

单位代码： 10293 密 级：

南京邮电大学
硕士学位论文



论文题目： 基于多网络接入的无线网络选择算法研究

学 号 1013010213
姓 名 张 硕
导 师 朱 琦
学 科 专 业 通信与信息系统
研 究 方 向 移动通信与无线技术
申请学位类别 工学硕士
论文提交日期 2016年3月

Research on Multi-access Network Selection Methods in Heterogeneous Wireless Networks

Thesis Submitted to Nanjing University of Posts and
Telecommunications for the Degree of
Master of Engineering



By

Zhang Shuo

Supervisor: Prof. Zhu Qi

March 2016

南京邮电大学学位论文原创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京邮电大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

本人学位论文及涉及相关资料若有不实，愿意承担一切相关的法律责任。

研究生签名：_____ 日期：_____

南京邮电大学学位论文使用授权声明

本人授权南京邮电大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档；允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索；可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编本学位论文。本文电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。论文的公布（包括刊登）授权南京邮电大学研究生院办理。

涉密学位论文在解密后适用本授权书。

研究生签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

摘要

异构无线网络发展的差异性与多样性使得异构网络融合成为下一代无线网络发展的趋势。异构网络融合就是将现有的与未来将要出现的多种无线接入技术有机地融合在一起，满足未来用户对于不同业务类型的需求。网络选择算法作为实现异构网络融合和调度无线网络资源的关键技术，旨在为用户提供满意的服务质量，成为目前通信领域的一个研究热点。

多属性决策作为统筹多种因素的决策方法已得到广泛应用，本文在多属性决策算法的基础上提出了一种基于群组决策的异构无线网络选择算法。该算法利用四种不同的多属性权重确定方法求解权重向量，并基于群组决策理论，对四种权重向量进行组合从而获取一个综合权重向量。满足相容性要求的权重向量将结合简单排序法进行网络选择。该算法通过组合多个权重向量，可以充分考虑网络客观属性、用户偏好以及业务类型需要。仿真结果表明，该算法可以为用户提供满意的服务质量。

在异构无线网络场景下，本文提出了一种基于灰色关联分析的多网络接入选择算法。该算法根据接收信号强度与网络接入可能性分别确定可接入网络集和目标网络集集合，通过计算每个目标网络集的吞吐量、接入代价、功能损耗与网络负载等参数构建网络属性矩阵，结合权重向量，形成多属性决策问题，最后，采用灰色关联分析算法解决此问题。仿真结果表明，与单网络和其他多属性多网络接入算法相比，本文所提出的多网络接入算法可以明显提升网络性能，针对不用权重向量，为用户提供满意的服务质量。

为实现无线资源的高效利用，本文提出了一种基于生灭过程的异构网络多接入的优化方法。该方法采用生灭过程来分析异构网络的系统性能，充分考虑了用户的移动性，基于吞吐量和网络接入率构建了异构网络系统的联合效用模型。通过合理分配异构网络重叠区域内接入不同类型和多种网络的用户比例来最大化系统联合效用，采用次梯度方法对优化问题进行求解。仿真结果表明，该方法能够有效提升异构网络系统的联合效用，使得无线资源的分配更加有效。

关键词：异构网络选择，网络融合，无线资源管理，多属性决策，多网络接入

Abstract

The difference and diversity of heterogeneous wireless networks lead the integration of heterogeneous network to be the developing trend of the next generation wireless networks. Network integration implements a variety of wireless access technology organically, including the existing and the future ones, to meet users' demand for various traffic classes in the future. As the key technology of heterogeneous network integration and wireless resource management, network selection algorithm aims at providing users with satisfactory quality of service and is becoming a hot research topic in the field of communication.

The theory of multiple attribute decision making has been widely used in heterogeneous network selection. Based on the previous multiple attribute decision making algorithms, a new heterogeneous network selection method is proposed in this thesis. The algorithm, which is based on group decision theory, combines weight vectors of multiple attribute decision to obtain a comprehensive weight vector. Then the compatibility of results will be assessed. The judgment matrix should be modified until a comprehensive vector that satisfies compatibility requirements is produced. Then it will be combined with simple weighting method for network selection. By combining multiple weight vectors, the algorithm is capable of giving full consideration to the objective attribute of network, user preferences and traffic classes. The simulation results show that the algorithm can provide users with satisfactory quality of service.

Based on access to multiple networks simultaneously, a new heterogeneous network selection method is put forward. From the view of mobile terminal, overall planning is carried on in the multi-access module. According to the received signal strength and access possibilities, the available network set and target network set are determined respectively. The calculation of throughput, access cost, power consumption and load balance parameters is combined with the weight vector to form a new multiple attribute decision making problem. Finally, the grey relation analysis is adopted to solve the problem. The simulation results demonstrate that, comparing to the single network selection and other multi-access method, the proposed algorithm would significantly improve network performance with different weight vectors.

