有效的方法就是通过改变频谱准入权，以开放频谱使用、提高频谱利用率和充分利用空闲频谱。这样，迫切需要一种技术来解决开放频谱的问题和提高频谱使用率[2]。

由于开放频谱必须保护购买频谱者的利益，同时不能对授权使用该频谱的业务和系统造成严重的干扰，影响到其正常通信。由瑞典 Joseph Mitola 博士于 1999 年提出的感知无线电（Cognitive Radio, CR）[6]提供了一种按伺机（Opportunistic）方式共享和利用频谱的手段，可以有效解决这两个问题，受到了学术界的广泛关注。

然而在感知无线电系统中，感知用户是伺机式地利用频谱，其可利用的通信资源非常有限，再加上路径损耗和多径衰落的影响，使得感知用户的传输性能难以得到充分的保障。引入协作通信后，多个感知用户之间通过相互协作，可以有效改善感知用户系统的性能。协作通信的思想来源于多输入多输出（MIMO）技术[7-8]。在 20 世纪 90 年代，人们发现使用多输入多输出技术可以能够更高效地利用有限的通信频谱资源，在不增加通信资源的情况下，提高系统的性能。但是在实际的无线通信系统中，由于移动终端的体积、质量和功耗等因素，很难在移动终端安装多个天线，导致难以实现上行的发送分集。为了克服这个难题，研究人员提出了一种新的空间分集技术——协作通信。网络中的多个用户终端通过协作，形成一个虚拟的多天线阵，从而获得空间分集增益的方式（也称为协作分集），能够有效地对抗信道多径衰落、码间串扰，从而提高系统的性能。

1.2 感知无线电技术的研究现状

感知无线电是目前无线通信领域的研究热点之一，目前，国内外各大高校，科研院所都在从事相关研究：

瑞典皇家工学院（Swedish Royal Institute of Technology，KTH）的无线系统研究中心（Wireless@KTH）是感知无线电的发源地，Joseph Mitola 博士于 1999 年提出了感知无线电概念，并系统地研究设计了无线电知识描述语言（RKRL），目前该中心主要集中在软件无线电和动态频谱接入这两方面[2]。

美国加州大学伯克利分校（University of California at Berkeley）无线研究中心（Berkeley Wireless Research Center，BWRC）的 Brodersen 教授及其领导的研究小组与柏林技术大学（Technology University of Berlin）联合，提出了一个基于感知无线电方式使用虚拟非授权频谱的 CORVUS（A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum）体系结构，给出了该体系结构基本的应用场景，并描述了评估系统性能的参数和粗略的系统协议功能体系。

德国 Karlsruhe 大学通信工程研究所的 Fiedrich Jondral 教授及其领导的研究团队在德国研究基金项目 TAKOKO 的资助下开展了对频谱池共享相关技术的研究[5, 9]。所谓频谱池共享，其基本思想就是将一部分分配给不同业务的频谱合并成为一个公共的频谱池，频谱池中的频谱可以是连续的也可以是不连续的，整个频谱池又被划分为若干个子信道。频谱分配的基本单位子信道，在不对授权用户产生干扰的条件下，感知用户可以租借该频谱池的资源，以提高信道利用率[2]。

此外，美国 FCC 成立了频谱任务工作组（Spectrum Policy Task Force），研究感知无线电在内的频谱管理政策。IEEE 802 工作组委员会启动了 802.22 标准工作组，以发展无线区域网络(Wireless Regional Area Network, WRAN)的物理层和媒体控制接入层技术标准。软件无线电论坛（SDR Forum）专门成立了感知无线电研究组，研究感知无线电技术及其应用。IEEE 还专门发起了感知无线电技术作为主题的 IEEE DySPAN 和 IEEE CrownCom 会议，另外，一些重要的无线通信相关会议，如 ICC、INFOCOM 和 WCNC 等都开设了感知无线电技术专题。

与国外相比，虽然我国的感知无线电方面的研发起步较晚，但也受到了高度重视，国家高科技技术研究发展计划（863 计划）和国家自然科学基金委都分别从 2005 和 2006 年开始资助感知无线电技术研究项目，西安电子科技大学、电子

科技大学、西安交通大学联合参与了国家高科技技术研究发展计划设立的感知无线电技术课题，从感知无线电物理层（PHY）和媒体控制接入层（MAC）的关键技术、协议结构体系、应用场景分析等方面进行研究。2008 年国家自然科学基金委信息科学部在感知无线电领域设立了重点项目群，进一步推动感知无线电研究[2]。

从上面的研究现状可以看出，对感知无线电技术及网络的研究方兴未艾。目前的研究涵盖了 PHY 层、MAC 层、无线资源管理层和网络体系架构的整个感知无线电系统领域，通过对这些关键技术的研究，将会使感知无线电最终走上实际应用之路。

1.3 协作通信技术在感知无线电中的应用

随着感知无线电和协作通信技术的发展，将二者结合越来越受到关注[10]。这是由于在感知无线电网络设计中，还存在很多的问题，应用协作通信后能够有效地改善系统的性能。目前将协作通信应用到感知无线电网络中主要涉及两个比较重要的方面：

（1）在授权用户频谱检测方面：感知用户需要检测授权用户是否在使用该段频谱，那么最主要的问题就是感知用户如何快速和准确地检测到授权用户，根据检测结果调整自身的通信参数，从而不对授权用户产生有害干扰。由于授权用户和感知用户之间不能直接进行信息交换，那么频谱检测工作只能依靠感知用户对授权用户信息的截获来进行。在截获授权用户信息的过程中，不可避免的受到多径、阴影以及本地干扰等因素的影响，容易造成“隐藏终端”和“曝露终端”等问题，导致感知用户判断结果出错，从而使得感知用户对授权用户产生有害的干扰或者丢失频谱使用机会。目前的研究表明[11-12]，采用协作频谱感知策略，多个感知用户之间相互交换和融合检测信息的协作方法，可以在一定的程度上提高频谱检测的准确性，减少感知用户对授权用户的干扰和提高频谱使用效率。

（2）频谱资源的合理利用：当获得频谱使用权之后，感知用户要利用该段频谱来满足自身通信服务质量（Quality of Service，QoS）的要求，同时还要不对授权用户产生影响。于是，感知用户可能会争抢资源，或是相互协作共享资源，提高资源利用率。研究分析表明[13-14]，不同终端互相协作进行数据传输，可以有

效地提高通信的质量。

将协作通信与感知无线电结合，主要有三种网络拓扑结构，如图1-4至1-6所示：

图1-4是感知用户之间通过协作来进行频谱感知，检测授权用户是否正在使用该频谱资源；图1-5是感知用户充当授权用户的中继节点，协助授权用户进行传输，从而为自己换来更多的频谱使用机会；图1-6是感知用户之间采用协作传输，增强自身的通信性能，同时减少对授权用户的干扰，这也是本文重点研究的协作网络结构。

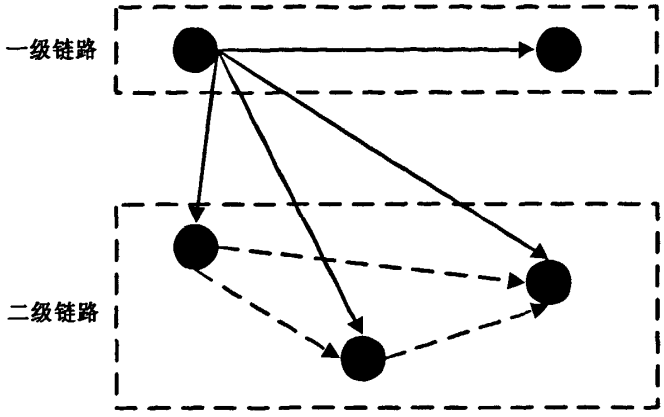

图1-4 协作频谱检测

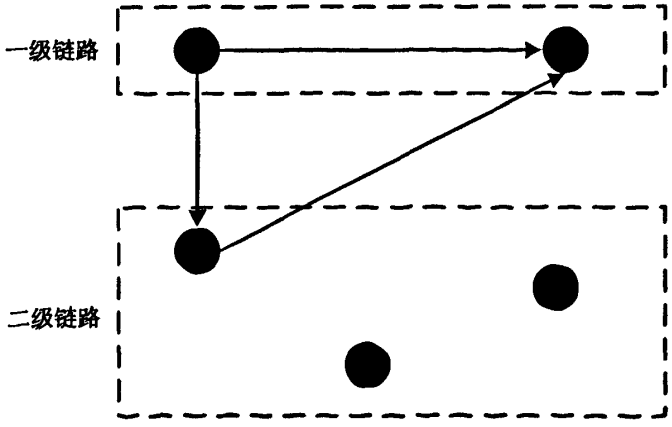

图1-5 感知用户协作授权用传输

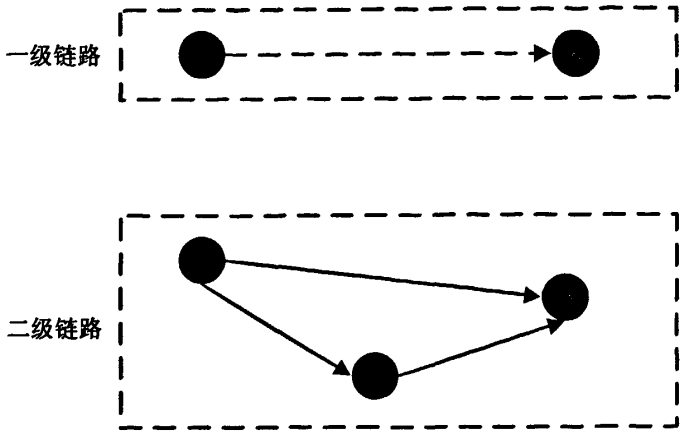

图 1-6 感知用户之间协作传输

1.4 主要研究内容及论文结构

本论文重点研究感知无线电中的协作中继技术，通过对现有技术的深入分析和比较，从感知中继网络中继选择和功率控制两个方面出发，针对以往感知中继网络中继选择和功率分配策略未能满足感知用户 QoS 要求和对授权用户干扰尽可能小的要求的问题，将最小化发射功率的中继选择和功率分配策略应用到感知中继网络中，并推导出在放大转发（Amplify-Forward，AF）和解码转发（Decode-Forward，DF）中继系统中源节点与中继节点的功率分配方案，在达到相同的信噪比要求下，有效节省能量的开销和在满足授权用户干扰限的前提下，使感知用户获得更高的信噪比要求，并且通过仿真对结论进行验证。论文结构如下：

第一章：叙述感知无线电的研究背景和研究现状，简要介绍感知无线电和协作通信的基础知识，最后给出了本论文的研究内容和结构安排。

第二章：首先介绍感知无线电的相关概念、基本原理和关键技术，接着介绍了协作通信的基本技术原理和具有的优势，并探讨如何将协作通信的技术应用到感知无线系统中，来进一步的提高感知无线电系统的性能。

第三章：首先介绍感知中继网络的协作机制，给出了感知中继网络的系统模型，进而提出了感知中继网络中中继选择和功率控制的问题，即在不对授权用户产生有害干扰和满足感知用户 QoS 的前提下，如何从众多的可用中继节点中选择最合适的节点和如何在所选定的中继节点与源节点之间分配功率，从而更加有

效地提高感知用户的传输性能。将最小化发射功率的中继选择和功率分配策略应用到感知中继网络中来，不仅满足了感知用户的 QoS 要求，也能在有效的保证授权用户不受到来自感知用户的有害干扰的条件下进一步减少对授权用户的干扰，还可以节省能量的开销，提高能量的效率，从而有效地延长感知无线终端电池的使用时间。

第四章：是本文的重点部分，在最小化发射功率中继选择和功率分配策略下，建立在放大转发（AF）和解码转发（DF）中继系统中的数学模型，并推导出在相应中继系统中的功率分配方案，通过仿真与直接传输、平均功率分配方案和随机选择中继策略进行比较，结果表明在最小化发射功率中继选择和功率分配策略下，能够以较小的发射功率达到相同的信噪比要求，而且在协作传输方案中，随着可用中继用户的数量的增加，其所需的发射功率在不断减少；同时还比较了本算法在 AF 和 DF 两种中继系统中的性能，结果表明在 DF 中继系统中，由于中继节点滤除了来自源节点信号中的噪声，避免了噪声的传播，使得在 DF 系统中获得更好的性能。但是当源节点与中继节点之间的信道状态较差，并且中继正确解码的信噪比门限较高时，在小信噪比要求下，算法在 DF 系统中比在 AF 系统中性能差。仿真结果与理论结果相符合。

第五章：对本文的工作进行总结，并提出了需要进一步研究的问题。

第 2 章　感知无线电和协作通信技术概述

2.1 感知无线电技术原理

2.1.1 感知无线电的概念和特征

感知无线电的概念是由瑞典 Joseph Mitola 博士于 1999 年提出的[6]，是软件无线电（Software Radio，SR）的进一步扩展，采用基于模式推理达到特定无线相关要求的无线电，通过无线电知识描述语言（Radio Knowledge Representation Language，RKRL）来描述无线电规则、设备、软件模块、电波传播特性、网络、用户需求和应用场景的知识，以便增强个人无线通信业务的灵活性，使软件无线电更好地满足用户的需求。其中基于模式的推理和无线电描述语言（RKRL）是 Mitola 博士强调的核心。

Mitola 博士在其博士论文[15]中给出了以通信前后环境和位置为基础的感知推理模型，如图 2-1 所示：

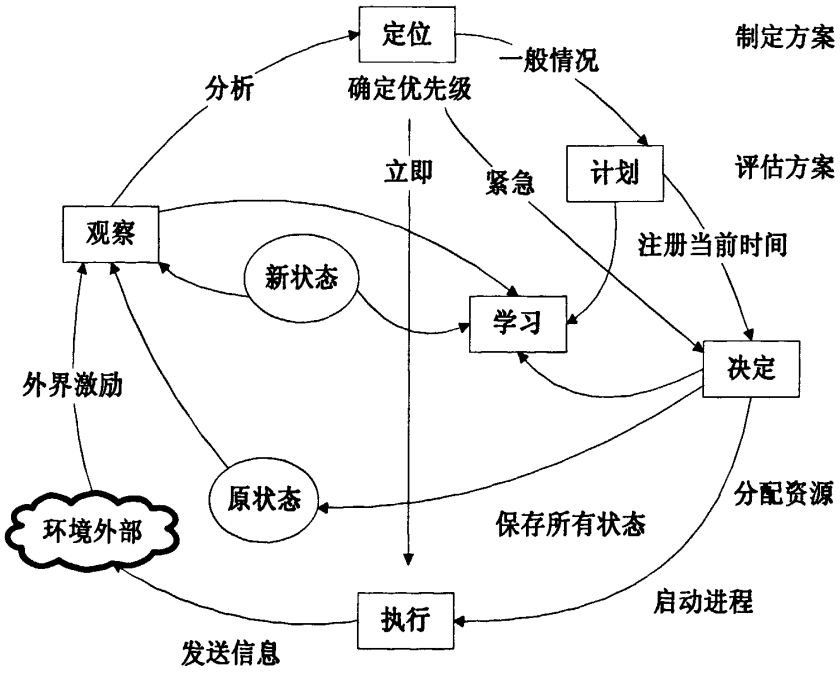

图 2-1　感知无线电的感知周期

该模型描述了感知无线电系统如何与环境进行信息交互，利用感知的新状态和先验信息，最终得到响应的一个感知无线电持续的环境观察、自身定位、制定计划和决策执行的流程，每一个状态都涉及人工智能学习的功能。同时 Mitola 博士还在该论文中首次给出了感知无线电的定义:感知无线电是一种智能的无线通信技术，它能够连续不断地感知周围的无线电环境，通过对环境信息的学习、分析和判断，然后根据决策的结果，通过无线电知识描述语言(RKRL)自适应地调整其内部通信参数(如工作频率、发射功率、调制方式等)以适应环境的变化。其核心思想是通过检测那些处于空闲状态的频谱，在不影响授权用户的前提下智能地选择和利用这些频谱资源[16]。

