

# 无线网络资源优化的 免疫算法理论及实现

朱思峰 柴争义 著



科学出版社

# 无线网络资源优化的免疫算法 理论及实现

朱思峰 柴争义



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书内容涉及无线通信领域与智能计算领域,主要关注认知无线网络、异构网络融合场景下的资源分配优化问题,提高频谱资源利用率、解决静态网络模式与动态需求之间的矛盾。本书主要介绍无线通信网络资源联合优化分配的基本方法与关键技术,包括:建立不同无线资源的优化分配模型及相应的智能优化算法;构建联合无线资源优化的理论架构与技术体系;设计异构网络融合场景下的联合式基站选址优化模型、基站导频功率优化模型、联合会话接入控制多目标优化模型、垂直切换判决模型、基于免疫优化的认知无线电频谱分配、认知引擎决策、子载波资源分配和功率分配以及联合资源分配方案。

本书可以作为高等院校通信专业高年级本科生和研究生的教材,也可供从事网络优化和通信网络资源优化的工程技术人员参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

无线网络资源优化的免疫算法理论及实现/朱思峰,柴争义著. —北京:科学出版社,2015.

ISBN 978-7-03-043890-4

I. ①无… II. ①朱…②柴 III. ①无线网—资源优化—算法理论—研究 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 055180 号

---

责任编辑:王 哲 董素芹 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 5 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2015 年 5 月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:214 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

无线通信系统是一种资源受限的系统。随着无线业务的需求日趋增多,无线资源短缺的问题日益突出,如基站站址资源、频谱资源、码资源、功率资源、带宽资源等。如何有效地利用有限的无线资源来满足日益增长的业务需求,已经成为国内外研究者共同关注的问题。一方面,通过采用先进的通信技术来提高通信系统的容量和质量;另一方面,通过对无线通信网络的资源进行优化来提高资源的利用率,充分利用可用的无线资源。

无线通信网络的资源优化问题就是在资源给定的前提下寻找最好的分配方案,从而使资源消耗最小且收益最大,这些问题经过建模后都成为最优化问题。并且,由于无线通信网络优化问题涉及的参数众多,经数学建模后多数为非凸约束优化问题。智能计算方法已经被证明为求解此类问题的有效方法,表现出较好的性能。人工免疫算法是一种受生物免疫系统启发的智能优化算法,具有提供新颖的解决问题的潜力,已经在工程优化领域显示出优越的性能。本书主要将免疫克隆算法用于无线网络中的资源优化问题,对人工免疫算法在工程领域的应用进行了积极探索。

本书是对作者从事无线网络资源优化领域前沿研究成果的梳理与总结,较为深入地阐述了免疫优化算法在无线网络资源优化中的应用和性能分析。本书针对不同网络场景,将不同类型的无线网络资源分配问题建模成各种优化模型,并设计出相应的免疫优化算法和混合优化算法进行求解,对模型性能、算法收敛性、资源分配优化性能等逐一加以分析和讨论。内容取材于作者近期在国际、国内学术会议、期刊发表的论文,包括基站选址优化、频谱资源优化、认知引擎参数优化、基站导频功率优化、联合会话接纳控制、垂直切换判决、负载均衡、子载波和功率资源的分配等。

本书坚持学术性和应用性相结合的原则,在阐述工程优化问题时,一方面侧重方法论,阐述常用的优化方法;另一方面,以案例式讲解利用智能方法对资源优化问题的建模过程,使读者掌握具体的应用技能。本书的鲜明特色是把理论和实践融合在一起,以“理论及方法探索→建立问题模型→求解模型,给出优化方案→评估方案→根据反馈信息修正模型”的方式展示技术方案。在讲解过程中,遵从了“用理论来指导实践,用实践来丰富理论”的科研规律,读者在阅读本书时,可以一边学习理论,一边在实验室进行案例仿真实验。

本书由周口师范学院朱思峰撰写第1章~第5章,天津工业大学柴争义撰写第6章~第10章。在本书撰写过程中,参考了国内外同行的最新研究成果,在此向他们表示衷心的感谢。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(U1204618)、河南省高校科技创

新人才支持计划项目（13HASTIT041）、泛网无线通信教育部重点实验室\*（北京邮电大学）开放课题（2013-FFKT01）、周口师范学院学术技术带头人专项基金的资助，在此表示深深的谢意！

由于作者水平有限，加之成书时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请业界专家、学者和读者批评指正。