To further enhance the system performance of the heterogeneous network selection algorithm, a birth and death process enhanced utility optimization method for multi-access selection in heterogeneous wireless network is put forward in this thesis. The method adopts the birth and death

process to analyze the system performance, fully consider users' mobility and then obtains network joint utility optimization mode. To maximize the joint utility, the proportions of different multi-access selections in heterogeneous wireless network overlapping region should be well arranged. The Subgradient method is adopted for obtaining the best proportions for solving this optimization problem. The simulation results show that the method can maximize system utility, effectively improve throughput and make the radio resource allocation more efficient.

Key words: Heterogeneous network selection, Heterogeneous network fusion, Radio resource management, Multiple attribute decision making, Multiple network access, Joint utility, Subgradient method.

目录

专用术语注释表	VI
第一章 绪论	1
1.1 无线移动通信的发展趋势	1
1.1.1 移动通信网络的发展	1
1.1.2 无线接入技术	3
1.2 研究背景	4
1.3 论文主要工作及内容安排	6
第二章 异构无线网络融合技术与网络选择算法	8
2.1 异构无线网络融合所涉及的技术问题	8
2.1.1 异构无线网络融合架构	9
2.1.2 异构无线网络资源管理	10
2.1.3 异构无线网络移动性管理	12
2.1.4 异构无线网络选择算法	13
2.2 异构网络选择算法及研究现状	13
2.2.1 基于单一网络参数的网络选择	13
2.2.2 基于多属性决策理论的网络选择	14
2.2.3 基于模糊逻辑与神经网络理论的网络选择	15
2.2.4 基于博弈论的网络选择	16
2.2.5 基于最优化策略的网络选择	16
2.2.6 基于多网络接入的网络选择	17
2.3 本章小结	17
第三章 基于四种权值向量的异构无线网络群组决策算法	19
3.1 引言	19
3.2 系统模型	19
3.3 权重向量的确定	21
3.3.1 熵权法确定客观权重	22
3.3.2 CRITIC 法确定客观权重	23
3.3.3 AHP 法确定主观权重	24
3.3.4 G-1 法确定主观权重	28
3.4 群组决策及相容性理论	29
3.4.1 群组决策及综合权重的确定	29
3.4.2 相容性检验	30
3.4.3 算法流程	31
3.5 仿真结果分析	33
3.6 本章小结	36
第四章 基于灰色关联分析的多网络接入算法	37
4.1 引言	37
4.2 多网络接入系统模型	38
4.3 基于灰色关联分析的多网络接入异构网络选择算法	40
4.3.1 异构网络多属性决策问题的建立	40
4.3.2 最佳网络集合的确定	44
4.3.3 算法步骤	45
4.4 仿真与性能分析	47

4.4.1 仿真场景	47
4.4.2 仿真结果分析	48
4.5 本章小结	52
第五章 基于生灭过程的多网络接入的优化算法	53
5.1 引言	53
5.2 异构网络系统模型和稳态方程	54
5.3 基于生灭过程的异构网络多网络接入优化算法	56
5.3.1 构建系统效用方程	56
5.3.2 系统效用凸优化问题的证明	59
5.3.3 凸优化问题的求解	62
5.3.4 算法框图	64
5.4 仿真与结果分析	65
5.4.1 阻塞率上下限	65
5.4.2 仿真结果	66
5.5 本章小结	73
第六章 总结与展望	74
6.1 本文总结	74
6.2 未来研究工作	75
参考文献	77
附录 1 程序清单	81
附录 2 攻读硕士学位期间撰写的论文	82
附录 3 攻读硕士学位期间申请的专利	83
附录 4 攻读硕士学位期间参加的科研项目	84
致谢	85

专用术语注释表

符号说明:

x_{ij}	第 i 个网络的第 j 个属性值
r_{ij}	第 i 个网络的第 j 个属性标准化值
H_j	第 j 个属性的信息熵
w_j	第 j 个属性的权重
W	权重向量
σ_j	第 j 个属性的标准差
b_j	第 j 个属性相对于第 $j-1$ 个属性的重要程度
λ	特征值
CR	一致性比率
RI	平均随机一致性指标
CI	一致性指标
$C_L(A,B)$	矩阵 A 和 B 的相容度
$S_l(A,B)$	矩阵 A 和 B 的相容性指标
\overline{S}_1	相容性指标门限
P	状态转移概率
A	特征矩阵
$RSS^{threshold}$	接收信号门限值
a_i	网络 i 连接指示
α_i	第 i 个网络的吞吐量利用率
N	高斯白噪声功率
C_i^{Total}	网络 i 的总信道数
C_i	网络 i 的可接入信道数
PC_i^{minT}	移动终端对网络 i 基站的最小发射功率
PC_i^{minR}	移动终端对网络 i 基站的最小接收功率
β	功率转换系数
PC_i^{Trans}	满足网络 i 接收门限的最小信号传输功率
$P(X)$	网络参数空间
Q	影响空间
GRC	灰色关联系数