随着感知无线电的发展，不同的机构和学者提出了不同的感知无线电的定义，其中比较有代表性的是：

美国联邦通信委员会（FCC）认为：感知无线电技术是无线终端设备利用对周围无线环境进行感知和学习，获得相应的背景知识，从而调整传输参数，实现无线传输的能力。即只要通信设备具备对周围环境探测的能力，并且能够动态地调整传输频段和相关传输参数的设备就是感知无线电设备。感知无线电与普通软件定义无线电最大的不同就是感知无线电具有智能性[2]。

2005 年，著名通信理论专家 Simon Haykin 教授从通信角度给出了感知无线电的定义[17]。他指出感知无线电是一种智能的无线通信系统，它能自动地感知周围的无线电环境，通过对周围环境的主动学习和分析，实时地调整内部参数（如功率、频率、调制方式和编码方案等）以适应外部环境变化，在不对授权用户造成干扰的情况下利用空闲频谱进行通信。Haykin 教授还从信号处理的角度出发全面总结了感知无线电技术的三个关键技术问题：外部无线环境分析(Outside Radio-scene Analysis)、信道估计与预测建模(Channel Estimation and Predictive Modeling)、发射功率控制与动态频谱管理(Transmit-Power Control and Dynamic Spectrum Management)[16]。并给出了由以上三个关键问题所构成的感知推理模型，如图 2-2 所示：

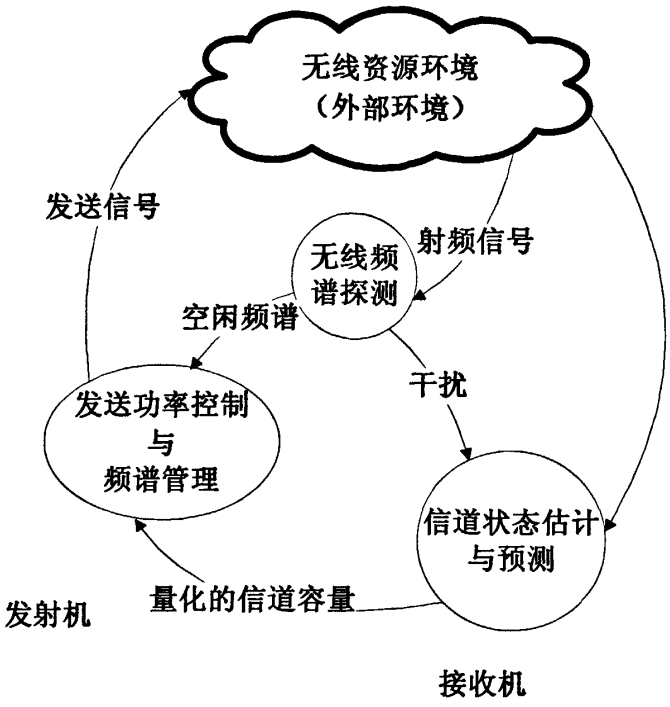

图 2-2　感知无线电的感知推理模型

总结以上定义，可以得出，感知无线电具有以下的两大特征：

（1）　感知能力

感知无线电终端必须能够对周围的无线电环境进行学习，通过学习获得授权用户对于特定频段使用情况，然后根据获得的信息选择相应的工作参数。这一任务主要包括三个过程：频谱感知、频谱分析和频谱判决。频谱感知即频谱检测，通过对可用频谱的监测，获得该段频谱的初步信息；频谱分析是对频谱感知过程中获得的信息进行分析，从而获得该段频谱的特性；频谱判决是根据频谱的特性和用户的性能需求来选择合适的频谱进行传输。

（2）　重构能力

重构能力使得感知无线电设备可以根据无线环境的变化，进行动态的编程，从而使得感知无线电设备能够采用不同的传输方案，以适应环境的变化，达到高可靠性的要求。可以重构的参数有：工作功率、频率、调制方式和编码方案等。重构的目的是在不对授权用户产生有害干扰的前提下，进行数据的传输，同时尽可能地满足感知用户对于传输的性能要求。

因此，感知无线电系统区别于其它传统无线电系统的主要特点是：对环境情

况的感知能力、对环境变化的自适应性、系统功能模块的可重构性等。其中对环境情况的感知能力要求感知无线电系统能够检测特定时间和空间的空闲频谱资源，以及获取频谱管理和使用规则，主要涉及频谱检测技术。对环境变化的自适应性就包括依据频谱感知的结果，自动调整频率、功率和调制方案等参数，主要涉及频谱资源管理和分配技术。从感知无线电的背景来看，感知无线电系统能够充分利用频谱资源；从它的存在环境看，可以避免对其他用户造成干扰。所以感知无线电能有效解决频谱资源缺乏的难题[2]。

2.1.2 感知无线电的关键技术

依据上面对感知无线电的介绍，我们得知，感知无线电需要解决的问题主要有以下四个方面：

（一）频谱感知：频谱感知技术是感知无线电应用的前提，感知无线电设备必须在某个时刻准确地感知它周围的无线电环境，检测是否存在空闲频段或者是对干扰温度的测量，找出可用的频段；同时还要周期性的监测外部无线环境的变化，这是因为在授权频段感知用户的频谱接入权比授权用户低，因此感知用户在使用该授权频带的过程中，一旦授权用户再次出现或者有其他的干扰导致干扰温度的变化，感知用户就要在第一时间检测到这个行为，并且做出相应的调整，退出该段频谱或者降低发射功率减少对授权用户的干扰。上述的两点要求检测算法要有很高的可靠性和很快的检测速度。因此，检测速度和可靠性成为衡量算法的重要因素，很多算法不能同时满足这两个要求，于是在实际应用中，根据不同的授权用户要求的检测速度和灵敏度不同，选用不同的算法。

（二）频谱管理与共享：从频谱利用的角度来看，感知无线电与其他无线通信技术相比较，具有两大特征。首先，因为其工作频谱分散在包括授权频带和非授权频带上，具有工作频谱范围广和可用的频谱特性不尽相同两大特点；其次，感知无线电更加侧重于提高频谱的利用率，并提供较好的接入公平性。当感知用户检测到可用的频谱时，感知用户还需要进行频谱分析和频谱判决，这两个方面统称为频谱管理，它提供了一个高效的利用频谱的自适应策略，从而更好地满足感知用户的 QoS 要求。为了更好的利用空闲频谱，还需要解决如何公平协调的共享频谱问题，以及当授权用户出现、信道质量变差或者用户位置移动时都可能

导致发射频率切换的频谱移动性问题。频谱共享包括感知用户之间的、感知用户与授权用户之间的以及感知网络之间的频谱共享问题，频谱共享的目的是对频谱的无冲突使用，好的频谱感知算法必须要提供较高的频谱利用率和较好的接入公平性[2]。针对于目前无线频谱主要分为开放频段和授权频段的情况，相应的频谱接入模型就分为开放共享模型和分级接入模型。开放频段主要指 2.4*GHz*、5.8*GHz* 的 ISM 频段和 5*GHz* 的 U-NII 频段。在这些频段，不存在授权用户，用户间通过竞争共享频谱[18-19]。分级频谱接入主要是针对授权频段，在授权频段，授权用户有优先级，感知用户可以伺机利用频谱资源，只要保证感知用户不对授权用户产生有害的干扰。分级频谱接入的共享模型也有以下两种：

（1）Overlay 频谱共享模型。在此模型下，感知用户需要知道授权用户的 on/off 工作状态，通过感知“频谱空洞”，检测出未被授权用户使用的频谱，如图 2-3 所示[2]。一旦发现“频谱空洞”，感知用户就可以接入该段频谱，文献[20-21]都是针对该模型下感知用户的传输性能进行研究的。

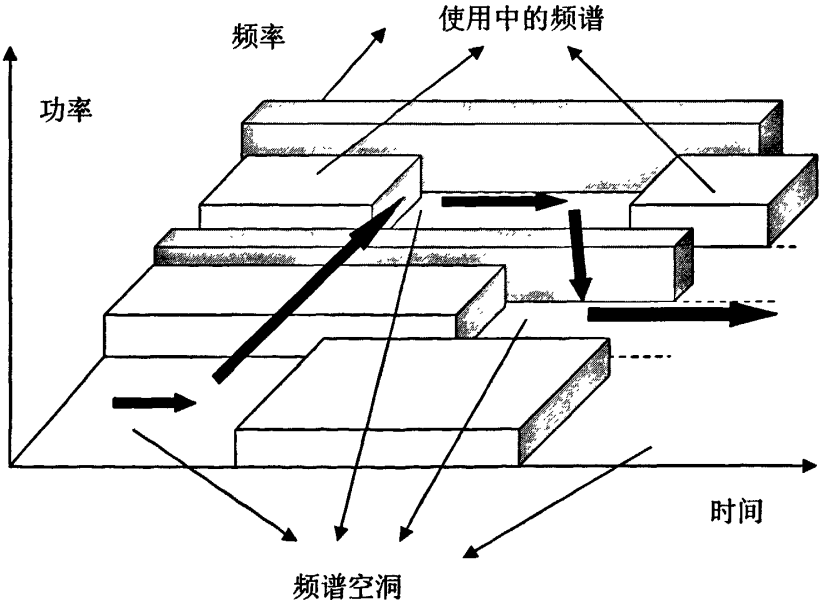

图 2-3　频谱空洞的概念

（2）Underlay 频谱共享模型。在此模型下，感知用户和授权用户可以共享授权频谱，只要感知用户对授权用户产生的干扰不超过授权用户能够承受的最大干扰的条件。文献[22-24]研究了该模型下感知用户的资源分配和功率分配方案。

在本文中，我们把授权用户能够承受的最大干扰称为干扰限，如果授权用户接收到的来自感知用户的干扰超过了此干扰限，那么就认为感知用户对授权用户产生了有害的干扰，感知用户就要再降低发射功率或者放弃使用该段频谱，使得授权用户的传输不受影响。

（三）信道状态估计：为了实现在感知无线电接收机处进行相关检测、预测计算其信道容量和用于控制发送端的信号功率的目标，必须进行信道估计。常见的信道估计方法有差分检测法和训练序列传输法两种。差分检测法实现简单，鲁棒性较强，所需信噪比代价高；训练序列传输法接收机性能好，但浪费传输能量和带宽。信道状态信息是随时间动态变化的，可利用状态空间模型进行表述。动态噪声和度量噪声的特征决定了所使用状态空间的模型。在高斯噪声环境下，可以使用高斯状态空间模型，利用传统的卡尔曼滤波器进行信道状态的跟踪；在非高斯噪声环境中，使用非高斯状态空间模型，利用粒子滤波器进行跟踪。

（四）功率控制：感知无线电接收机将得到的信道状态信息等参数反馈到发射机来，发射机根据这些参数通过相应的策略控制发射功率。与传统的无线网络的功率控制相同，都与接收机的信噪比、系统吞吐量、能量消耗和空间资源的复用效率有关，但是，感知无线电还更加需要关注的是感知用户的发射功率必须保证不对周围的授权用户造成有害的干扰以及多个感知用户共存时的公平性问题。特别在 Underlay 方式下，感知用户对授权用户所产生干扰的大小是一个比较重要的指标。因此，如何控制感知用户的发射功率，使得在感知用户对授权用户产生的干扰不超出干扰限制条件的同时有效进行数据传输，成为一个必须解决的问题。本文是针对 Underlay 频谱共享方式下的功率控制问题进行研究的。

2.2 协作通信技术

协作通信的基本思想可以追溯到上世纪六七十年代在信息论上对中继信道（Relay channel）的研究，Van-der Meulen 等人最早开始研究三终端中继信道的容量[25-26]，Cover 和 El Gamal 改进了 Van-der Meulen 发现的通用中继信道的容量界。经过上世纪八十年代的发展，解决了多输入多输出（MIMO）的信道容量问题[7-8]，发明了高质量的信道编码技术，依据这些成果，研究人员对中继信道有了更深的理解。MIMO 技术的思想就是通过在发送端和接收端同时设置多个天线

从而利用空间域资源，在不增加频率资源和发射功率的前提下，大大提高了系统的容量和可靠性。然而在实际的无线通信系统中，多天线都设置在基站端，移动终端则很难安装多天线。首先，由于由移动终端对质量和功耗的要求比基站高得多；其次，理想的多天线系统要求相邻天线之间的间距要远大于电波波长，并且多个收发天线之间的传输信道是独立的，而移动终端由于体积限制，根本无法做到这一点。因此，难以在移动终端实现上行的发送分集。考虑到现有的无线通信系统大多是由多用户组成的，A.Sendonaris、E.Erkip 和 J.N.Laneman[27]等人提出了一种新的空间分集技术——协作通信。其基本思想是：协作的移动台之间共享各自的天线，利用自己和其他移动台天线所构成的虚拟的多发送天线阵并通过分布式处理产生协作来获得一定的空间协作分集增益。如图 2-4 所示。

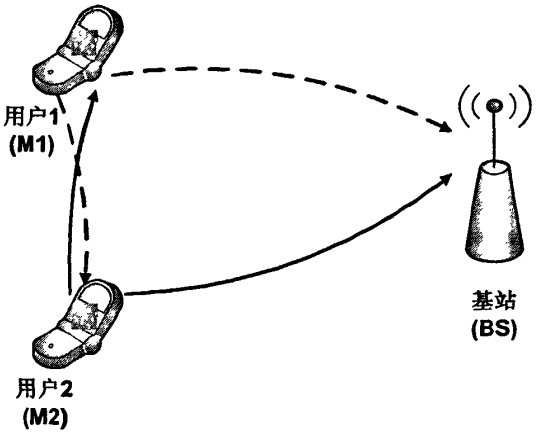

图 2-4　蜂窝网络环境下的两用户协作场景

以蜂窝通信两用户协作为例，来自同一个小区两个邻近的用户 U1 和 U2 互为协作传输的伙伴，每个用户的移动台都只配置一根天线，U1 作为源节点向基站(Base Station，BS)和 U2 传送自己的数据，还要作为中继节点把接收到的来自 U2 的数据发送给基站。同时，U2 也要把自己和来自 U1 的信息传送给基站。这样，用户 U1 与 BS 之间就产生两条独立衰落传输路径:一条是 U1 与 BS 之间的直接传输路径，另一条是 U1→U2→BS 的间接传输路径。从而在接收端合并两个经历独立衰落的信号样本，获得分集。

基于接收→处理→转发的三点模型是上述协作结构的简化，如图 2-5 所示。

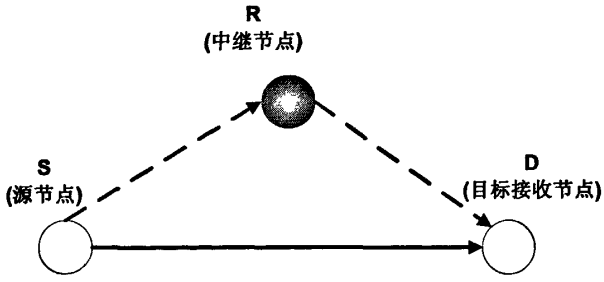

图 2-5　三点协作模型

2.3 感知协作网络

感知协作网络主要有感知协作检测网络和感知协作中继网络。

感知用户之间通过协作，能够有效地消除因衰落和多径引起的影响，增强感知用户检测授权用户的能力。其基本的思想是：感知用户首先进行分散检测，每个感知用户检测本身周围的授权用户的信号，得到本地的检测结果，再将此结果与协作的伙伴进行交流或者送到集中的检测结果控制点，然后依据所有协作伙伴的感知结果做出决策，判断授权用户是否存在。由于某一个感知用户的所处的信道质量可能较差，造成单独的感知结果可能不够准确，采用协同检测能够增强系统的鲁棒性，提高频谱检测的准确性，减少由于检测错误而导致对授权用户产生有害干扰。

协作传输也就是在感知无线网络中一个节点充当中继协助另一个节点传送信息到接收机。其中包括感知用户与授权用户间以及感知用户之间的协作传输。感知用户与授权用户间的协作能够提高授权用户的传输性能，减少授权用户占用频谱的时间从而为感知用户的传输提供更多的机会；而感知用户之间的协作是为了提高频谱使用效率和增加系统的传输性能[10]。由于中继重传了源节点发送的信号，在接收端获得了空间分集增益，相当于信道质量得到提升，使得接收信噪比上升，传输质量得到提高。所以，当网络中存在信噪比要求时，功率的消耗可以通过协作通信得到降低，获得能量效应[28]。也就是说在相同发射功率下通过协作通信能够获得更好的传输性能，反之，在相同的性能要求下，采用中继所需要的发射功率较小。特别是在 Underlay 频谱共享模型中，如果授权用户的干扰限很小，那么感知用户的发射功率将受到很大的限制，感知用户如果采用直接传输，其性能将会大大降低。如果将协作中继应用到感知无线电网络中，将会很好的解