作 者

2015 年 3 月

# 目 录

## 前言

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                        | 1  |
| 1.1 无线通信网络资源优化问题 .....                | 1  |
| 1.2 无线网络资源优化的主要内容 .....               | 1  |
| 1.2.1 基站选址和导频功率优化问题 .....             | 1  |
| 1.2.2 异构网络的联合会话接纳选择控制和垂直切换判决问题 .....  | 2  |
| 1.2.3 认知无线网络中的资源分配问题 .....            | 5  |
| 1.3 无线网络资源优化问题建模 .....                | 7  |
| 1.3.1 单目标优化问题 .....                   | 7  |
| 1.3.2 多目标优化问题 .....                   | 7  |
| 1.3.3 约束处理技术 .....                    | 9  |
| 1.3.4 无线网络资源优化问题的求解方法 .....           | 9  |
| 1.4 人工免疫系统 .....                      | 10 |
| 1.4.1 生物免疫系统及其信息处理机能 .....            | 10 |
| 1.4.2 人工免疫系统及其研究进展 .....              | 12 |
| 1.4.3 人工免疫系统的主要模型和算法 .....            | 13 |
| 1.4.4 克隆选择算法 .....                    | 14 |
| 1.4.5 免疫克隆形态空间理论 .....                | 17 |
| 1.4.6 量子免疫计算 .....                    | 18 |
| 1.4.7 混沌免疫优化 .....                    | 19 |
| 1.5 本章小结 .....                        | 20 |
| 参考文献 .....                            | 20 |
| 第 2 章 基于免疫计算的基站选址优化 .....             | 24 |
| 2.1 引言 .....                          | 24 |
| 2.2 TD-SCDMA 网络的基站选址优化 .....          | 24 |
| 2.2.1 TD-SCDMA 网络的基站选址问题的数学模型 .....   | 24 |
| 2.2.2 求解 TD-SCDMA 网络基站选址的免疫克隆算法 ..... | 26 |
| 2.2.3 算法收敛性分析 .....                   | 30 |
| 2.2.4 仿真实验及结果分析 .....                 | 31 |
| 2.3 WCDMA 网络的基站选址优化 .....             | 33 |