λ^h	用户切换率
d	网络覆盖半径
v	终端平均移动速度
λ_j^i	网络 j 从状态 i 转移到状态 $i+1$ 的出生率
$\overline{\lambda_j^h}$	网络 j 的平均切换率
μ_j^i	网络 j 从状态 i 转移到状态 $i-1$ 的死亡率
M_j	网络 j 稳态下的平均用户数
P_j^b	网络 j 的网络阻塞率
P_j^{nb}	网络 j 的网络接入率
p_s^{nb}	系统接入率
\overline{p}	网络接入比例向量
$T(\overline{p})$	单位代价吞吐量
$A(\overline{p})$	系统接入率
$U(\overline{p})$	系统效用值
$\overline{p}^{(0)}$	网络接入比例初始化因子
λ_0	业务到达率
R_i	网络 i 的信道带宽

缩略词说明:

ABC	Always Best Connected	始终最佳连接
AC	Available Channel	网络可用信道
AHP	Analytical Hierarchy Process	层次分析法
AMPS	Advanced Mobile Phone Service	高级移动电话业务
CDMA	Code Division Multiple Access	码分多址
CRRM	Common Radio Resource Management	协同无线资源管理
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect	载波监听多路访问/冲突访问检测
EDGE	Enhanced Data Rate for GSM Evolution	增强型数据速率 GSM 演进技术
ELECTRE	Elimination and Choice Translating Priority	淘汰选择法
EW	Entropy Weight	熵权法
FDD	Frequency Division Duplexing	频分双工
FDMA	Frequency Division Multiple Access	频分多址

GPRS	General Digital Packet Data	分组无线业务
GRA	Grey Relational Analysis	灰色关联分析
GSM	Global System for Mobile	全球数字移动通信系统
ICM	Interface Control Module	接口控制模块
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	美国电子与电气工程师标准化协会
IPM	Information Process Module	信息处理模块
ITU	International Telecommunication Union	国际电信联盟
JRRM	Joint Radio Resource Management	联合无线资源管理
LTE	Long Term Evolution	长期演进计划
MACM	Multi-Access Control Module	多接入控制模块
MADM	Multiple Attribute Decision Making	多属性决策
MAHO	Mobile Assisted HandOver	终端协助性切换
MCHO	Mobile Controlled HandOver	终端控制的切换
MEW	Multiplication Exponent Weighting	乘数指数加权法
MRRM	Multi-access Radio Resource Management	多接入无线资源管理
NCHO	Network Controlled HandOver	网络控制的切换
OFMD	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
OSI	Open System Interconnection	开放系统互连
QoS	Quality of Service	服务质量
RAN	Radio Access Network	无线接入网络
RAT	Radio Access Technology	无线接入技术
RFID	Radio Frequency Identification	无线射频识别
RRM	Radio Resource Management	无线资源管理模块
RSS	Received Signal Strength	接收信号强度
SAW	Simple Additive Weighting	简单加权法
SDR	Software Defined Radio	软件无线电
SIG	Bluetooth Special Interest Group	蓝牙特殊兴趣小组
SNR	Signal to Noise Ratio	接收信噪比
TACS	Total Access Communications System	全入网通信系统
TDD	Time Division Duplexing	时分双工
TDMA	Time Division Multiple Access	时分多址
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution	接近理想方案的序数偏好方法

UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	通用移动通信系统
UNIM	User and Network Information Module	用户与网络信息模块
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access	宽带码分多址
WEI	Word Error Indicator	误码率
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access	全球微波互联接入
WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网
WPAN	Wireless Personal Area Network	无线个域网
WWAN	Wireless Wide Area Network	无线广域网

第一章 绪论

1.1 无线移动通信的发展趋势

1.1.1 移动通信网络的发展

经历一百多年的历史，无线移动通信技术由发明、发展到逐渐成为人们通信的主要手段，取得了丰硕的成果。无线移动通信技术的迅猛发展与移动终端设备的技术革新为用户提供了完整的个人移动性与可靠的信息传输途径。如图 1 所示，回顾移动通信的发展历程，从模拟通信到数字通信，再到如今正处于研发当中的第五代移动通信技术，移动通信网络正朝更高带宽更快速率的方向高速前进。