决上述的干扰限问题，在达到授权用户的干扰限要求的条件下，提高感知用户的传输性能。感知用户之间的协作传输是本文的研究重点。

本章小结

本章首先介绍感知无线电的相关概念、基本原理和关键技术，包括频谱感知、频谱管理与共享、信道状态估计和功率控制，接着介绍了协作通信的基本技术原理，并对在授权用户检测和数据协作传输方面如何通过用户间的协作改进感知无线系统性能进行了讨论。

第 3 章　感知中继网络中继选择和功率分配策略

3.1 感知中继网络协作机制与系统模型

感知中继系统与传统无线协作中继系统类似，协作机制主要包括：

3.1.1 双工复用模式

从图 2-5 所示的三点协作模型可以看出，中继信道可以划分为两个信道：从源节点到中继节点和目标接收节点的广播子信道；从中继节点到目标接收节点的多址子信道。对于这两个子信道，存在着以下不同的双工模式。

全双工模式：中继同时接收和发送信号。在文献[29]，全双工的协同策略得到了研究，并且通过具体的系统应用验证了其显著的系统增益。但是由于全双工对于回声删除技术和发射接收电路的隔离要求的实现难度高，加上终端的硬件设备的限制，使得中继节点要在同一个频段上很难做到同时接收和发送信息，于是目前的研究大部分都倾向于半双工复用模式[30]。

半双工模式：为了区分发送和接收信息，要求在中继节点处的接收和发送信道实现完全的正交，这种正交性可以表现在时域上、频域上或者时频域上。目前来看，出于简单和容易实现，一般采用采用时分双工模式。因此，本文也采用时分双工模式。时分双工中继模型可以描述如下：将单位传输时间划分为前后两个时隙，前一个时隙供中继节点接收信息，后一个时隙供中继节点发送数据。这两个时隙长度可以相同也可以不同，依据实际情况进行设计。

3.1.2 中继传输协议

对于时分双工模式的中继，存在着 4 种不同的中继传输协议[30]：

（1）第一个时隙：S→（R, D）；第二个时隙：（S, R）→D。

（2）第一个时隙：S→（R, D）；第二个时隙：R→D。

（3）第一个时隙：S→R；第二个时隙：（S, R）→D。

（4）第一个时隙：S→R；第二个时隙：R→D。

在第（1）种中继中继传输协议中，在第一个时隙中源节点向中继节点与目

标接收节点广播数据信息，同时中继节点接收信息并对信息进行处理，准备转发；在第二个时隙中源节点与中继节点同时向目标接收节点发送数据信息，目标接收节点将接收到的信号先进行合适的信号合并，然后对信息进行解码[30]。其工作方法如图 3-1 所示：

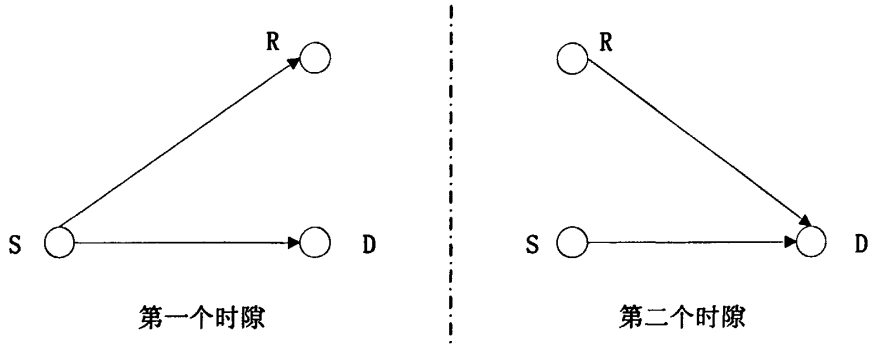

图 3-1 S→（R, D），（S, R）→D 半双工中继传输协议

在第（2）种中继传输协议中，在第一个时隙中源节点向中继节点与目标接收节点广播数据信息，同时中继节点接收信息并对信息进行处理，准备转发；在第二个时隙只有中继节点向目标接收节点发送数据信息，源节点不发送信息，目标接收节点接收信号，然后与之前收到的源节点广播的信息进行合适的信号合并，再对信息进行解码[30]。其工作方法如图 3-2 所示：

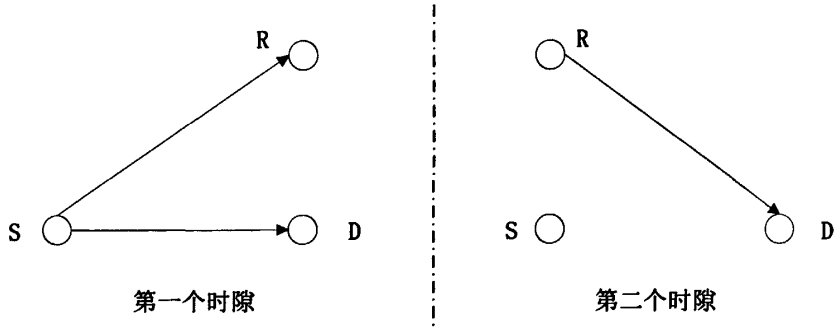

图 3-2 S→（R, D），R→D 半双工中继传输协议

在第（3）种中继传输协议中，在第一个时隙中源节点仅向中继节点发送数据信息，同时中继节点接收信息并对信息进行处理，准备转发；在第二个时隙中源节点与中继节点同时向目标接收节点发送数据信息，目标接收节点将接收到的信号进行合适的信号合并，然后对信息进行解码[30]。其工作方法如图 3-3 所示：

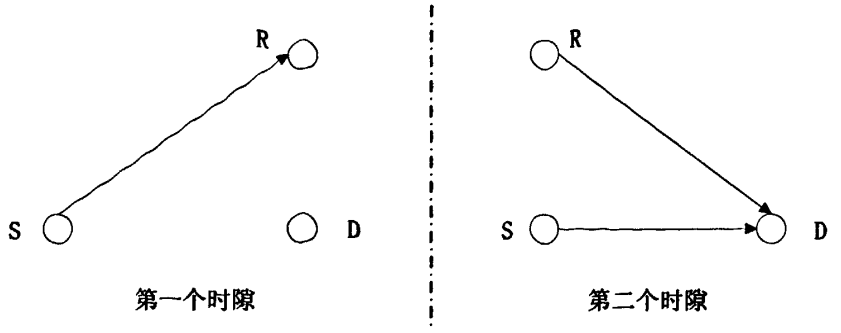

图 3-3　S→R，（S, R）→D 半双工中继传输协议

在第（4）种中继传输协议中，在第一个时隙中源节点仅向中继节点发送数据信息，此时中继节点对接收到的数据进行处理，准备转发；在第二个时隙只有中继节点向目标接收节点发送数据信息，源节点不发送信息，目标接收节点接收信号并解码[30]。其工作方法如图 3-4 所示：

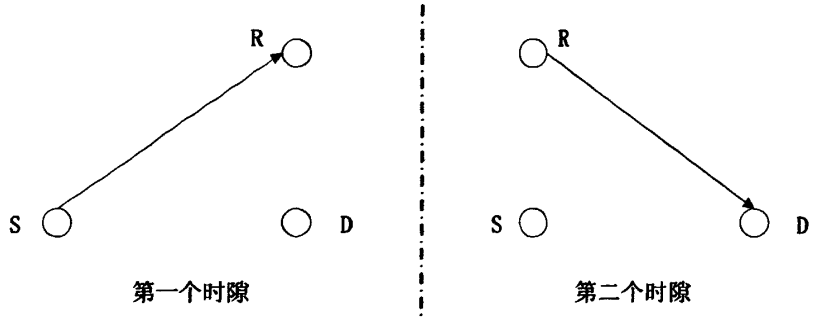

图 3-4　S→R，S→D 半双工中继传输协议

目前，由于第一种中继传输协议实现起来较为简单容易，并且能够获得较高的增益，在无线通信系统中得到了广泛的应用[30]，本文也将采用此种中继传输协议。

3.1.3 中继策略

在协作通信中，合作伙伴如何具体帮助源节点向目标接收节点的通信，特别是中继对信号的处理和转发方式是人们颇为关心的问题，即中继策略。一般来说，协作中继采用的中继策略主要有两种：解码转发中继（Decode-Forward，DF）和观测转发（Observe-Forward，OF）。在解码转发中继中，中继节点会对接收到的来自源节点的信号进行解码，恢复原信号，再进行编码，然后将信号发送给目标接收节点。在观测转发中继中，中继节点不会对接收到的信号进行解码，而是进

行简单的信号级变换（如放大），之后直接将处理过后的信号发送给目标接收节点。而在观测转发中继中最常使用的就是放大转发中继（Amplify-Forward，AF），也就是中继节点对接收到的信号只进行简单的放大转发，而不再进行解码和编码。本文采用的中继策略也为放大转发和解码转发，两种中继策略的技术原理如下所述。

（1）放大转发（AF）

如图 3-5 所示，在 AF 策略中，中继节点在第一个时隙接收到已被噪声污染的来自源节点的信号，但是中继节点仅仅对该信号进行适当的放大；在第二个时隙中中继节点将放大后的信号发送给目标接收节点，目标接收节点则以一定的准则合并来自源节点和中继节点所发送的信息，然后进行解码。尽管在中继放大过程中，噪声随着信号也被放大并转发，但由于基站接收到两个独立衰落的信号，因此可以作出更好的判决和检测[31]。

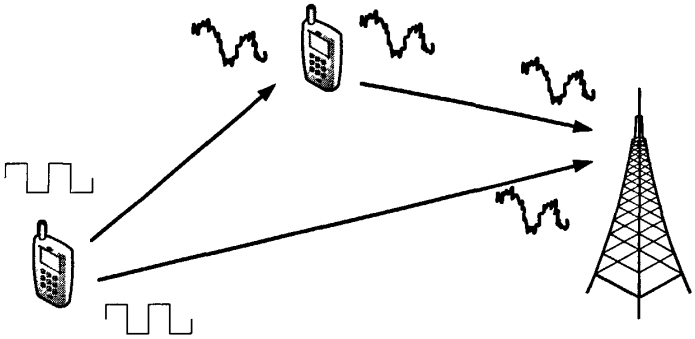

图 3-5　放大转发（AF）

（2）解码转发（DF）

如图 3-6 所示，在 DF 策略中，中继节点在第一个时隙接收到源节点所发射信号后，对接收到的信号进行解码，然后又重新进行编码；在第二个时隙中中继节点将重新编码的信号发送给目标接收节点，目标接收节点则以一定的准则合并来自源节点和中继节点所发送的信息，然后进行解码。这种协作方式虽然比较简单，但是前提条件是中继接收到源节点的信息后，能够准确的进行解码。当源节点与中继节点之间的信道质量较差时，中继节点可能会对来自源节点的信息做出错误判决，导致传输性能的下降[31]。

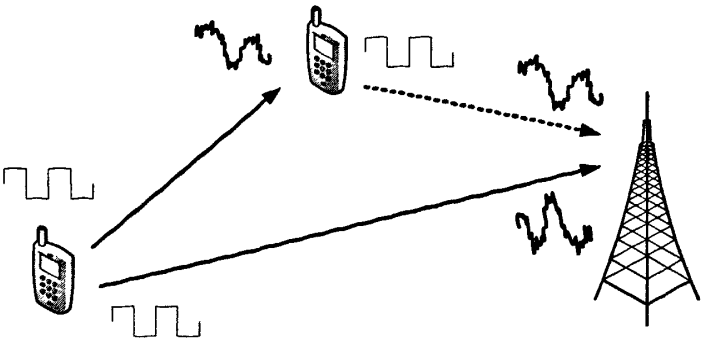

图 3-6　解码转发（DF）

3.1.4 接收信号合并方式

合并是分集的后续工作。分集使得目标接收节点获得 $M(M \geq 2)$ 的经历独立衰落的信号样本，合并为目标接收节点提供了如何将获得的多路信息进行处理，以减少衰落的影响。合并器的工作原理如图 3-7 所示[32]：

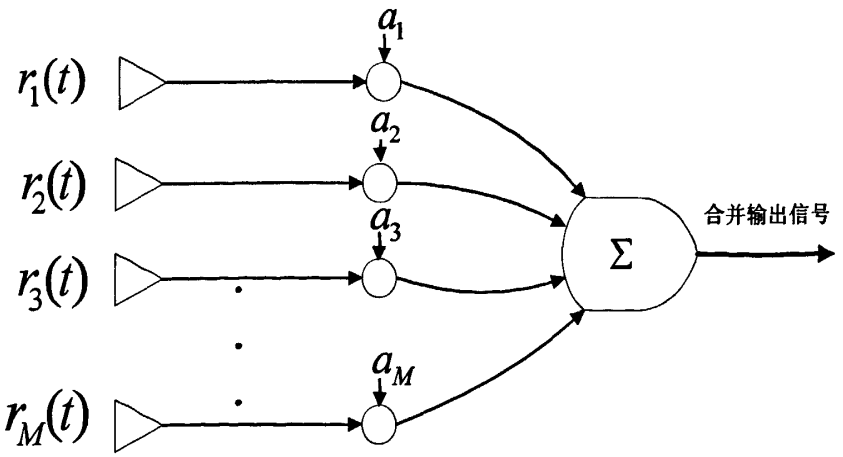

图 3-7　多路接收信号合并器

通常的方法是使用线性合并器，就是将得到的 M 路电压信号 $r_1(t)$，$r_1(t)$,...，$r_{M-1}(t)$，$r_M(t)$ 乘以加权系数后相加，合并表达式为：

$$r(t)=\sum_{k=1}^{M} a_k r_k(t)\,, \quad k=1,2,\ldots,M \tag{3-1}$$

其中，a_k 为第 k 个信号的加权系数，使用不同的加权系数就得到不同的合并方式。

目前主要的合并方式有以下三种[32]：

（1）选择合并

选择合并是一种较为简单的合并方式。从 M 路信号中，选出信噪比最大的信号作为输出信号，也就是在公式（3-1）中，只有信噪比最大的那一路信号的加权系数为 1，其他支路的加权系数均为 0。然而在实际系统中，由于估计各支路的信噪比非常困难，所以经常选用信号和噪声平均功率和最大的那一路信号来代替信噪比最大进行分支选择。

在选择合并基础上进行改进，出现了切换合并的方式[32]，它不是总采用 M 个支路中信噪比最好的支路，而是在选择器上设置一个信噪比的阈值，然后以一个固定的顺序扫描所有支路的信号，当发现某一支路的信噪比超过所设定的阈值，就选择该支路作为输出信号，直到此支路的信噪比降低到阈值之下，才又开始重新扫描，然后进行选择适合标准的支路信号作为输出。

（2）最大比合并

在信号合并之前，先对 M 路信号进行加权，如果加权系数正比于各支路的信噪比，即

$$a_k = \frac{r_k}{N_k} \tag{3-2}$$

合并后得到的输出信号的信噪比等于各支路的信噪比之和。在已有的线性分集合并方法中，最大比合并的抗衰落统计特性最好[32]。因此，本文也将采用此种合并方式。

（3）等增益比合并

在该合并方式中，将 M 信号以相同的支路增益进行直接相加，也即是在公式（3-1）中所有 a_k 都为 1。等增益比合并是一种比最大比合并性能略差但是较为简单的合并方法[32]。

3.1.5 感知中继网络系统模型

如前所述，本文的研究重点是感知用户的协作传输，系统模型与文献[33]相同。在该模型中，授权用户与感知用户共存——包含了授权用户的一个发射-接收对以及感知用户的源节点、中继节点和目标接收节点。如图 3-8 所示：