|       |                                    |    |
|-------|------------------------------------|----|
| 2.3.1 | WCDMA 网络基站选址问题描述 .....             | 33 |
| 2.3.2 | 基于免疫计算的 WCDMA 网络基站选址方法 .....       | 35 |
| 2.3.3 | 仿真实验及结果分析 .....                    | 37 |
| 2.4   | IEEE 802.16j 网络基站及中继站选址优化 .....    | 39 |
| 2.4.1 | 802.16j 网络基站及中继站选址优化问题的数学模型 .....  | 39 |
| 2.4.2 | 基于免疫计算的 802.16j 网络基站和中继站选址方法 ..... | 41 |
| 2.4.3 | 仿真实验及结果分析 .....                    | 44 |
| 2.5   | 本章小结 .....                         | 47 |
|       | 参考文献 .....                         | 48 |
| 第 3 章 | 基于免疫计算的基站导频功率优化 .....              | 50 |
| 3.1   | 引言 .....                           | 50 |
| 3.2   | WCDMA 网络基站导频功率优化 .....             | 50 |
| 3.2.1 | WCDMA 网络基站导频功率优化问题的数学模型 .....      | 50 |
| 3.2.2 | 求解 WCDMA 网络基站导频功率分配问题的免疫优化算法 ..... | 52 |
| 3.2.3 | 算法收敛性分析 .....                      | 56 |
| 3.2.4 | 仿真实验及结果分析 .....                    | 57 |
| 3.3   | 家庭基站导频功率优化 .....                   | 59 |
| 3.3.1 | 家庭基站导频功率优化问题的数学模型 .....            | 59 |
| 3.3.2 | 基于免疫计算的家庭基站导频功率优化 .....            | 61 |
| 3.3.3 | 仿真实验及结果分析 .....                    | 64 |
| 3.4   | 本章小结 .....                         | 66 |
|       | 参考文献 .....                         | 66 |
| 第 4 章 | 异构无线网络中基于免疫计算的联合会话接纳控制 .....       | 68 |
| 4.1   | 引言 .....                           | 68 |
| 4.2   | 集中式联合会话接纳控制问题的数学模型 .....           | 68 |
| 4.2.1 | 问题描述 .....                         | 68 |
| 4.2.2 | 数学优化模型 .....                       | 70 |
| 4.3   | 求解联合会话接纳控制问题的免疫算法 .....            | 71 |
| 4.3.1 | 编码方案 .....                         | 71 |
| 4.3.2 | 抗体克隆算子 .....                       | 71 |
| 4.3.3 | 基因变异算子 .....                       | 72 |
| 4.3.4 | 种群分类操作 .....                       | 72 |
| 4.3.5 | 种群更新操作 .....                       | 72 |
| 4.3.6 | 算法描述 .....                         | 72 |
| 4.3.7 | 算法复杂度分析 .....                      | 73 |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 4.4   | 仿真实验及结果分析              | 74  |
| 4.4.1 | 实验环境                   | 74  |
| 4.4.2 | 实验结果及分析                | 74  |
| 4.5   | 本章小结                   | 76  |
|       | 参考文献                   | 76  |
| 第5章   | 简谐振子免疫算法求解异构网络垂直切换判决问题 | 78  |
| 5.1   | 引言                     | 78  |
| 5.2   | 垂直切换判决问题的数学模型          | 79  |
| 5.2.1 | 垂直切换判决问题描述             | 79  |
| 5.2.2 | 问题建模                   | 81  |
| 5.3   | 简谐振子免疫优化算法             | 81  |
| 5.3.1 | 物理学中的简谐振子              | 81  |
| 5.3.2 | 简谐振子算法                 | 82  |
| 5.3.3 | 混合型优化算法                | 84  |
| 5.4   | 基于简谐振子免疫优化算法的垂直切换判决方案  | 87  |
| 5.4.1 | 问题编码                   | 87  |
| 5.4.2 | 垂直切换判决方案               | 87  |
| 5.5   | 仿真实验及结果分析              | 88  |
| 5.5.1 | 实验设置                   | 88  |
| 5.5.2 | 实验结果                   | 88  |
| 5.5.3 | 分析与讨论                  | 90  |
| 5.6   | 本章小结                   | 91  |
|       | 参考文献                   | 91  |
| 第6章   | 基于免疫克隆优化的认知无线网络频谱分配    | 93  |
| 6.1   | 引言                     | 93  |
| 6.2   | 认知无线网络的频谱感知和分配模型       | 93  |
| 6.2.1 | 物理层频谱感知过程              | 93  |
| 6.2.2 | 物理连接模型及建模过程            | 94  |
| 6.2.3 | 认知无线网络频谱分配的图着色模型       | 95  |
| 6.2.4 | 认知无线网络的频谱分配矩阵          | 95  |
| 6.3   | 基于免疫克隆优化的频谱分配具体实现      | 97  |
| 6.3.1 | 算法具体实现                 | 97  |
| 6.3.2 | 算法特点和优势分析              | 99  |
| 6.3.3 | 算法收敛性证明                | 100 |
| 6.4   | 仿真实验与结果分析              | 101 |