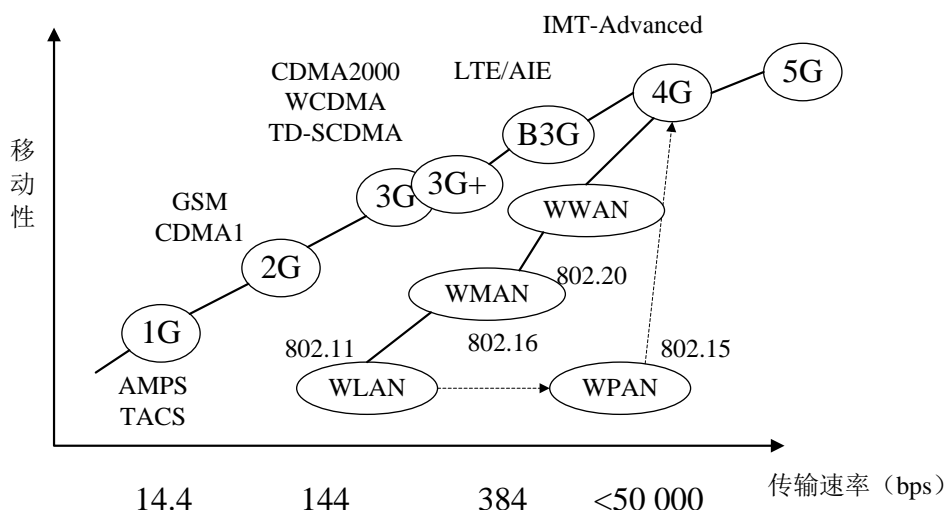


图 1.1 无线移动通信发展历程

基于模拟通信技术与频分多址技术 (Frequency Division Multiple Access, FDMA) 的第一代移动通信系统 (1G) 于上世纪七十年代末期在全世界各国展开运营，如美国的 AMPS 系统，欧洲的 TACS 和 NMT 系统等。第一代移动通信系统的传输速率约为 2.4kbit/s，它为当时用户的通信带来了极大的便利。但模拟蜂窝网络同样暴露了许多问题，如频率带宽利用率低，容量有限，通话服务质量差，保密性不理想，同时，终端设备复杂且昂贵。随着移动用户的增多，第一代移动通信逐渐无法负担，于是第二代移动通信系统 (2G) 应运而生。

第二代移动通信系统可以追溯到上世纪九十年代，2G 技术最成功的典范为 GSM 和 IS-95 CDMA，二者当中，GSM 被更早提出并得以在世界范围内广泛应用。GSM 采用时分多址技

术 (Time Division Multiple Access, TDMA) 和频分多址技术, 而采用码分多址技术 (Code Division Multiple Access, CDMA) 的 IS-95 CDMA 主要在北美地区被推广使用。与第一代移动通信系统相比, 2G 技术提升了频谱利用效率。同时基于数字系统, 2G 可以获得更大的系统容量和更小的信号间干扰, 低速的数据得以在 2G 系统中传输。为了满足用户对更高速率数据业务的需求, 移动通信系统引入了分组无线业务 (General Digital Packet Data, GPRS) 从而使其升级为 2.5G 甚至 2.75G (EDGE)。然而, 第二代移动通信系统无法提供多样的业务类型, 无法支持多媒体应用, 不同地区的技术标准阻碍了实现全球漫游的可能。

第三代移动通信系统 (3G) 是无线通信与多媒体通信的结合。3G 系统可以处理多种类型的媒体格式, 如图片、音乐、视频等; 同时, 它可以支持中高速数据业务和多媒体通信, 如电话会议、电子商务等。为支持不同的业务类型与多媒体应用, 3G 系统要求提供不同的数据传输速率, 即室内环境、室外步行环境与室外车辆环境下, 数据传输速率应当分别达到至少 2Mbps、384Kbps 和 144Kbps。国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 确定的 3G 无线接入系统主流的标准有 WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA, 这些标准均采用码分多址技术。异步宽带 CDMA 技术, 即 WCDMA, 在欧洲通常被称为通用移动通信系统 (Universal Mobile Telecommunication System, UMTS)。UMTS 网络采用统一的核心网络架构, 可以工作在 FDD 和 TDD 两种模式下。其中, 工作在 FDD 模式下时使用 WCDMA 接入网, TD-SCDMA 为中国提出的 3G 标准, 采用 TDD 双工方式。CDMA2000 则是由美国高通公司基于 CDMAONE 数字标准发展而来并在北美地区推广使用的第三代移动通信系统, CDMAONE 则可以直接升级成为 CDMA2000 系统。相较于前两代移动通信系统, 3G 在全球标准化方面取得了巨大的提升, 如全球化统一的频谱分配使得无缝覆盖与全球漫游真正成为可能。同时, 3G 进一步提升了频率利用效率, 拥有根据用户请求与业务类型自主分配带宽的能力和更好的网络安全性能。