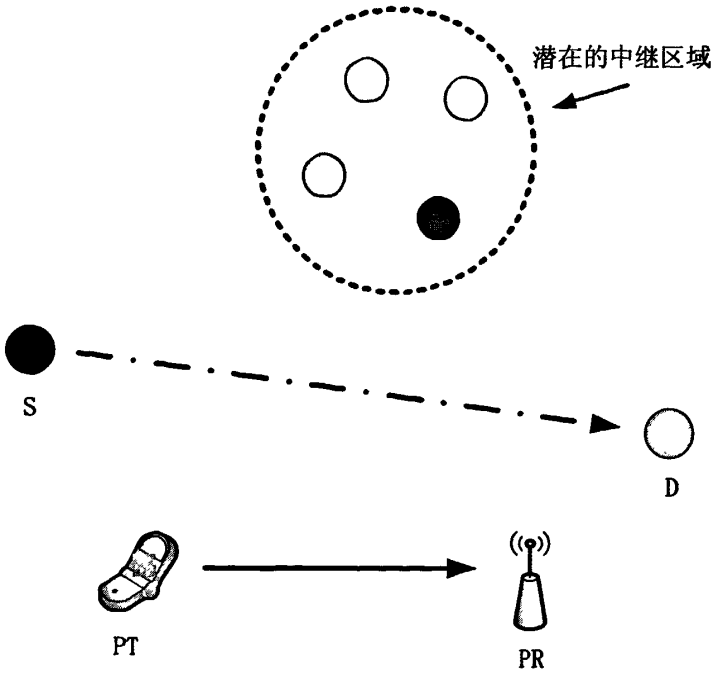

图 3-8　系统模型

在图 3-8 中，PT、PR 分别表示授权用户的发射和接收终端，S 与 D 分别表示感知用户的源节点与目标接收节点，潜在中继区域表示可能成为感知用户的协作中继节点的集合，该集合里面随机分布了 M 个处于活动的感知用户，随时可以作为中继节点协助源节点进行传输。在此系统中，授权用户网络与感知用户网络频谱共享方式采用的是 Underlay 频谱共享模型，也就是授权用户发射终端通过预设的功率与接收终端进行通信，同时感知用户也是利用该段频谱进行传输，但是感知用户的对授权用户的干扰不能超出授权用户的干扰限。感知用户只能使用有限的功率进行传输，因此导致感知用户的传输效率较低，性能较差，为了提高感知用户系统的性能，引入了协作中继，以此来提高感知用户的传输性能。那么，如何从众多可用的中继用户中选取合适中继节点和控制源节点与中继节点的发射功率使得在符合干扰限的前提条件下更好的提高感知用户的系统性能是一个非常关键的问题，也即是本文所研究的中继选择和功率分配策略的问题。

3.2 中继选择和功率分配策略研究

3.2.1 协作功率分配

协作中继系统的无线资源优化分配能有效提高系统的整体性能，具有实际的应用意义[34]，无线资源涉及频率、功率、时间等，目前研究主要集中在功率分配方面。文献[35]和文献[36]对高斯并行网络中功率分配问题进行了研究，考虑了 AF 和 DF 两种中继策略，以及共享信道和正交信道的情况。随着研究的进一步深入，目前常见的功率分配方法包括以最大化容量[37]、最小化发射功率[38]、最小化中断率[39-40]等为目标的功率分配方案。

从第二章中我们得知，功率控制也是感知无线协作网络中的一个关键技术，是感知无线电研究领域的热点问题。作为一个干扰受限的系统，感知无线电系统不能对授权用户产生有害的干扰，功率控制便是实现对授权用户保护的一种有效手段。目前关于感知无线电网络中的功率控制算法的研究很多是基于 Underlay 频谱共享模型。这是因为这一模型不仅能提高频谱的利用率，同时也体现了感知无线电系统中的功率控制的特点，而且只需对参数的设置进行简单的改变，适用于Underlay 频谱共享模型下的功率控制算法也可以应用到Overlay 频谱共享模型中。比如，若取消了授权用户的干扰限的条件，适用于 Underlay 频谱共享模型下的功率控制算法便能应用在 Overlay 频谱共享模型中。本文针对于 Underlay 频谱共享模型下感知用户协作网络的发射功率控制进行研究。

3.2.2 中继选择策略

协作中继使得特定区域内只有单个天线的用户通过彼此之间的协作形成一个虚拟的天线阵，从而达到了协作分集的效果。与传统的单节点直接传输相比，由于中继节点的加入，移动台可以选择不同的中继节点来进行数据的转发，协作伙伴选择是影响协作增益的重要因素，选择好的协作伙伴节点能进一步提高协作增益[41]。因此，在感知无线协作网络中，如何进行协同中继节点选择是一个首要解决的问题。

对于一条协作链路，协作伙伴的选择问题是从众多的潜在中继节点中，选出能带来最大增益的节点。而对于存在多个协作中继节点的无线网络，参与协作节

点数的增加可以提高系统的性能，但是随着中继节点数目的增加，带来的性能增益增加缓慢，甚至有的增益可能出现开始下降，而节点间协调、信号检测、同步以及多址问题等的复杂度随着中继节点的增加而快速增加，网络成本会相应地提高。因此，目前针对协作伙伴选择的研究趋向于在多个候选节点中，根据一定的优化目标选择一个最佳的作为协作节点[42-43]。因此，本文的研究对象将是选择单个中继进行协作传输。

3.2.3 最小化发射功率中继选择和功率分配策略

在感知无线电中继网络以往的中继选择和功率分配算法中，如最大化目标接收节点的信噪比[44]、最大化传输速率[33]，尽管已经保证了感知用户对授权用户的干扰不会大于授权用户能够接受的最大干扰门限，但是依然未能满足授权用户希望感知用户对自己的干扰尽量小的要求，并且由于信号检测的不准确性以及感知无线电用户在突发情况(比如信道质量变化、授权用户的传输参数变化)下可能切换信道等因素，使得感知用户对授权用户的影响具有不稳定性，所以感知无线电用户应该尽可能地降低发射功率，尽量减少对授权用户的影响[45]；而且在最大化传输速率的中继选择和功率分配方案中未能满足感知用户的 QoS 的要求；在文献[46]采用几何编程的方法解决了 AF 感知中继网络中功率分配问题，在保证感知用户 QoS 的要求下，最小化系统总功率，从而减少对授权用户的干扰；但是该文献并未导出功率分配的闭式解，而且和文献[44]一样也没有考虑中继选择的问题，未能充分利用协作中继的用户分集增益。

为了解决上述问题，本文采用最小化发射功率中继选择和功率分配策略——在同时能够满足授权用户的干扰限和感知用户的信噪比（SNR）的要求下，利用最小化发射功率分配策略得到各个可用中继节点的功率分配方案，然后从所有节点中选择所需发射功率最小的节点作为中继节点，协作源节点进行传输。这样选择中继和进行功率分配的意义在于：

（1）本算法是在保证了授权用户不受到来自感知用户的有害干扰以及满足感知用户传输的信噪比（SNR）要求的条件下来进行中继选择和功率分配的；从而导出源节点和中继节点的发射功率数学表达式。SNR 要求是最基本的 QoS 要求，这也是设计功率控制算法时必须达到的首要条件，具有实际意义。

（2）在现实的无线环境中，除了授权用户以及感知用户的网络以外，还存在许多其他的网络，最小化发射功率有利于减小整个感知网络对于周围其他网络的干扰。

（3）最后由于在感知无线电的网络中，大部分的设备都是无线移动的，只能是依靠电池进行供电，所以如何延长电池的使用时间非常重要。最小化发射功率能够在满足感知用户的 QoS 要求的同时有效提高能量的效率，减少能量开支，从而延长发射端电池的使用时间[45]。

3.3 基于两种不同信道状态信息下中继选择方法

由于在进行中继选择之前，需要获得各个节点之间的信道状态信息，根据接收端反馈回来的信道状态信息的类型，可分为信道平均信噪比和瞬时的信道状态信息两种，所以相应的中继选择方法也有以下两种。

3.3.1 基于平均信噪比中继选择方法

基于平均信噪比的中继选择方法是指：系统根据源节点分别到中继节点和目标接收节点以及中继节点到目标接收节点各条路径的平均信噪比（SNR）来选择哪些用户作为参与到协作传输中来的中继节点。由于路径平均信噪比在实际系统中决定于节点之间的位置和距离，这种中继选择算法实际是基于系统的各个节点的位置分布情况来选择中继的。该方法信息反馈量较小，而且当各个节点的位置没有发生大的变化时，反馈的信息基本不变。所以适合各个节点位置相对固定和信道状态变化较缓慢的情况。

3.3.2 基于瞬时信道信息的中继选择方法

由于在快速移动无线环境中，大部分的用户所处的位置变化较快，信道状态变化也相应加快；或者是信道中间的物体移动时，也会导致信道特性的变化，所以无线的信道的时变性很强。基于平均信噪比的中继选择方法难以反映出信道的这种时变特性，在应用中受到诸多的限制，因此提出了基于瞬时信道信息的选择算法。在基于瞬时信道信息的选择算法中，需要反馈的信息量较大，而且在每一次中继选择之前都需要接收端反馈一次信道状态信息，实现较为复杂。后续第四

章的性能仿真中，将采用瑞利（Rayleigh）信道作为实时信道模型。

本章小结

本章首先介绍感知中继网络的协作机制，给出了感知中继网络的系统模型，提出了感知中继网络中中继选择和功率控制的问题。针对以往感知中继网络中的中继选择和功率控制策略未能满足感知用户的 QoS 要求和授权用户希望感知用户对自己的干扰尽量小的要求的问题，将最小化发射功率的中继选择和功率分配算法应用到感知中继网络中，在同时能够满足授权用户的干扰限和感知用户的信噪比（SNR）的要求下，利用最小化发射功率分配策略得到各个可用中继节点的功率分配方案，然后从所有节点中选择所需发射功率最小的节点作为中继节点，这不仅满足了感知用户的 QoS 要求，也能在有效的保证授权用户不受到来自感知用户的有害干扰的条件下进一步地减少对授权用户的干扰，还能节省能量的开销，提高能量的效率，从而有效地延长感知无线终端电池的使用时间。

第 4 章　最小化发射功率中继选择和功率分配策略在 AF 与 DF 感知中继系统中的应用

基于以上所述最小化发射功率中继选择和功率策略的基本原理，本章将在放大转发（AF）和解码转发（DF）感知中继系统下进行数学建模和系统的仿真，并对该算法在此两种中继系统中的性能进行比较。

4.1 在 AF 感知中继系统中的应用

4.1.1 数学模型和理论推导

在放大转发（AF）中继系统中，中继节点接收到来自中继节点的信息后仅进行适当的放大后转发，目标接收节点将接收到的来自源节点与中继节点的信息进行合并。于是有：

中继节点接收来自源节点和授权用户的信号：

$$z_{sp} = \sqrt{P_s} g_{sr} x_s + \sqrt{P_p} g_{pr} x_p + n_{sr} \tag{4-1}$$

目标接收节点接收来自源节点和授权用户的信号：

$$y_{sp} = \sqrt{P_s} g_{sd} x_s + \sqrt{P_p} g_{pd} x_p + n_{sd} \tag{4-2}$$

目标接收节点接收来自中继节点和授权用户的信号：

$$y_{rp} = g_{rd} x_k + \sqrt{P_p} g_{pd} x_p + n_{rd} \tag{4-3}$$

其中，P_s，P_p 分别表示源节点和授权用户的发射功率；x_s，x_k，x_p 分别表示源节点、中继节点和授权用户发射端的发射信号；g_{sr}，g_{sd}，g_{pr}，g_{rd} 和 g_{pd} 分别表示源节点到中继节点，源节点到目标接收节点，授权用户发射端到中继节点，中继节点到目标接收节点，授权用户发射端到目标接收节点之间的信道增益；n_{sr}，n_{sd}，n_{rd} 均为加性高斯白噪声，其功率均为 N。

因为感知用户拥有频谱感知的能力，可以获得授权用户信号的先验信息，所以可以采用 DPC（Dirty Paper Coding）编码[47-48]，消除授权用户对感知用户的干扰。因此，

$$x_k=\sqrt{\frac{P_r}{P_s|g_{sr}|^2+N}}(\sqrt{P_s}g_{sr}x_s+n_{sr}) \tag{4-4}$$

$$y_{rd}=\sqrt{\frac{P_sP_r}{P_s|g_{sr}|^2+N}}g_{sr}g_{rd}x_s+\sqrt{\frac{P_r}{P_s|g_{sr}|^2+N}}n_{sr}+n_{rd} \tag{4-5}$$

其中，P_r表示中继节点的发射功率。

目标接收节点采用最大比合并方法对接收到得两路信号进行合并，得到输出的信噪比为：

$$SNR=\frac{P_s|g_{sd}|^2}{N}+\frac{P_s|g_{sr}|^2P_r|g_{rd}|^2}{N(P_s|g_{sr}|^2+P_r|g_{rd}|^2+N)} \tag{4-6}$$

假设潜在中继区域中有M个可选中继用户，采用最小化中继选择和功率分配策略从中选出最优的中继节点m需要两个步骤，分别是：

步骤一：首先计算各个可用中继节点的最小化发射功率的功率分配方案。对于第i $(i=1,2,...,M)$个中继节点，其最小化发射功率的功率分配数学模型为：

$$\begin{aligned}&\gamma=\min_{(P_s(i),P_r(i))}(P_s(i)+P_r(i))\\&s.t\begin{cases}C1:\ P_s(i)|g_{sp}|^2\le I_p\\C2:\ P_r(i)|g_{rp}(i)|^2\le I_p\\C3:\ P_s(i),P_r(i)\ge 0\\C4:\ \dfrac{P_s(i)|g_{sd}|^2}{N}+\dfrac{P_s(i)|g_{sr}(i)|^2P_r(i)|g_{rd}(i)|^2}{N(P_s(i)|g_{sr}(i)|^2+P_r(i)|g_{rd}(i)|^2+N)}\ge SNR_{th}\end{cases}\end{aligned} \tag{4-7}$$

其中，约束条件$C1$、$C2$表示感知用户不能对授权用户产生有害的干扰，也即是在授权用户接收端接收到的来自感知用户源节点和中继节点的信号强度不能超过授权用户的干扰限；$C3$表示感知用户的源节点和中继节点的发射功率不能小于零；$C4$表示目标接收节点的输出信噪比要达到感知用户的信噪比要求（SNR_{th}），也即是在目标接收节点的接收信噪比SNR要不小于SNR_{th}。

上述的最优化问题是一个凸优化问题，采用拉格朗日乘子法对该问题进行求解[49]，解得：

$$(P_s^{opt}(i),P_s^{opt}(i))=\begin{cases}(P_S^{*}(i),P_r^{*}(i)), & if\ 0<P_S^{*}(i)\le P_S^{\max}(i)\ and\ \ 0<P_r^{*}(i)\le P_r^{\max}(i)\\(P_S^{\max}(i),P_r^{''}(i)), & if\ P_S^{*}(i)>P_S^{\max}(i)\quad and\ 0<P_r^{''}(i)\le P_r^{\max}(i)\\(P_S^{''}(i),P_r^{\max}(i)), & if\ 0<P_S^{''}(i)\le P_S^{\max}(i)\ and\ P_r^{*}(i)>P_r^{\max}(i)\\\text{无解} & else\end{cases}$$

其中，

$$P_s^{*}(i)=\frac{N|g_{sd}|^2 SNR_{th}+N\sqrt{2|g_{rd}(i)|^4 SNR_{th}{}^2-|g_{sr}(i)g_{rd}(i)|^2 SNR_{th}(SNR_{th}-1)}}{|g_{sr}(i)g_{rd}(i)|^2}$$

$$P_r^{*}(i)=\frac{(|g_{sr}(i)|^2 P_s^{*}(i)+N)(SNR_{th}N-|g_{sd}(i)|^2 P_s^{*}(i))}{|g_{sr}(i)g_{rd}(i)|^2 P_s^{*}(i)+|g_{sd}(i)g_{rd}(i)|^2 P_s^{*}(i)-NSNR_{th}}$$

$$P_s^{\max}(i)=\frac{I_p}{|g_{sp}|^2};\qquad P_s^{*}(i)=\frac{T+\sqrt{(T)^2-4N|g_{sd}g_{sr}|^2 SNR_{th}(P_r^{\max}|g_{rd}(i)|^2+N)}}{P_r^{\max}|g_{sr}(i)|^2|g_{rd}(i)|^2-N|g_{sr}(i)|^2 SNR_{th}}$$

$$P_r^{\max}(i)=\frac{I_p}{|g_{rp}(i)|^2};\qquad P_r^{*}(i)=\frac{(|g_{sr}(i)|^2 P_s^{\max}(i)+N)(SNR_{th}N-|g_{sd}(i)|^2 P_s^{\max})}{|g_{sr}(i)g_{rd}(i)|^2 P_s^{\max}(i)+|g_{sd}g_{rd}(i)|^2 P_s^{\max}(i)-NSNR_{th}}$$

$$T=N*SNR_{th}|g_{sr}(i)|^2-(|g_{sd}(i)g_{rd}(i)|^2 P_r^{\max}(i)+|g_{sr}(i)g_{rd}(i)|^2 P_r^{\max}(i)+N|g_{sd}|^2)$$