|              |                              |            |
|--------------|------------------------------|------------|
| 6.4.1        | 实验数据的生成                      | 101        |
| 6.4.2        | 算法参数设置                       | 102        |
| 6.4.3        | 实验结果及对比分析                    | 102        |
| 6.4.4        | 基于 WRAN 的系统级仿真               | 104        |
| 6.5          | 本章小结                         | 105        |
|              | 参考文献                         | 105        |
| <b>第 7 章</b> | <b>基于混沌量子免疫优化的频谱按需分配算法</b>   | <b>108</b> |
| 7.1          | 引言                           | 108        |
| 7.2          | 考虑次用户需求的频谱按需分配模型             | 108        |
| 7.2.1        | 基于图着色理论的频谱分配建模               | 108        |
| 7.2.2        | 考虑认知用户需求的频谱分配模型              | 109        |
| 7.3          | 基于混沌量子免疫优化的频谱按需分配具体实现        | 111        |
| 7.3.1        | 算法具体实现过程                     | 111        |
| 7.3.2        | 算法特点和优势分析                    | 113        |
| 7.3.3        | 算法收敛性分析                      | 114        |
| 7.4          | 仿真实验与结果分析                    | 115        |
| 7.4.1        | 实验数据的生成                      | 116        |
| 7.4.2        | 相关算法参数的设置                    | 116        |
| 7.4.3        | 实验结果及对比分析                    | 116        |
| 7.5          | 本章小结                         | 120        |
|              | 参考文献                         | 120        |
| <b>第 8 章</b> | <b>量子免疫算法求解基于认知引擎的频谱决策问题</b> | <b>122</b> |
| 8.1          | 引言                           | 122        |
| 8.2          | 基于认知引擎的频谱决策分析与建模             | 122        |
| 8.3          | 算法关键技术与具体实现                  | 123        |
| 8.3.1        | 关键技术                         | 123        |
| 8.3.2        | 算法具体步骤                       | 124        |
| 8.3.3        | 算法特点和优势分析                    | 125        |
| 8.3.4        | 算法收敛性分析                      | 126        |
| 8.4          | 仿真实验及结果分析                    | 127        |
| 8.4.1        | 仿真实验环境及参数设置                  | 127        |
| 8.4.2        | 仿真实验结果及分析                    | 128        |
| 8.5          | 本章小结                         | 131        |
|              | 参考文献                         | 132        |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第 9 章 基于免疫多目标的频谱决策参数优化 .....       | 134 |
| 9.1 引言 .....                       | 134 |
| 9.2 基于认知引擎的频谱决策问题建模 .....          | 134 |
| 9.3 算法关键技术与具体实现 .....              | 135 |
| 9.3.1 关键技术 .....                   | 135 |
| 9.3.2 求解本问题的多目标免疫优化算法 .....        | 136 |
| 9.3.3 算法特点和优势分析 .....              | 137 |
| 9.4 仿真实验及结果分析 .....                | 138 |
| 9.4.1 实验环境及参数设置 .....              | 138 |
| 9.4.2 实验步骤 .....                   | 139 |
| 9.4.3 实验结果 .....                   | 139 |
| 9.4.4 相关算法比较分析 .....               | 141 |
| 9.5 本章小结 .....                     | 142 |
| 参考文献 .....                         | 142 |
| 第 10 章 基于免疫优化的认知 OFDM 系统资源分配 ..... | 144 |
| 10.1 引言 .....                      | 144 |
| 10.2 基于免疫优化的子载波资源分配 .....          | 144 |
| 10.2.1 认知 OFDM 子载波资源分配描述 .....     | 144 |
| 10.2.2 认知 OFDM 子载波资源分配模型 .....     | 145 |
| 10.2.3 算法实现的关键技术 .....             | 146 |
| 10.2.4 基于免疫优化的算法实现过程 .....         | 147 |
| 10.2.5 算法特点和优势分析 .....             | 149 |
| 10.2.6 仿真实验结果 .....                | 149 |
| 10.2.7 小结 .....                    | 151 |
| 10.3 基于免疫优化的功率资源分配 .....           | 151 |
| 10.3.1 功率资源分配问题描述 .....            | 151 |
| 10.3.2 功率资源分配问题的模型 .....           | 151 |
| 10.3.3 算法实现的关键技术 .....             | 152 |
| 10.3.4 基于免疫克隆优化的算法实现过程 .....       | 153 |
| 10.3.5 算法特点分析 .....                | 155 |
| 10.3.6 实验结果与分析 .....               | 155 |
| 10.3.7 小结 .....                    | 157 |
| 10.4 联合子载波和功率的比例公平资源分配 .....       | 157 |
| 10.4.1 问题描述 .....                  | 157 |
| 10.4.2 比例公平资源分配模型 .....            | 158 |

---

|        |                      |     |
|--------|----------------------|-----|
| 10.4.3 | 基于免疫优化的资源分配实现过程····· | 159 |
| 10.4.4 | 仿真实验结果与分析·····       | 164 |
| 10.4.5 | 小结·····              | 167 |
| 10.5   | 本章小结·····            | 167 |
|        | 参考文献·····            | 167 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 无线通信网络资源优化问题

随着无线通信系统的迅速发展和技术的不断进步,越来越多的人能够享受到无线通信带来的便捷。无线业务的需求日趋增多,然而无线资源却日渐短缺<sup>[1]</sup>。无线通信系统是一种资源受限的系统,无线网络资源(如基站(Base Station, BS)站址资源、频谱资源、码资源、功率资源、带宽资源等)日渐短缺<sup>[2]</sup>。如何有效地利用有限的无线资源来满足日益增长的业务需求,已经成为国内外研究者共同关注的问题。无线资源管理是无线通信网络的一个重要研究内容。通过对无线通信网络的资源进行优化,可以提高无线网络资源的利用率和性能。一方面,通过采用先进的通信技术来提高通信系统的容量和质量;另一方面,通过对资源进行优化来提高资源的利用率,充分利用可用的无线资源<sup>[3, 4]</sup>。