步骤二：从 M 个可选中继节点中选择所需功率最小的节点作为中继节点，其数学模型为：

$$P_m=\min_{(m\in M)}\ (P_s^{opt}(i)+P_r^{opt}(i));\qquad i=1,2,...,M \tag{4-8}$$

根据步骤一得到的最小化发射功率分配方案，遍历所有可用中继节点，选出所需发射功率最小的节点作为中继节点协作源节点进行传输。

4.1.2 性能仿真

采用与文献[33]相似的仿真场景，感知用户网络与授权用户网络共存。在该场景下，存在着一个授权用户的发射-接收对、感知用户发射-接收对和有 M 个可选感知中继用户。

（1）比较分析采用直接传输、中继协作传输在平均功率分配（源节点和中继节点采用相同的功率）和最小化发射功率分配两种功率分配算法的性能，使可选中继用户 $M=1$，仿真模型如图 4-1 所示：

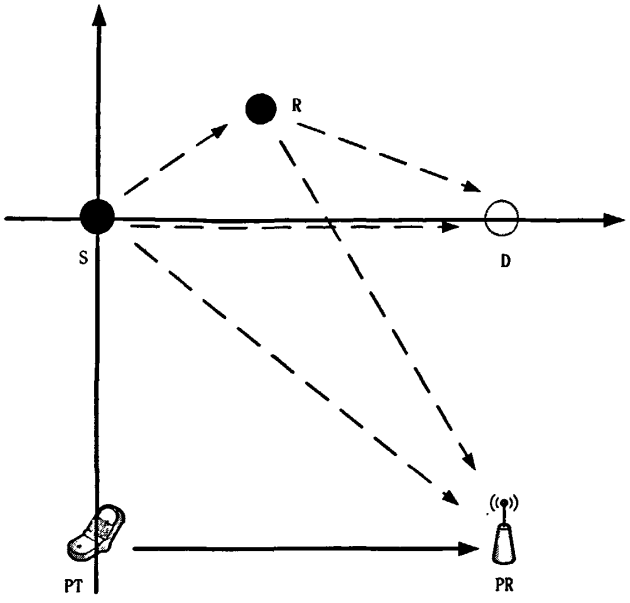

图 4-1　单个中继的仿真模型

感知用户源节点 S 位于（0，0），目标接收节点 D 位于（80，0）上；

有一个中继节点 R 位于（35，20）的位置上；

授权用户的发射终端 PT 位于（0，-80），接收终端 PR 位于（-80，-80）上；

在仿真中采用归一化的距离，将感知用户源节点与目标接收节点的距离归一化为 1；

依据文献[50]，对于市区蜂窝场景，取路径损耗因子$\alpha = 3$；

感知用户的信噪比SNR_{th}从$4dB$变化到$20dB$；

授权用户的干扰限为$I_p = 1dB$；

加性高斯白噪声功率$N = 1$。

基于平均信噪比和瞬时信道信息的仿真结果如图 4-2 和 4-3 所示，图中虚线部分表示在该方式下由于授权用户干扰限的限制，使得发射功率受到约束而不能达到的信噪比要求。

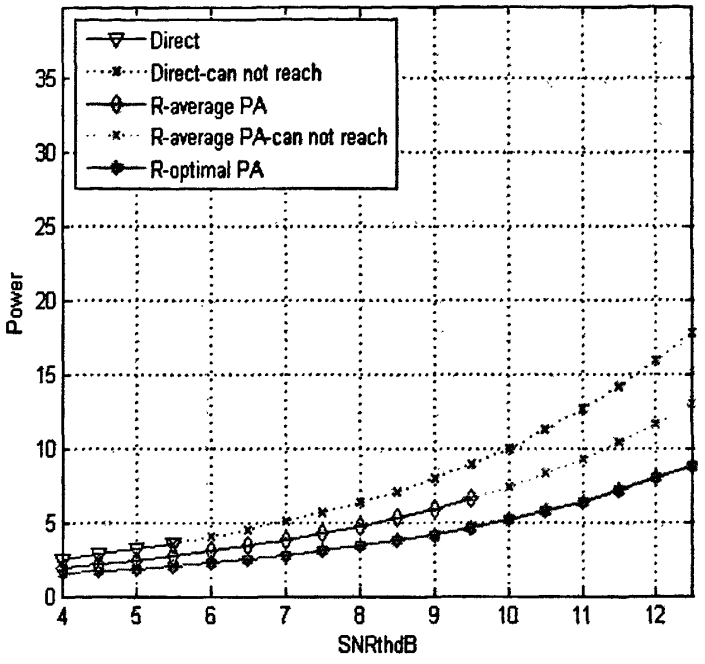

图 4-2　基于平均信噪比的仿真结果

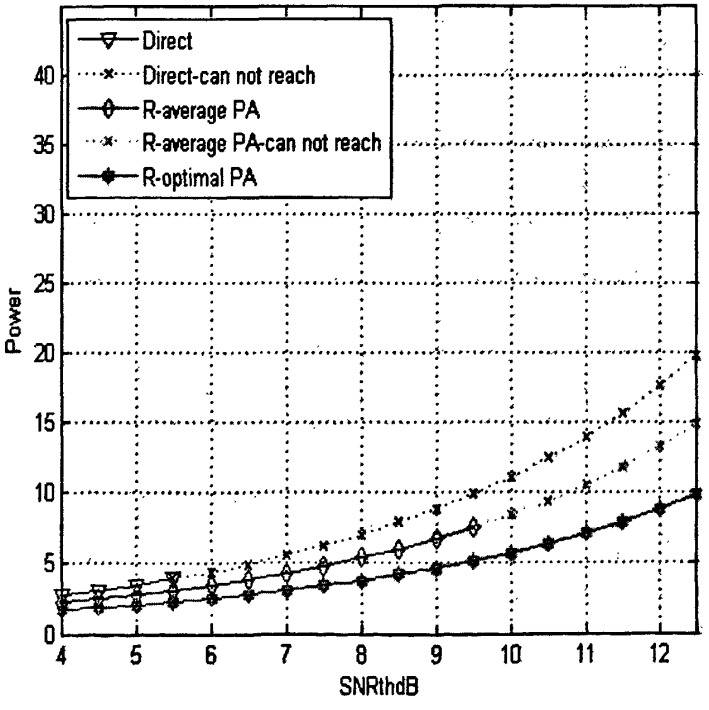

图 4-3　基于瞬时信道信息仿真结果

从图 4-2 和图 4-3 可以看出，随着信噪比要求的增加，所需的发射功率也不断的提高。在加入协作中继的情形下，利用中继的协作分集作用，无论在采用平均的功率分配算法还是采用最小化发射功率分配算法，都能够以更小的发射功率达到相同的信噪比要求。在达到相同信噪比要求下，无论是基于平均信噪比还是基于瞬时信道信息方法，采用最小化发射功率算法可以比直接传输节省最大达到 1 倍、比平均分配功率减少最大达 40%的总发射功率，并且在直接传输中，由于授权用户的干扰限较小，为了不对授权用户产生有害的干扰，发射功率不能过大，所以能达到的最大信噪比要求较小，采用中继的平均功率分配算法能够在相同的干扰限下达到的信噪比要求比直接传输提高接近 1 倍，而采用最小化发射功率能够获得接近直接传输 2.5 倍的信噪比要求。

（2）比较分析采用直接传输与采用中继协作传输在最小化发射功率分配算法下随机选择中继和最小化发射功率选择中继两种中继选择策略下的性能，使可选中继用户 $M=5$，仿真模型如图 4-4 所示：

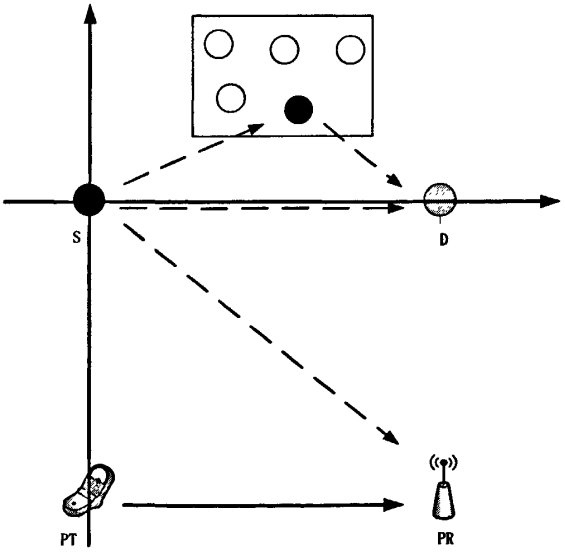

图 4-4　单个中继的仿真模型

有 5 个可用的中继用户，随机分布于（35，15）、（35，25）、（45，15）和（45，25）矩形区域内；

其他参数与图 4-1 仿真模型的参数相同；

在仿真中采用归一化的距离，将感知用户源节点与目标接收节点的距离归一

化为 1。

基于平均信噪比和瞬时信道信息的仿真结果如图 4-5 和 4-6 所示，图中虚线部分表示在该方式下由于授权用户干扰限的限制，使得发射功率受到约束而不能达到的信噪比要求。

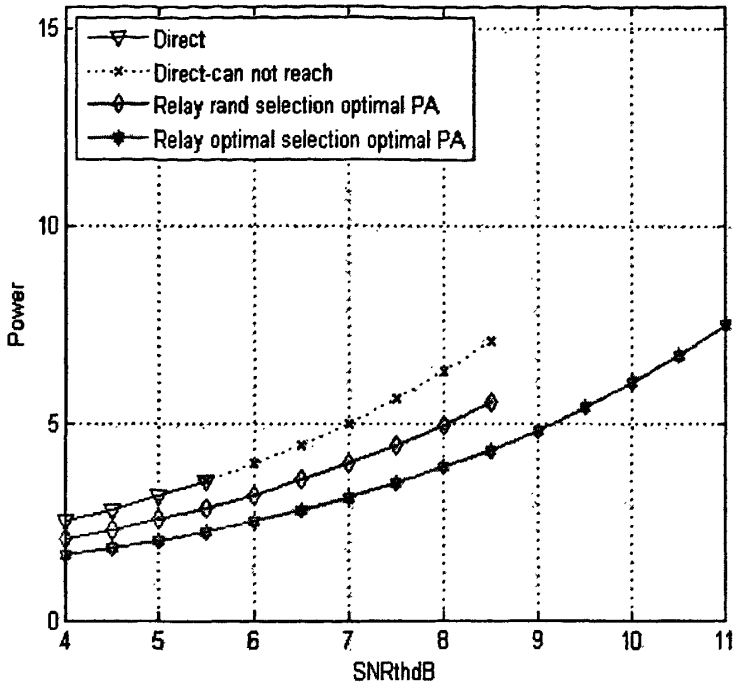

图 4-5　基于平均信噪比的仿真结果

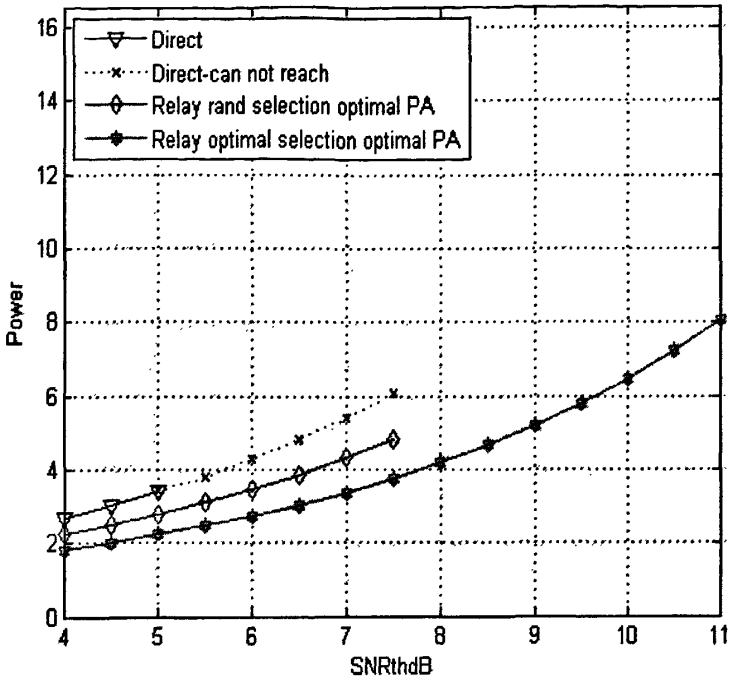

图 4-6　基于瞬时信道信息仿真结果

从图 4-5 和 4-6 中可以看到，在最小化发射功率分配算法下，采用最小化发射功率中继选择策略和随机选择中继策略都能够以比直接传输少的发射功率获得相同的信噪比要求。在达到相同信噪比要求下，无论是基于平均信噪比还是基于瞬时信道信息方法，采用最小化发射功率中继选择策略最大可以比直接传输节省多于 30%和比随机选择中继策略节省多于 20%的总发射功率，并且在直接传输中，达到的最大信噪比要求较小，而采用中继的随机选择策略能够在相同的干扰限下达到的信噪比要求比直接传输增加接近 80%，而采用最小化发射功率中继选择策略能够达到的信噪比要求比采用随机选择的方式增加接近 40%。

（3）比较分析采用中继协作传输在不同的可用中继用户密度下采用最小化发射功率中继选择和功率分配的性能，使可选中继用户 $M=5$ 和 $M=50$ 两种不同的用户密度，仿真模型如图 4-7 所示：

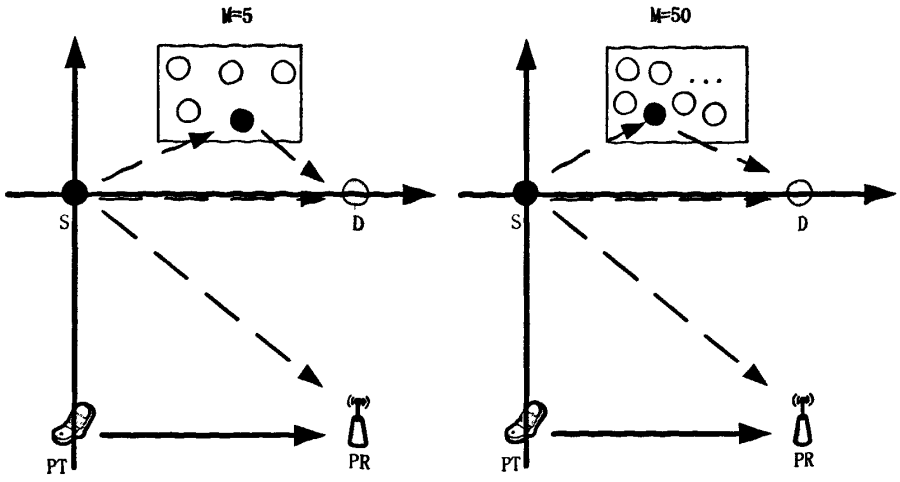

图 4-7　单个中继的仿真模型

在第一种情形中有 5 个可用的中继用户，随机分布于（35，15）、（35，25）、（45，15）和（45，25）矩形区域内；

在第二种情形中有 50 个可用的中继用户，也是随机分布于该矩形中；

其他参数与图 4-1 仿真模型的参数相同；

在仿真中采用归一化的距离，将感知用户源节点与目标接收节点的距离归一化为 1。

基于平均信噪比和瞬时信道信息的仿真结果如图 4-8 和 4-9 所示，图中虚线部分表示在该方式下由于授权用户干扰限的约束，使得发射功率受到约束而不能达到的信噪比要求。

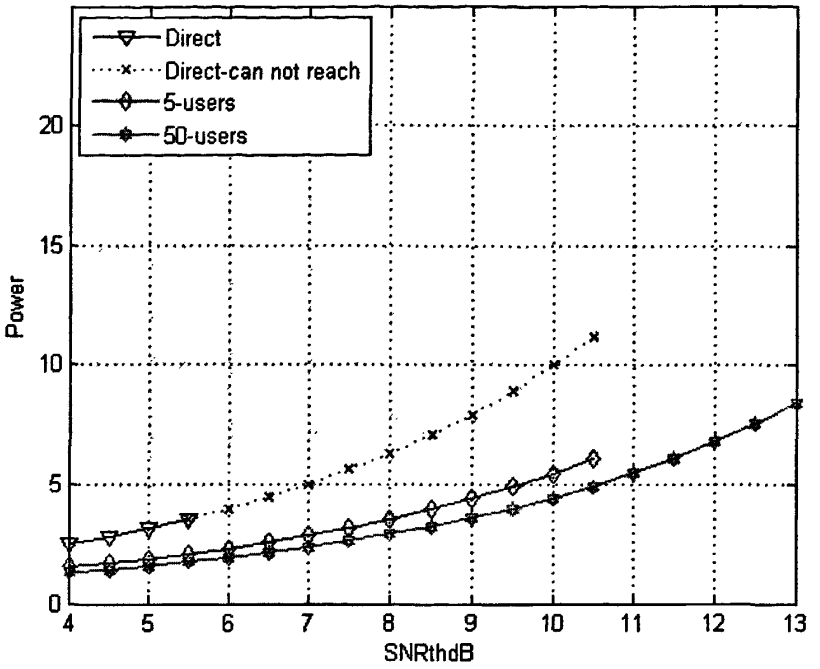

图 4-8 基于平均信噪比的仿真结果

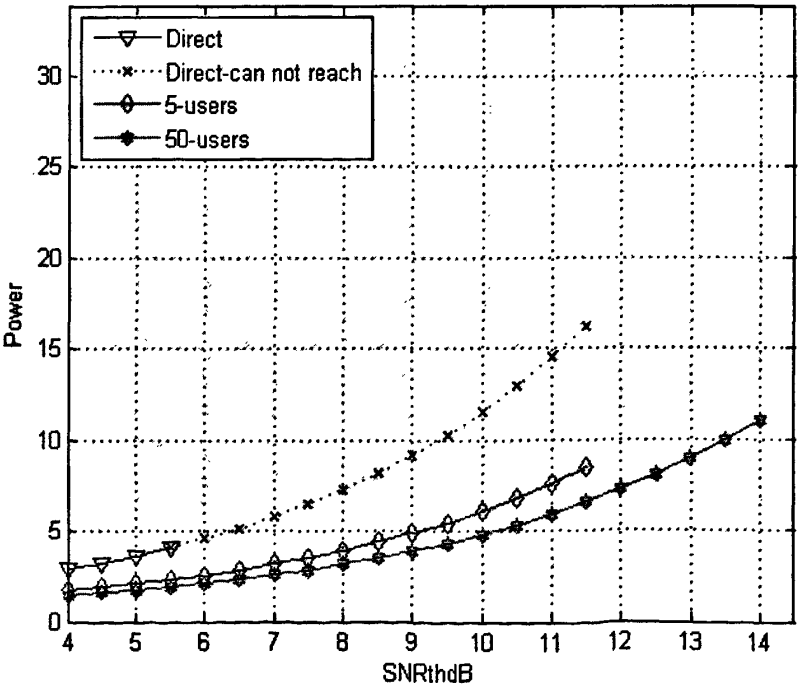

图 4-9 基于瞬时信道信息仿真结果

从图 4-8 和 4-9 中可以得出，无论是基于平均信噪比还是基于瞬时信道信息的方法，在加入中继的协作传输中，协作分集随着协作用户密度的增大而提高，而在采用直接传输中，用户密度对传输的性能没有影响。这是由于协作用户数的增大，并且协作用户随机分布，从而使得某个（或者某些）中继用户所在位置的信道状态较好，能够获得更高的信道增益，进而能够以较小的发射功率获得相同的信噪比要求，然而这一优势对于直接传输没有造成任何的影响，因为中继信道状态的好坏与直接传输没有关系。在 5 个可用中继用户的情形下，为了获得相同的信噪比要求，比在 50 个可用中继用户的情形下，需要多最多达 20%的总发射功率；并且在相同的授权用户干扰限的条件下，在 50 个可用中继的情形下比在 5 个可用中继的情形下能够获得更高的信噪比要求，最大可以提高 15%。

4.1.3 计算复杂度分析

如果潜在的中继用户有 M 个，由算法的流程分析可得：采用最小化发射功率进行选择中继和功率分配的的计算复杂度为 $O(M)$；同时，理论分析和仿真结果表明：加入中继之后系统性能改进较大。由上可得，该算法在增加较小复杂度的情况下能大幅度地提高系统的性能，因此具有一定的实际应用价值。

4.2 在 DF 感知中继系统中的应用

4.2.1 数学模型和理论推导

在解码转发（DF）中继系统中，中继节点接收到来自源节点的信息后先进行解码，然后重新编码，最后进行转发，目标接收节点将接收到的来自源节点与中继节点信息进行合并。于是有：

中继节点接收来自源节点和授权用户的信号

$$z_{sp} = \sqrt{P_s} g_{sr} x_s + \sqrt{P_p} g_{pr} x_p + n_{sr} \tag{4-9}$$

目标接收节点接收来自源节点和授权用户的信号：

$$y_{sp} = \sqrt{P_s} g_{sd} x_s + \sqrt{P_p} g_{pd} x_p + n_{sd} \tag{4-10}$$

目标接收节点接收来自中继节点和授权用户的信号：

$$y_{rp}=\sqrt{P_r}g_{rd}x_s+\sqrt{P_p}g_{pd}x_p+n_{rd} \tag{4-11}$$

其中，P_s，P_r，P_p分别表示源节点、中继的发射功率和授权用户的发射功率；x_s，x_k，x_p分别表示源节点、中继节点和主用户发射端的发射信号；g_{sr}，g_{sd}，g_{pr}，g_{rd}，g_{pd}分别表示源节点到中继节点，源节点到目标接收节点，授权用户发射端到中继节点，中继节点到目标接收节点，授权用户发射端到目标接收节点之间的信道增益；n_{sr}，n_{sd}，n_{rd}均为加性高斯白噪声，其功率均为N。

同样，感知用户能够获得授权用户信号的先验信息，可以采用 DPC（Dirty Paper Coding）编码，消除授权用户对感知用户的干扰[47-48]。在目标接收节点采用最大比合并方法对接收到得两路信号进行合并，得到输出的信噪比为：

$$SNR=\frac{P_s|g_{sd}|^2}{N}+\frac{P_r|g_{rd}|^2}{N} \tag{4-12}$$

假设潜在中继区域中有M个可选中继用户，采用最小化中继选择和功率分配策略从中选出最优的中继节点m，同样需要两个步骤，分别是：

步骤一：首先计算各个可用中继节点的最小化发射功率的功率分配方案。对于第i $(i=1,2,...,M)$个中继节点，其最小化发射功率的功率分配数学模型为：

$$\gamma=\min_{(P_s(i),P_r(i))}(P_s(i)+P_r(i))$$
$$s.t\begin{cases}C1:P_s(i)|g_{sp}|^2\le I_p\\C2:P_r(i)|g_{rp}(i)|^2\le I_p\\C3:P_s(i),P_r(i)\ge 0\\C4:\dfrac{P_s(i)|g_{sd}|^2}{N}+\dfrac{P_r(i)|g_{rd}(i)|^2}{N}\ge SNR_{th}\\C5:P_s(i)|g_{sr}(i)|^2\ge r_R\end{cases} \tag{4-13}$$

其中，约束条件$C1$、$C2$表示源节点和中继节点的发射功率不能对授权用户产生有害的干扰，也就是在授权用户接收端接收到的来自源节点和中继节点的信号强度不能超过授权用户的干扰限；$C3$表示感知用户的源节点和中继节点的发射功率不能小于零；$C4$表示目标接收节点的输出信噪比要达到感知用户的信噪比要求（SNR_{th}），也即是目标接收节点的接收信噪比（SNR）不小于SNR_{th}，$C5$是

为了使得中继节点能够对来自源节点信号进行正确解码的约束条件，表示在中继节点接收到来自源节点的信噪比要大于中继能够正确解码的信噪比门限 r_R。

上述的最优化问题是一个线性优化问题，其可行区域的顶点数最多为 8 个，所以可用顶点穷举法得到其最优解。其所有可能存在的顶点表达式为：$A_n(p_{r(n)}(i), p_{s(n)}(i))$；　$n=1,2,...8$

$$
\begin{aligned}
&A_1(0,\frac{r_R}{|g_{sr}(i)|^2});\quad A_2(0,\frac{I_P}{|g_{sp}|^2});\quad A_3(\frac{I_P}{|g_{rp}(i)|^2},\frac{I_P}{|g_{sp}|^2});\\
&A_4(\frac{I_P}{|g_{rp}(i)|^2},\frac{r_R}{|g_{sr}(i)|^2});\quad A_5(0,\frac{NSNR_{th}}{|g_{sr}(i)|^2});\\
&A_6(\frac{NSNR_{th}|g_{sp}(i)|^2-I_P|g_{sd}(i)|^2}{|g_{sp}|^2|g_{rd}(i)|^2},\frac{I_P}{|g_{sp}|^2})\\
&A_7(\frac{NSNR_{th}|g_{sr}(i)|^2-r_R|g_{sd}|^2}{|g_{sr}(i)|^2|g_{rd}(i)|^2},\frac{r_R}{|g_{sr}(i)|^2});\\
&A_8(\frac{I_P}{|g_{rp}(i)|^2},\frac{NSNR_{th}|g_{rp}(i)|^2-I_P|g_{rd}(i)|^2}{|g_{sd}|^2|g_{rp}(i)|^2})
\end{aligned}
\tag{4-14}
$$

将公式（4-14）可能的 8 个顶点 $A_1 \sim A_8$ 代入公式（4-13）中，符合所有约束条件的最小的 $p(i)=p_{r(n)}(i)+p_{s(n)}(i)$,$n=1,2,...8$ 便是最优的解 $(P_s^{opt}(i),P_r^{opt}(i))$。如果所有的顶点都不符合该约束条件，那么本问题无解。

步骤二：从 M 个可选中继节点中选择所需功率最小的节点作为中继节点，其数学模型为：

$$P_m = \min_{(m\in M)} (P_s^{opt}(i)+P_r^{opt}(i)) \qquad i=1,2,...,M \tag{4-15}$$

根据步骤一计算所得的最小化发射功率分配方案，遍历所有可用中继节点，选出所需发射功率最小的节点作为中继节点协作源节点进行传输。

4.2.2 性能仿真

（1）比较分析采用直接传输、中继协作传输在平均功率分配（源节点和中继节点采用相同的功率）和最小化发射功率分配算法性能，使可选中继用户 $M=1$，采用的模型如图 4-1 所示。

中继能够正确解码的信噪比门限 $r_R=5dB$；

其他参数与图 4-1 仿真模型的参数相同；

在仿真中采用归一化的距离，将感知用户源节点与目标接收节点的距离归一化为 1。

基于平均信噪比和瞬时信道信息的仿真结果如图 4-10 和 4-11 所示，图中虚线部分表示在该方式下由于授权用户干扰限的限制，使得发射功率受到约束而不能达到的信噪比要求。

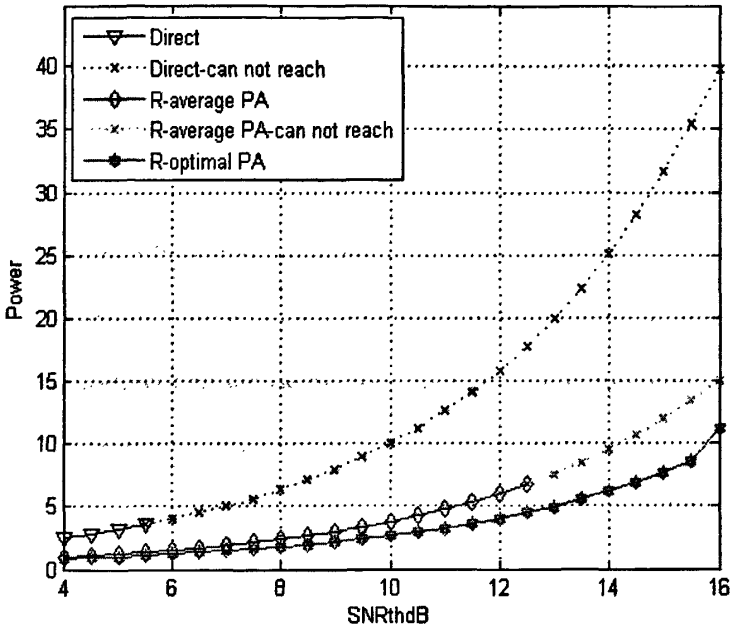

图 4-10　基于平均信噪比的仿真场景

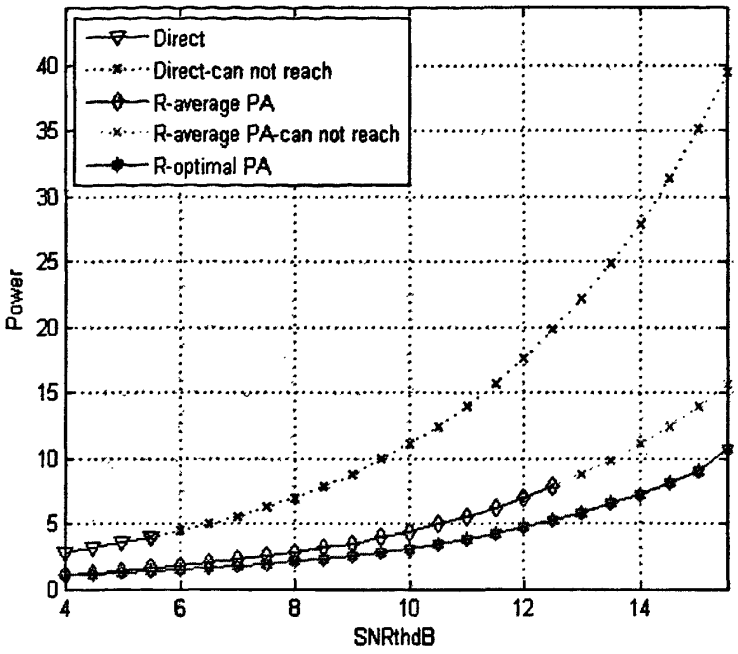

图 4-11　基于瞬时信道信息仿真结果

从图 4-10 和 4-11 两个图中可以看出，结论与在 AF 系统中的结论相近。利用中继的协作分集作用，可以在达到相同的信噪比条件下有效地减少发射功率。无论在采用平均的功率分配算法还是采用最小化发射功率算法，为了达到相同的信噪比要求，所需要的发射功率都直接传输小。在相同信噪比要求下，无论是基于平均信噪比还是基于瞬时信道信息方法，采用最小化发射功率算法最大可以比直接传输节省多于 1 倍和比平均分配功率减少多于 25%的总发射功率，并且，在直接传输中，由于授权用户的干扰限限制，感知用户的发射功率受到约束，所以达到的最大信噪比要求较小，而采用中继的平均分配算法能够在相同的干扰限下达到的信噪比要求提高多于 1 倍，而采用最小化发射功率分配算法能够获得接近直接传输 3 倍的信噪比要求。

（2）比较分析采用直接传输和中继协作传输在最小化发射功率分配算法下随机选择中继和最小化发射功率选择中继两种中继选择策略的性能，使可选中继用户 $M=5$，采用的模型如图 4-4 所示。

中继能够正确解码的信噪比门限 $r_R=5dB$；

其他参数与图 4-4 仿真模型的参数相同；

在仿真中采用归一化的距离，将感知用户源节点与目标接收节点的距离归一化为 1。

基于平均信噪比和瞬时信道信息的仿真结果如图 4-12 和 4-13 所示，图中虚线部分表示在该方式下由于授权用户干扰限的限制，使得发射功率受到约束而未能达到的信噪比要求。