## 1.2 无线网络资源优化的主要内容

无线网络资源是一个非常广的范围,其内容包括基站选址、接纳控制、功率控制、负载控制、频谱分配、资源分配和分组调度策略等<sup>[5, 6]</sup>。本书主要关注三方面的内容:基站的选址和导频功率优化问题;异构网络的会话接纳选择控制和垂直切换判决问题;认知无线网络中的频谱决策和资源分配问题。

### 1.2.1 基站选址和导频功率优化问题

移动通信网络基站是无线电台站的一种形式,它是一种能在有限的无线电覆盖区中,通过移动通信交换中心,与移动电话终端之间进行信息传递的无线电收发电台。基站是移动通信中组成蜂窝小区的基本单元,完成移动通信网和移动通信用户之间的通信和管理功能<sup>[7, 8]</sup>。广义的通信基站是基站子系统(Base Station Subsystem, BSS)的简称。基站是移动通信网络的基础设施。

#### 1) 基站选址问题

在移动通信网络中,基站站址部署的好坏将直接影响无线网络性能和今后网络的发展。同时,对于工程建设,基站站址选择是否科学合理、能否获取合理的站点物业也将直接影响到工程建设进度、工程建设难度和工程建设投资。因此无线基站选址在网络建设中的作用相当重要<sup>[9, 10]</sup>。

3G 通信网络时代后期, 为了提升网络的覆盖性能, 扩建了大量的基站, 使得基站的分布较为稠密, 可用站址资源日趋紧缺。4G 通信网络系统迅猛的发展使得网络基站的分布更加稠密, 再加上人们环保意识的增强 (因担心辐射问题而反对在房屋附近建基站), 使得新基站的勘察和建设非常困难, 基站站址资源成为一类非常稀缺的资源。随着通信业务需求的剧增, 为了满足用户日益增长的应用需求而新增基站, 将面临着巨大的站址选择困难<sup>[11]</sup>。

移动通信基站的建设是移动通信运营商投资的重要部分, 在无线基站建设中, 必须考虑地形条件、道路交通状况、居民地分布情况等信息, 根据掌握的相关信息选择最合适的位置建设基站。基站选址对整个无线网络的质量和有着重要的影响, 因此在选址时应全面考虑覆盖面、通话质量、投资效益、建设难易、维护方便等要素。基站选址优化是无线通信网络优化的一个重要内容, 即在考虑信号质量、建设代价、覆盖约束和其他网络参数的情况下, 从大量的候选基站站址中选择极少的最佳候选站址作为要建基站的位置, 其目标是用较低的基站建设代价来获得一个高覆盖率的网络<sup>[12-14]</sup>。

## 2) 基站导频功率优化问题

导频技术可以有效地提高不同载频之间切换的成功率, 在网络优化中广泛应用, 比较常用的是伪导频, 实现方式有基站自提供方式、纯导频方式、易频方式。导频信道使得用户终端能够获得前向码分多址信道时限, 提供相干解调相位参考, 并且为各基站提供信号强度比较手段, 从而确定何时进行切换<sup>[15]</sup>。

在无线通信网络中, 基站通过公共导频信道 (Common Pilot Channel, CPICH) 宣布自己的存在。导频功率是下行功率的一部分, 与其他下行信道共同分享下行功率。由于发射机的功率是额定的, 所以, 导频功率占的比例大了, 就会减少其他下行信道的功率, 它们所支持的业务量就会受影响而减少。导频功率大一些的好处是覆盖区域会大, 小一些的好处是支持的业务能力大。若采用统一化导频功率配置方式, 即所有小区使用相同的导频功率, 从功率消耗的角度看, 这种导频功率配置方式使得网络系统性能变得很差。

另外, 统一化导频功率配置还会导致较大的网络总干扰、较大的超载小区面积和导频污染<sup>[16, 17]</sup>。因此, 优化导频功率对提高网络服务性能具有重要意义。

较为合理的导频功率配置方式, 应考虑各个小区的不同需求, 为每个小区基站配置不同的导频功率。在一个网络中人为地找到一个最优的导频功率配置方案是一件困难的事情, 尤其是在一个大型通信网络中。导频功率优化配置问题就是综合考虑各个小区的不同特征, 对所有小区基站的导频功率进行优化配置, 以满足整个接入网络覆盖区域和业务支持能力的需求。

## 1.2.2 异构网络的联合会话接纳选择控制和垂直切换判决问题

目前的无线通信网络中, 既有以宽带码分多址 (Wideband Code Division Multiple

Access, WCDMA)、码分多址 2000 版(Code Division Multiple Access 2000, CDMA 2000)和时分同步码分多址(Time Division Synchronous Code Division Multiple Access, TD-SCDMA)为代表的 3G 移动通信系统,又有正在逐步推广的 4G 移动通信系统,还有以 IEEE 802.11a/b/g、HiperLan/2、WiMAX (IEEE 802.16e)为代表的无线局域网/城域网(WLAN/WMAN)。由于各个系统所采用的无线接入技术(Radio Access Technology, RAT)不同,网络的接纳方式、管理架构和业务支撑方面均有所不同,从而构成了异构无线网络(heterogeneous wireless network)<sup>[18]</sup>。

无线通信网络的发展趋势不是建设一个崭新的、功能完善的网络,而是考虑如何将已经存在的网络与将要部署的网络有效地融合在一起,使其相互协调以保持移动终端在多种无线网络之间通信的连续性。目前,每种无线接入技术在容量、覆盖、数据速率和移动性支持能力等方面各有长短,任何一种无线接入技术都不可能满足所有用户的要求<sup>[19]</sup>。随着已有的无线接入技术向高级阶段演进,新型无线接入技术不断出现,它们之间相互补充、相互融合。未来移动通信网络的主要特征之一就是各种异构无线网络共存,它们相互补充、无缝集成到统一的网络环境中<sup>[20]</sup>。

### 1) 联合会话接纳选择

移动终端将拥有多个无线接口,具有接入不同网络的能力。但如何使用户会话接入最合适的接入网络?这是异构无线网络联合会话接纳控制要研究的主要问题。接纳控制是无线资源管理的重要功能,也是通信网络研究的热点问题之一。接纳控制技术实际上是一种预防性的流量控制手段,能有效地防止网络拥塞,并可提供一定的服务质量保证<sup>[21]</sup>。

同构网络中接纳控制用于决定一个呼叫是被接纳还是被拒绝。接纳的准则是:若在接收一个呼叫请求后,既能提供足够的资源用以保证该用户的服务质量(Quality of Service, QoS),又不影响现有用户的 QoS,则接纳该呼叫请求。异构无线网络中的会话接纳控制是针对异构无线通信系统的一种宏观资源管理,其目的是使用户业务在各个网络中合理分布,以削弱用户会话在时域(时间上)分布和空域(空间上)分布上的不平衡对异构系统所产生的不良影响,从而使负载尽可能地在各个无线网络中均衡分布<sup>[22]</sup>。

在公共无线资源管理(General Wireless Resource Management, GWRM)的概念中,联合会话接纳控制模块负责处理新到的会话请求,根据请求的业务类型、各个网络的性能状态以及用户和网络运营商的策略偏好等,决定是否接受和接入哪一个网络,即完成接入网络选择的过程<sup>[23]</sup>。

接入网络选择,就是在用户呼叫发起时刻或呼叫过程中,在考虑各个接入网络状态、移动终端状态、用户偏好等因素的基础上,通过一定的算法来保证把用户呼叫接入最佳接入网络中。其中,“最佳”的定义是由接入网络选择的获益与付出的代价共同构成的<sup>[24]</sup>。接入选择算法根据收集的网络状态、终端状态、业务需求、用户需求等信息,通过计算在需求信息和状态信息之间的最佳匹配,完成网络选择过程并给出选择结果。

无线资源管理功能由本地无线资源管理模块和联合无线资源管理模块两部分组成。本地无线资源管理模块负责管理同一个无线接入网络内部的资源分配。联合无线资源管理模块负责管理多个异构无线接入网络之间的无线资源分配。联合会话接纳控制属于联合无线资源管理的一个重要研究内容,其功能是把用户呼叫合理地分配到不同的接入网络中,从而实现整个异构网络系统的负载均衡。由此可见,联合会话接纳控制是提高接纳带宽资源利用率的有效手段,也是实现不同无线接纳网络之间负载均衡的有效途径。

## 2) 异构网络的垂直切换判决

切换(handoff, handover)又称越区切换、过区切换,是指在移动通信的过程中,在保证通信不间断的前提下,把移动台(又称移动终端)通信的信道从一个无线信道转换到另一个无线信道的过程。切换是移动通信系统不可缺少的重要功能。切换可以优化无线资源(频率、时隙、码)的使用,还可以及时减小移动台的功率消耗和对全局的干扰电平的限制。