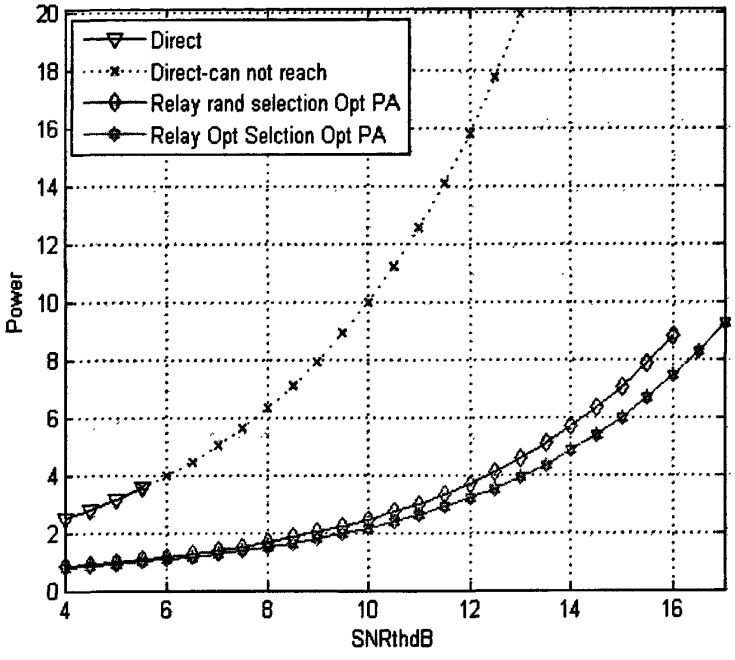

图 4-12　基于平均信噪比的仿真结果

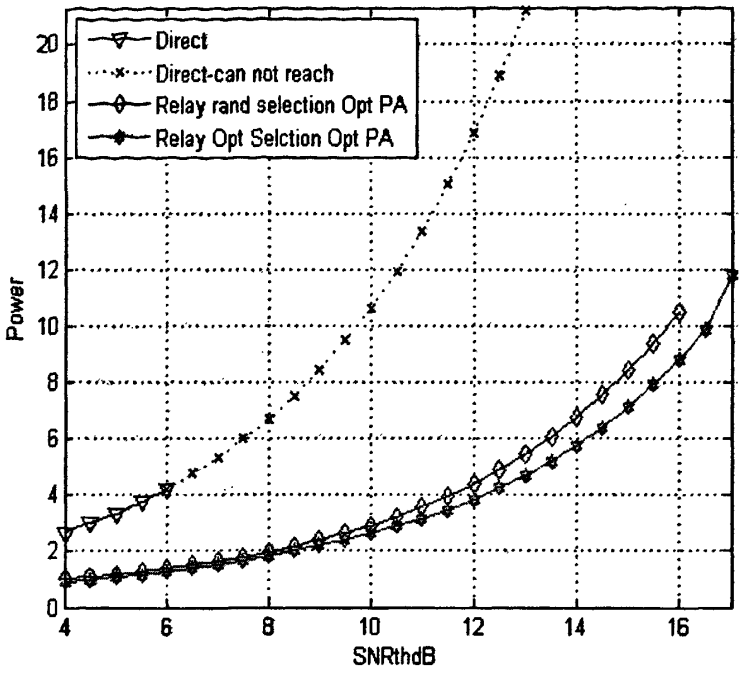

图 4-13　基于瞬时信道信息仿真结果

从图 4-12 和 4-13 可以看出，结论与在 AF 系统中的结论相近。在最小化发射功率分配算法下，为了达到相同的信噪比要求，采用最小化发射功率中继选择策略和随机选择中继策略所需的发射功率都以比直接传输少。在相同信噪比要求下，采用最小化发射功率选择策略最少可以节省比直接传输多于 1 倍和比随机选择中继策略多于 30%的总发射功率，并且在直接传输中，由于授权用户的干扰限较小，所以达到的最大信噪比要求较小，而采用中继的随机选择策略能够在相同的干扰限下达到的信噪比要求比直接传输增加接近 2 倍，而采用最小化发射功率的中继选择策略能够获得的信噪比要求比采用随机选择中继策略增加接近 10%。

（3）比较分析采用中继协作传输在不同的可用中继用户密度下采用最小化发射功率中继选择和功率分配的性能，使可选中继用户 $M=5$ 和 $M=50$ 两种不同的用户密度，采用的模型如图 4-7 所示。

中继能够正确解码的信噪比门限 $r_R=5dB$；

其他参数与图 4-7 仿真模型的参数相同；

在仿真中采用归一化的距离，将感知用户源节点与目标接收节点的距离归一

化为 1。

在基于平均信噪比和瞬时信道信息的仿真结果如图 4-14 和 4-15 所示，图中虚线部分表示在该方式下由于授权用户的干扰限限制，使得发射功率受到约束而未能达到的信噪比要求。

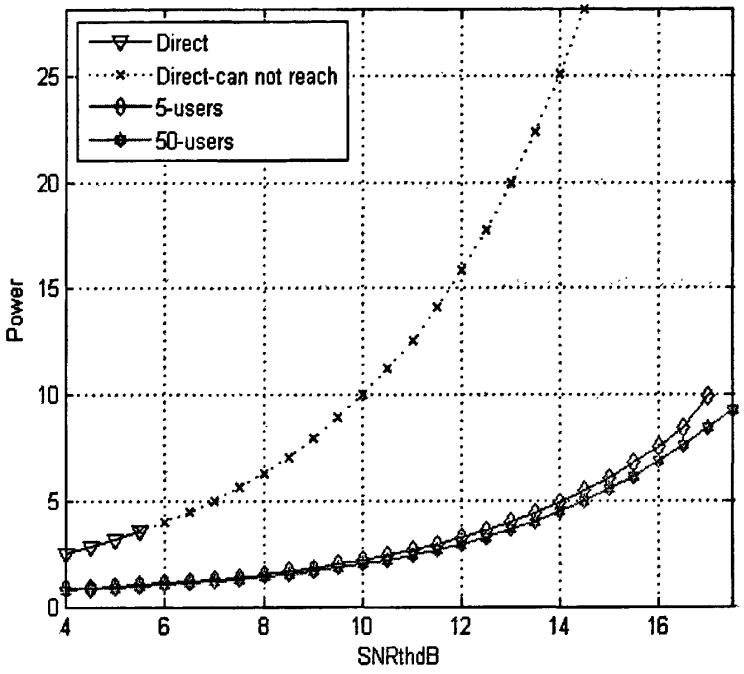

图 4-14　基于平均信噪比的仿真结果

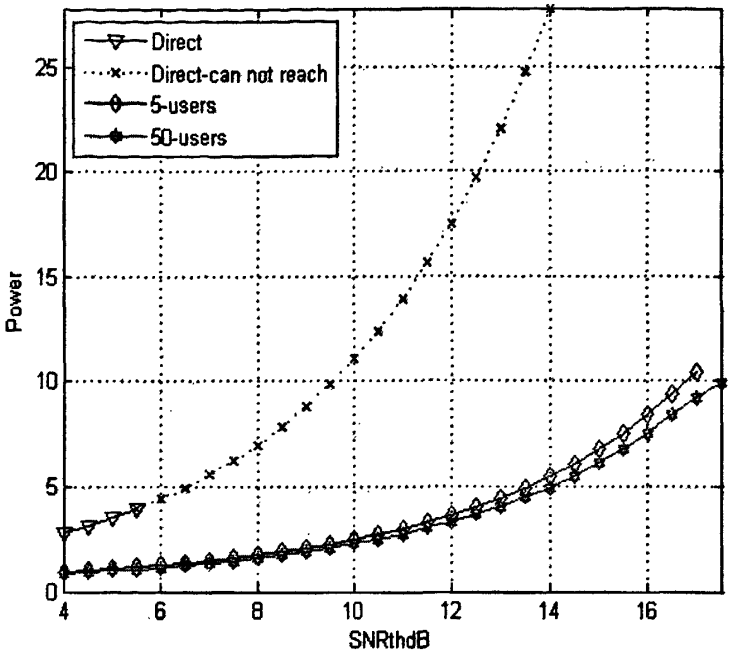

图 4-15　基于瞬时信道信息仿真结果

从图 4-14 和 4-15 中可以得出，结论与在 AF 系统中的结论相近。无论是基于平均信噪比还是基于瞬时信道信息方法，在协作传输中，协作分集随着协作用户密度的增大而提高，而采用直接传输，用户密度对传输的性能没有影响。在 5 个可用中继用户的情形下，为了获得相同的信噪比要求，比在 50 个可用中继用户的情形下，需要多最多达 10%的总发射功率；并且在相同的授权用户干扰限的条件下，在 50 个可用中继用户的情形下比在 5 个可用中继用户的情形下能够获得更高的信噪比要求。

4.2.3 计算复杂度分析

与 AF 中继系统一样，如果潜在的中继用户有 M 个，由算法的流程分析可得，采用最小化发射功率进行选择中继和功率分配的的计算复杂度 $O(M)$；同时，理论分析和仿真结果表明：加入中继之后系统性能改进较大。由上可得，该算法在增加较小复杂度的情况下能大幅度地提高系统的性能，因此具有一定的实际应用价值。

4.3 在 AF 与 DF 感知中继系统中的比较

由于在解码转发中继系统中，中继接收到来自源节点的信号后不仅仅是进行放大，而是先进行解码，然后重新编码，最后再转发。由于在解码再编码的过程中已经将来自源节点的信号中的噪声滤除掉，使得噪声不会在转发过程中再次被传播，从而能够获得更好的性能。而保证这种机制可以顺利进行有一个必要条件，就是中继节点接收到来自源节点的信号的信噪比要达到某一门限，使得中继可以正确地对其进行解码。

下面从仿真上来比较和分析本文所提出的最小化发射功率中继选择和功率分配算法在放大转发（AF）和解码转发（DF）系统中的性能。

4.3.1 性能仿真

（1）比较分析采用直接传输、中继协作传输在最小化发射功率分配的放大转发（AF）和解码转发（DF）两种中继系统中的性能。

采用的模型如图 4-1 所示。

中继能够正确解码的信噪比门限 $r_R = 5dB$；

其他参数与图 4-1 仿真模型的参数相同；

在仿真中采用归一化的距离，将感知用户源节点与目标接收节点的距离归一化为 1。

在基于平均信噪比和瞬时信道信息的仿真结果如图 4-16 和 4-17 所示，图中虚线部分表示在该方式下由于授权用户的干扰限限制，使得发射功率受到约束而未能达到的信噪比要求。

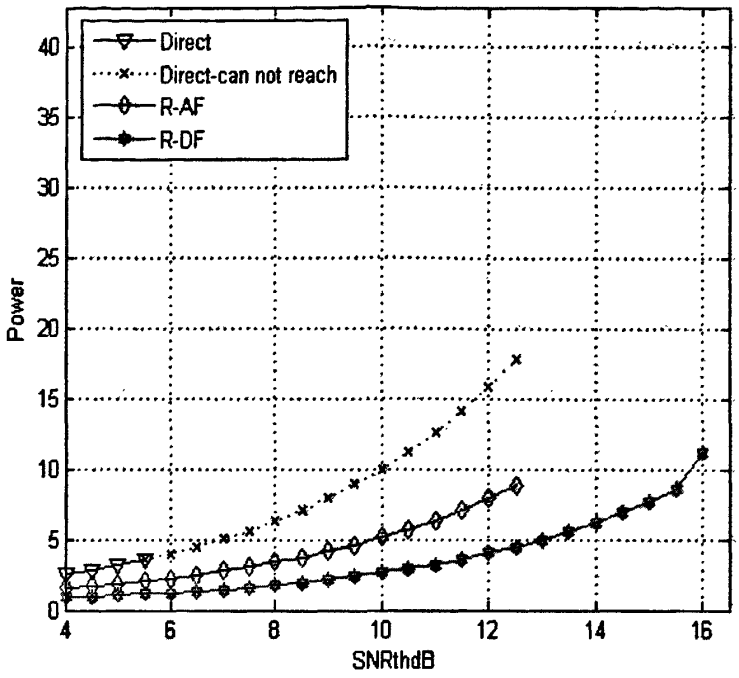

图 4-16　基于平均信噪比的仿真结果

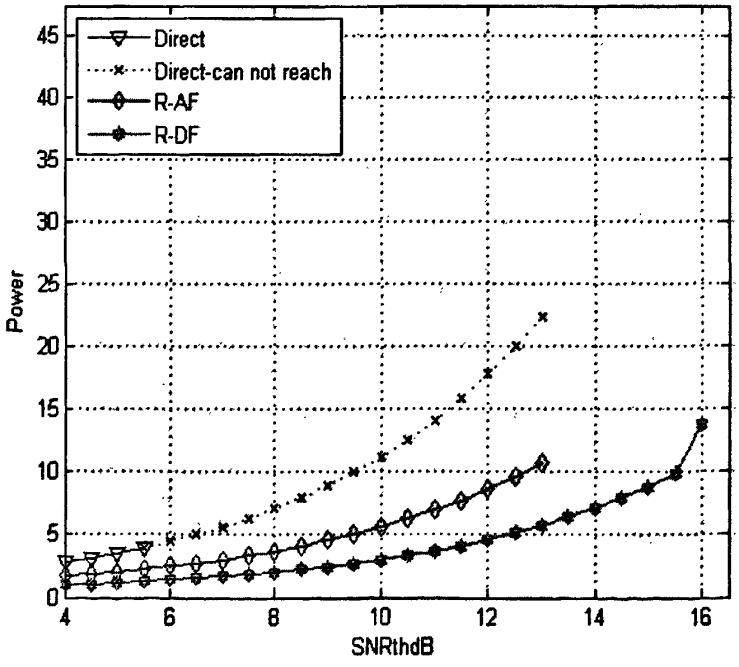

图 4-17　基于瞬时信道信息仿真结果

从图 4-16 和 4-17 中可以看出，在协作传输中，无论是在 AF 还是在 DF 系统中，都能够比采用直接传输使用更少的发射功率而达到相同的信噪比要求，而且在 DF 系统中比在 AF 系统中能够节省更多发射功率。在达到相同的信噪比要求下，在 DF 系统能够比在 AF 系统中节省最多接近 1 倍的总发射功率，AF 又比直接传输可以节省最多多于 1 倍的总发射功率。这是由于在解码转发系统中，中继在解码再编码的过程中已经将来自源节点的信号中的噪声滤除掉，所以使得噪声不会在转发过程中再次被放大传播，从而增加了目标接收节点的接收信噪比，能够以更小的发射功率获得相同的信噪比要求，仿真结果与理论结果相一致。由于达到相同的信噪比，在 DF 系统比在 AF 系统所需要的发生功率较小，这也使得在相同的授权用户干扰限下，在 DF 系统中能够比在 AF 系统中达到更高的信噪比要求，最高多于 30%。

（2）当感知用户源节点与中继节点的信道状态较差时，比较分析采用直接传输、最小化发射功率分配方案的放大转发（AF）中继系统和基于不同的中继正确解码门限的解码转发（DF）中继系统中的性能。使可选中继用户 $M=1$。