移动台在相同通信系统的基站(扇区、信道)之间的切换称为水平切换(horizontal handoff)。水平切换包括硬切换(hard handoff)、软切换(soft handoff)和接力切换(relay handoff)等<sup>[25]</sup>。硬切换是在不同频率的基站或覆盖小区之间的切换。硬切换过程为:移动台先中断与原基站的联系,调谐到新的频率上,再与新基站取得联系,在切换过程中可能会发生通信短时中断。早期的全球移动通信系统(Global System for Mobile Communications, GSM)使用了硬切换方式。软切换是发生在同一频率的两个不同基站之间的切换。在码分多址移动通信系统中,采用的就是这种软切换方式。在软切换过程中,两条链路和相对应的两个数据流在一个相对较长的时间内被同时激活,一直到进入新基站并测量到新基站的传输质量满足指标要求后,才断开与原基站的连接。软切换主要用于 CDMA 系统中<sup>[26]</sup>。接力切换是一种基于智能天线的切换方案。接力切换利用精确的定位技术,在对移动台的距离和方位进行定位的基础上,将移动台的方位和距离作为辅助信息来判断移动台是否移动到了可进行切换的相邻基站临近区域。如果移动台进入这个切换区,则无线网络控制器通知该基站做好切换的准备,从而实现快速、可靠和高效切换。这样既节省信道资源、简化信令、减少系统负荷,也适应不同频率小区之间的切换。在 TD-SCDMA 标准(第三代移动通信标准之一)中采用了接力切换。

移动台在不同通信系统的基站(扇区、信道)之间的切换就称为垂直切换(vertical handoff)<sup>[27]</sup>。异构无线通信系统的特征是多种无线接入技术并存、相互补充。不同的接入技术在带宽、传输时延、覆盖范围和移动性支持能力等方面存在差异,没有一种单一的无线网络能够同时满足广覆盖、低时延、高带宽、低成本等要求,无线网络间的互通和融合成为必然。异构无线网络融合的场景对切换控制的设计提出了新的挑战<sup>[28]</sup>。在异构网络融合场景下,不同的接入技术在接收信号强度方面不具有可比性,水平切换机制所采用的基于接收信号强度的切换策略不适合垂直切换。垂

直切换是异构无线网络融合的基础,因此需要针对异构网络环境的特点对垂直切换进行深入的研究<sup>[29]</sup>。

垂直切换与水平切换有着本质的不同。水平切换大多发生在两个小区的边缘,由于原小区的信号质量下降,为了防止通话中断而切换至另一个临近的小区中。而垂直切换的存在意义不仅是网络的“延伸”,还在于如何使用户总是处于“最优”的网络中,从而为用户带来更好的网络使用体验。可能一个用户可以同时处于两个信号质量都很好的网络中,如何使用户选择最佳网络便是垂直切换的一个任务<sup>[30]</sup>。传统的水平切换大多通过信号质量作为基本参数来进行切换判决,而垂直切换需要根据许多参数,如信号强度、终端移动速度、正在进行的业务、网络的 QoS、带宽等从整体上进行平衡,根据一定的算法,使用户的满意度最大。

垂直切换是保证无线业务在异构网络环境下连续性的有效手段,同时也是调整各个无线接入网络负载分布的有效方法。垂直切换分为 3 个阶段,即网络发现、切换判决和切换执行。垂直切换判决问题就是,在切换判决阶段,利用切换判决算法从多种候选接入网络中选出最合适的目标网络<sup>[31]</sup>。

### 1.2.3 认知无线网络中的资源分配问题

由于无线通信网络和各种无线电技术的快速发展和广泛应用,无线频谱资源稀缺的问题日益突出<sup>[32]</sup>。在目前的静态无线频谱资源分配模式下,资源短缺和浪费共存。认知无线电是一种智能的频谱共享技术,其核心思想是在不影响授权用户(也称为主用户)正常通信的情况下,非授权用户(也称为次用户)可以有机会接入空闲频谱,提高频谱资源的利用率。认知无线网络的主要特点是频谱资源通过“频谱机会”进行接入<sup>[33]</sup>。由于获得的频谱资源具有异质性和时变性;所以需要通过先进的无线资源管理技术对频谱资源进行有效管理。无线资源管理围绕频谱的有效利用展开,主要包括频谱决策、频谱分配、功率控制、资源调度等<sup>[34, 35]</sup>。无线资源管理是认知无线网络中的重要一环,是认知无线网络提供可靠通信服务的关键。认知无线网络中,可用频谱、网络结构和用户需求都是动态变化的。此外,授权用户对频谱的使用具有绝对的优先权,即认知用户对授权用户是透明的。所有这些特点都对频谱分配等无线资源管理算法提出了更高的要求。

#### 1) 认知无线网络中的频谱分配问题

频谱分配主要研究如何对感知到的频谱资源进行优化分配。由于频谱资源有限,不同的次用户需要竞争使用这些资源,如何分配资源才能得到最大的收益以及如何保证次用户的服务质量需求都是值得研究的问题。

目前,频谱分配技术的分类有多种。按频谱接入分类,可以分为完全受限频谱分配和部分受限频谱分配;按网络结构分类,可以分为集中式频谱分配和分布式频谱分配;按合作方式分类,可分为合作式频谱分配和非合作式频谱分配<sup>[36, 37]</sup>。文献[38]对频谱分配问题进行了详细介绍。这些分配机制经常需要联合起来考虑,针对特定的系

统模型或具体的应用场景提出具体的解决方案,如集中式完全受限频谱分配、基于合作的分布式完全受限频谱分配。相比之下,每个认知用户都执行分配算法的分布式频谱分配技术,更适合于认知无线网络中空闲频谱时变的环境。因此,本书主要研究基于合作的分布式完全受限频谱分配算法,主要基于图着色模型实现。

## 2) 认知无线网络中的频谱决策问题

频谱决策是认知无线网络中无线资源管理的主要研究内容之一,是接入控制和频谱分配的基本前提。其目标是在频谱分析过程中得到的各种可用特征参数的基础上,根据当前认知用户的传输需求,从中优化选择合适的工作频谱<sup>[39]</sup>。

根据优化方式关注的用户范围不同,可以分为本地频谱决策和全局频谱决策;根据网络结构,可分为集中式频谱决策和分布式频谱决策;根据认知用户之间是否采用公共控制信道,可分为无公共控制信道频谱决策和有控制信道的频谱决策。本地频谱决策一般针对单个认知用户的优化目标进行,一般适用于非合作频谱决策方式,而全局频谱决策通过合作频谱决策实现。分布式频谱决策中的每个认知节点可以看成拥有独立认知引擎的节点<sup>[40,41]</sup>,因此,基于认知引擎的集中式频谱决策得到了更为广泛的关注,其中基于 IEEE 802.22 标准的 WRAN (Wireless Regional Area Network) 使用空闲的广播电视信道提供宽带接入,是目前最为典型的认知无线网络之一。本书关注集中式网络结构下的认知无线网络频谱决策问题。

## 3) 认知无线网络中的正交频分复用资源分配问题

认知无线网络中,使用机会频谱接入时,物理层传输技术是一个关键技术<sup>[42]</sup>。正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术由于其自身的优势,成为认知无线网络传输技术的一个主流技术。如何对认知多用户 OFDM 系统中的子载波和功率进行分配,最大化系统总的吞吐量,以提高频谱利用率,是一个值得研究的问题<sup>[43]</sup>。

在认知无线网络中,最重要的是对资源从不同角度进行理解和划分,如对空间域、时间域、频率域进行多重复用,进而根据不同的环境变化和用户需求,提高对资源的利用率,达到增加系统容量的目的。OFDM 技术是认知无线网络传输层的主要实现技术之一。认知 OFDM 资源分配技术主要有基于 OFDM 的子载波分配技术、功率控制技术、联合资源分配技术等<sup>[44,45]</sup>。

(1) 基于 OFDM 的子载波分配技术。认知 OFDM 网络中,当感知到可用的频谱资源后,将同时获取所有认知用户在可用频谱上的信道衰落特性和整个功率覆盖范围内的授权用户信息。使用 OFDM 技术可以把信道划分为许多子载波。在频率选择性衰落信道中,不同的子信道受到不同的衰落而具有不同的传输能力。在多用户系统中,某个用户不适用的子信道对于其他用户可能是条件很好的子信道。因此,可根据信道衰落信息充分利用信道条件较好的子载波,以合理利用资源,获得更高的频谱效率<sup>[46]</sup>。

(2) 功率控制技术。认知无线网络下实现频谱共享的基本前提是不能干扰主用户