采用的模型如图 4-1 所示。

中继能够正确解码的信噪比门限 $r_{R1}=7.5dB$ 和 $r_{R2}=10dB$；

源节点与中继节点信道增益的方差为 1.5；中继节点与源节点信道增益的方差为 3；

其他参数与图 4-1 仿真模型的参数相同；

在仿真中采用归一化的距离，将感知用户源节点与目标接收节点的距离归一化为 1。

在基于瞬时信道信息的仿真结果如图 4-18 所示，图中虚线部分表示在该方式下由于授权用户的干扰限限制，使得发射功率受到约束而不能达到的信噪比要求。

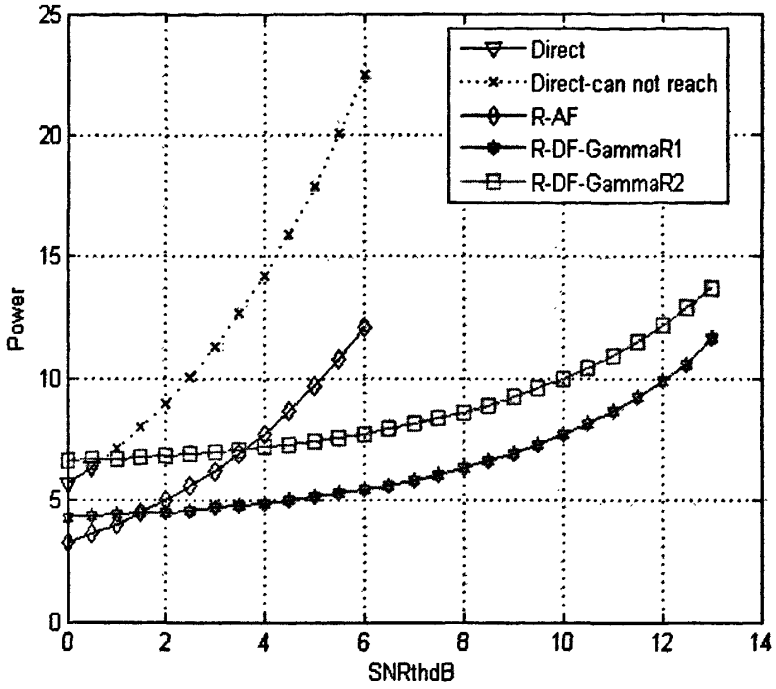

图 4-18　基于瞬时信道信息仿真结果

从图中可以看出，在源节点和中继节点之间的信道状态较比源节点与目标接收节点的信道状态差，并且当中继能够正确解码的信噪比门限增加到 7.5dB 的时候，使用最小化发射功率的分配方案，在 DF 系统中，所需要的总发射功率在小信噪比要求时比在 AF 系统中还要高，这是由于在 DF 系统中要求中继接收来自源节点的信噪比需要大于其能够正确译码门限；所以源节点需要更大的发射功率才能使中继在较差的信道条件下获得所正确译码需要的信噪比，从而使得总的发射功率迅速的增加，而在 AF 系统中，不用受到这一条件的限制，并且在小信噪比要求的时候所需要的发射功率也较小，所以 AF 所需要的发射功率比 DF 低，但是当信噪比要求增加到一定程度的时候，算法在 DF 策略又能以比在 AF 策略小的发射功率获得相同的信噪比要求；而且在 DF 系统中能够达到的最大信噪比要求要比 AF 系统中的高。最后，当中继能够正确解码的信噪比门限增加到 10dB 的时候，在小信噪比要求下，甚至出现在 DF 系统中比直接传输所需的发射功率还大的情况，这也是由于当源节点与中继节点的信道状态较差的时候，为了达到如此高的中继正确译码信噪比门限，源节点所需要的发射功率很大，从而导致了

总发射功率较大。同样，当信噪比要求增加到一定程度的时候，DF 所需要的发射功率就比 AF 和直接传输小，同时也能达到更高的信噪比要求。

本章小结

本章是本文的重点部分，主要是在最小化发射功率中继选择和功率分配策略下，建立在放大转发（AF）和解码转发（DF）中继系统中的数学模型，并推导出在相应的中继系统下的功率分配方案，并与直接传输、平均功率分配方案和随机选择中继策略进行比较，仿真结果表明在最小化发射功率的中继选择和功率分配策略下，不仅能够以较小发射功率达到相同的信噪比要求，也能够在相同的授权用户干扰限的条件下，获得更高的感知用户信噪比要求，而且在协作传输方案中，随着可用中继用户数量的增加，其所需的发射功率在不断减少；同时还比较了本算法在 AF 和 DF 两种中继系统中的性能，结果表明在 DF 系统中，由于中继滤除了来自源节点信号中的噪声，避免了噪声的传播，使得在 DF 系统中获得更好的性能，但是当源节点与中继节点之间的信道状态较差并且中继正确解码的信噪比门限较高时，由于在 DF 系统中要求中继节点到接收来自源节点的信号信噪比要高于该门限，所以需要源节点加大发射功率，因此当感知用户的信噪比要求较低时，在 AF 系统中的性能优于在 DF 系统中的性能，仿真结果与理论结果相符合。

第 5 章　总结和展望

本文主要研究了感知中继网络中继选择和功率分配方案。在感知无线电中继网络以往的中继选择和功率分配算法中，尽管已经保证了感知用户对授权用户的干扰不会大于授权用户能够接受的最大干扰门限，但是依然未能达到授权用户希望感知用户对自己的干扰尽量小的期望，并且由于信号检测的不准确性以及感知无线电用户存在突发数据传输，使得感知用户对授权用户的影响具有不稳定性，所以感知无线电用户应该尽可能地降低发射功率，尽可能减少对授权用户的影响。本文采用最小化发射功率的中继选择策略和功率分配方案，是在同时能够满足授权用户的干扰限和感知用户的信噪比（SNR）的要求下，利用最小化发射功率分配策略得到各个可用中继节点的功率分配方案，然后从所有节点中选择所需发射功率最小的节点作为中继节点，协助中继节点进行传输。仿真结果表明，使用最小化发射功率中继选择和功率分配策略，在达到相同的感知用户信噪比要求下，所需要的发射功率比直接传输、随机选择中继和平均功率分配方案小，同时，在相同的授权用户干扰限条件下，最小化的发射功率中继选择和功率分配策略所能达到的最大感知用户信噪比要求比直接传输、随机选择中继和平均功率分配方案大。

本文主要工作为：

1、本文提出了最小化发射功率中继选择和功率分配策略。该策略不仅可以有效的满足感知用户的QoS要求和保证感知用户不对授权用户产生有害的干扰，并且能够进一步减少感知用户对授权用户的干扰和节省无线感知用户终端的能量消耗，延长终端电池的使用时间；再者在现实的无线环境中，除了授权用户的网络以及感知用户的网络以外，还存在其他的网络，最小化发射功率有利于减小整个感知网络对于其他周围网络的干扰。

2、采用最小化发射功率中继选择和功率分配策略，建立了在放大转发（AF）和解码转发（DF）中继系统中的数学模型，推导出在此两种中继系统的功率分配方案，并进行了系统仿真。仿真结果表明，最小化发射功率的中继选择和功率分配方案能够比直接传输、采用中继的平均功率分配方案和随机选择中继策略获得更好的性能。

3、比较了本算法在 AF 和 DF 两种中继系统中的性能，结果表明：在 DF 系统中，由于中继滤除了来自源节点信号中的噪声，使得在 DF 系统中获得更好的性能。但是当源节点与中继节点之间的信道状态较差并且中继正确解码的信噪比门限较高时，由于在 DF 分配要求中继节点中继节点的接收来自源节点的信号要高于该门限，需要源节点加大发射功率，所以在感知用户的信噪比要求较低时，算法在 AF 系统中的性能优于在 DF 系统中的性能，仿真结果与理论结果相符合。

鉴于时间有限，论文的研究仍存在不足。不足之处在于：

1、本文只考虑了采用单个中继的协作策略，虽然能够获得比直接传输更好的性能，但是能够达到的感知用户的信噪比依然较小，可以采用多中继以增加分集增益，进一步的提高系统的性能。

2、考虑到信噪比与中断概率、传输速率等性能指标之间存在关联，并且已有众多研究结果对系统的理论性能进行了分析，故本文将信噪比（SNR）作为感知用户服务质量（QoS）的要求，在实际系统中，可进一步根据承载业务的要求进行系统的性能分析。

3、本论文研究侧重点落在理论研究方面，可进一步考虑开展实用化的研究，因为感知中继技术可以有效提高频谱利用率和频谱效率，可以将感知中继网络应用到未来的 LTE（4G）系统中，实现多频段协作，这也是下一个无线通信的研究热点。

参考文献

[1] NTIA. http://www.ntia.doc.gov/osmhome/allochrt.pdf

[2] 谢显中. 感知无线电技术及其应用. 北京:电子工业出版社, 2008

[3] Akyildiz, I.F., et al. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. Computer Networks, 2006, 50(13): 2127-2159

[4] FCC. Spectrum policy task force report. ET Docket, No.02-155.Nov 02,2002

[5] Weiss, T.A. and F.K. Jondral. Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(3): S8-14

[6] Mitola, J., III and G.Q. Maguire, Jr. Cognitive radio: making software radios more personal. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18

[7] Telatar, I. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. European transactions on telecommunications, 1999, 10(6): 585-596

[8] Foschini, G. and M. Gans. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. Wireless personal communications, 1998, 6(3): 311-335

[9] Weiss, T., et al. Efficient signaling of spectral resources in spectrum pooling systems. In:Proc. 10th Symposium on Communications and Vehicular Technology. 2003:1-6

[10] Ben Letaief, K. and Z. Wei. Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 878-893

[11] Ganesan, G. and L. Ye. Agility improvement through cooperative diversity in cognitive radio. In:Proc. Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM '05. IEEE. 2005.5:2505-2509

[12] Shin, O., et al. Cooperation, Competition and Cognition in Wireless Networks. Cooperation in Wireless Networks: Principles and Applications: 69-100

[13] Simeone, O., Y. Bar-Ness, and U. Spagnolini. Stable Throughput of Cognitive Radios With and Without Relaying Capability. IEEE Transactions on

Communications, 2007, 55(12): 2351-2360

[14] Jia, J., J. Zhang, and Q. Zhang. Cooperative Relay for Cognitive Radio Networks. In:Proc. INFOCOM 2009, IEEE. 2009:2304-2312

[15] Mitola, J. Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio. Doctor of Technology, Royal Inst. Technol.(KTH), Stockholm, Sweden, 2000,

[16] 张洪涛. 认知无线电功率控制算法研究. 硕士学位论文. 西安电子科技大学, 1-26.2008

[17] Haykin, S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220

[18] Nie, N. and C. Comaniciu. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(6): 779-797

[19] Yiping, X., et al. Dynamic spectrum access in open spectrum wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 626-637

[20] Lee, Y. Performance of secondary users in opportunistic spectrum access. Electronics Letters, 2008, 44(16): 981-983

[21] Anh Tuan, H., et al. Opportunistic Spectrum Access for Energy-Constrained Cognitive Radios. In:Proc. Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE. 2008:1559-1563

[22] Yiping, X., et al. Dynamic Spectrum Access with QoS and Interference Temperature Constraints. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(4): 423-433

[23] Dong In, K., L. Long, and E. Hossain. Resource Allocation for Cognitive Radios in Dynamic Spectrum Access Environment. In:Proc. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008. CrownCom 2008. 3rd International Conference on. 2008:1-6

[24] Anh Tuan, H. and L. Ying-Chang. Downlink Channel Assignment and Power Control for Cognitive Radio Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(8): 3106-3117

[25] van der Meulen, E. A survey of multi-way channels in information theory: 1961-1976. IEEE Transactions on Information Theory, 1977, 23(1): 1-37

[26] Van der Meulen, E. Transmission of information in a T-terminal discrete memoryless channel. University of California at Berkeley., 1969

[27] Sendonaris, A., E. Erkip, and B. Aazhang. User cooperation diversity. Part I. System description. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927-1938

[28] Madan, R., et al. Energy-Efficient Cooperative Relaying over Fading Channels with Simple Relay Selection. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(8): 3013-3025

[29] Mesbah, W. and T.N. Davidson. Optimal Power Allocation for Full-Duplex Cooperative Multiple Access. In:Proc. Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006. ICASSP 2006 Proceedings. 2006 IEEE International Conference on. 2006.4:IV-IV

[30] 彭木根，王文博等. 协同无线通信原理与应用. 北京:机械工业出版社, 2008

[31] Laneman, J.N., D.N.C. Tse, and G.W. Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080

[32] Rappaport, T. Wireless communications: principles and practice. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall PTR New Jersey, 2002

[33] Chunhua, S. and K. Ben Letaief. User Cooperation in Heterogeneous Cognitive Radio Networks with Interference Reduction. In:Proc. Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on. 2008:3193-3197

[34] 高伟东等. 协作通信中的中继节点选取和功率分配联合优化. 北京邮电大学学报, 2008, 31(002): 68-71

[35] Maric, I. and R.D. Yates. Forwarding strategies for Gaussian parallel-relay networks. In:Proc. Information Theory, 2004. ISIT 2004. Proceedings. International Symposium on. 2004:269

[36] Maric, I. and R.D. Yates. Bandwidth and power allocation for cooperative strategies in Gaussian relay networks. In:Proc. Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on. 2004.2:1907-1911

[37] Liang, Y. and V.V. Veeravalli. Gaussian Orthogonal Relay Channels: Optimal Resource Allocation and Capacity. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(9): 3284-3289

[38] Yingwei, Y., C. Xiaodong, and G.B. Giannakis. On energy efficiency and optimum resource allocation of relay transmissions in the low-power regime. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2917-2927

[39] Xitirnin, D. and A.M. Haimovich. Power allocation for cooperative relaying in wireless networks. IEEE Communications Letters, 2005, 9(11): 994-996

[40] Gunduz, D. and E. Erkip. Opportunistic cooperation by dynamic resource allocation. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(4): 1446-1454

[41] Hunter, T.E. and A. Nosratinia. Distributed protocols for user cooperation in multi-user wireless networks. In:Proc. Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04. IEEE. 2004.6:3788-3792

[42] Bletsas, A., et al. A simple Cooperative diversity method based on network path selection. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 659-672

[43] Ibrahim, A.S., et al. SPC12-5: Relay Selection in Multi-Node Cooperative Communications: When to Cooperate and Whom to Cooperate with? In:Proc. Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE. 2006:1-5

[44] Mietzner, J., L. Lampe, and R. Schober. Distributed Transmit Power Allocation for Relay-Assisted Cognitive-Radio Systems. In:Proc. Signals, Systems and Computers, 2007. ACSSC 2007. Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on. 2007:792-796

[45] Hoyhtya, M., et al. Energy Efficient Inverse Power Control for a Cognitive Radio Link. In:Proc. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007. CrownCom 2007. 2nd International Conference on. 2007:264-271

[46] Dong, L. and D. Xianua. Power control in cooperative cognitive radio networks by geometric programming. In:Proc. Communications, 2009. APCC 2009. 15th Asia-Pacific Conference on. 2009:118-121

[47] Wei, W., S. Vishwanath, and A. Arapostathis. Capacity of a Class of Cognitive Radio Channels: Interference Channels With Degraded Message Sets. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(11): 4391-4399

[48] Devroye, N., P. Mitran, and V. Tarokh. Achievable rates in cognitive radio channels. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(5): 1813-1827

[49] Boyd, S. and L. Vandenberghe. Convex optimization. Cambridge,U.K: Cambridge, University Press, 2004

[50] Goldsmith, A. Wireless communications. Cambridge,U.K: Cambridge University Press, 2005

研究生期间取得的成果

[1] Lin, Z., L. Kaixin, and Q. Jiayin. Supply function equilibrium pricing strategy for primary user prioritized dynamic spectrum access. In:Proc. Communications, Circuits and Systems, 2009. ICCCAS 2009. International Conference on. 2009:269-271

致 谢

时光匆匆，转眼间两年的研究生的学习生活就要结束了，新的生活就要开始了。在本文中我要向那些支持和帮助我的人表示诚挚的谢意。

首先感谢我的硕士指导老师同时也是本论文的指导老师张琳老师。本文的研究是在张老师的悉心指导下完成的。张老师治学严谨、要求严格，使我在研究生阶段得到了很多的锻炼，同时她渊博知识和敏捷思维我留下了十分深刻的印象。感谢张老师给予悉心的指导和帮助，正是老师的严格要求、精心教诲与指导，让我锻炼了独立从事科研工作的能力，学到探求知识的方法。

其次我要感谢实验室的大导师——秦家银老师，感谢他教予我们学术的思维和为我们创造舒服的研究环境。另外，还要感谢各位博士师兄师姐不厌其烦地回答我的疑问。

最后，我要特别感谢我善良、勤劳的父母、姐姐和姐夫，他们为我的成长倾注了大量的心血。在生活上，给了我无微不至的关心；在学习上，是你们的鼓励和教导，使得我不断努力、不断前进。衷心希望他们永远健康和快乐。

向所有关心、爱护和帮助我的人们致以衷心的感谢！

感谢评审对我论文提出的宝贵意见。

最后感谢这个世界拥有一颗包容的心，所有的爱都能发芽，成长，壮大，汇聚成不可逆转的力量。再次向所有的亲人、朋友、同学表示由衷的感谢！

林 楷 鑫

2010 年 5 月