为了应对其他宽带无线接入技术对 3G 技术和市场的冲击, 3GPP 组织启动了 3GPP LTE(Long Term Evolution)的研究工作, 国际电信联盟 (ITU) 称之为后三代移动通信 (Beyond IMT-2000, B3G), 它也成为目前实质上的第四代移动通信系统 (4G)。如今 4G 技术已经在全世界范围内推广商用, 当前主流的 4G 标准有 TD-LTE 和 FDD-LTE。4G 系统基于正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)、软件无线电 (Software Defined Radio, SDR) 等技术, 采用全 IP 核心网。正交频分复用技术可以有效提升频率利用率, 保证数据高速传输, 同时, 它具有较强的抗衰落和抗干扰能力。而全 IP 网络则实现了网络层面的无缝连接, IPv6 的采用为移动终端设备提供了更大的地址空间。4G 系统在数据传输速率方面同样提

升明显，100Mbps 的传输速率保证了视频与图像不受时延和抖动影响连续传输。此外，多项多媒体业务同时进行也在 4G 时代成为可能。然而，高速移动环境下的数据传输问题在 4G 时代没能彻底解决。

第五代移动通信系统（5G）^[1]如今正处在研究阶段，预计在 2020 年开始使用。经历四代移动通信发展的历程，尤其在第四代移动通信当下基本可以满足用户需求的前提下，5G 系统的技术标准还没有形成。但可以肯定的是，支持更多的业务、服务类型，更加充分满足信息社会发展需求是 5G 系统必须要满足的条件。更高的带宽、更快的传输速率、更低廉的费用、更低的能耗，更强的可靠性与安全性等将引领出新一代移动通信系统。

1.1.2 无线接入技术

美国电子与电气工程师标准化协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers）^[2]制定的 IEEE 802 系列无线接入技术，目前已经成为被广泛接受的接入网标准，其中涉及的主要无线接入技术的标准有 IEEE 802.11，IEEE 802.15，IEEE 802.16 等。

IEEE 802.11 标准是使用非常广泛的无线局域网（Wireless Local Area Network, WLAN）技术。较早提出的 IEEE 802.11a 经过多年发展如今已经非常稳定成熟，为进一步提升性能，随后提出的 IEEE 802.11b 标准，工作在 2.4GHz 频段，峰值传输速率可以达到 11Mbps。而之后提出的工作在相同频段的 802.11g 标准则将数据传输速率的峰值提升到 54Mbps。除数据业务之外，语音业务也可以在 WLAN 技术支持下保证优质的服务质量（Quality of Service, QoS），其中，IEEE 802.11e 标准就是为语音业务专门提出的。基于 IEEE 802.11a 标准，在欧洲国家广泛使用的 IEEE 802.11h 标准增加了一些灵活的设置使得系统可以动态调节频率从而减小系统间干扰。除此之外，为车载通信设置的 IEEE 802.11p 标准、如今广泛使用的 IEEE 802.11n 标准等，与上述标准一起组成了 IEEE 802.11 协议族。与同属于短距离无线通信范畴的无线个人区域网（Wireless Personal Area Network, WPAN）相比，WLAN 技术拥有更大的覆盖范围和可靠的数据传输速率。而相较于无线城域网（Wireless Metropolitan Area Network, WMAN），WLAN 虽然覆盖范围不足，但服务更加灵活便捷，更好的商业推广使得其资费更具优势。

IEEE 802.15.1 是蓝牙技术的标准化版本。蓝牙特殊兴趣小组（Bluetooth Special Interest Group, SIG）完成绝大多数的技术工作并得到 IEEE 的认可。最初的 IEEE 802.15.1 标准对应于蓝牙 1.1；IEEE 802.15.1a 则是蓝牙 1.2 采用的标准，相较于前期版本，蓝牙 1.2 提升了服务质量。最新版本的蓝牙 4.0 工作在 2.4GHz，覆盖半径大约在 10m 左右。在覆盖区域内，蓝牙设备可以任意连接彼此并可以以 1Mbps 的速率同时传送语音与数据。相较于 WLAN，蓝牙技

术传输距离更短，数据传输速率更低，因此，蓝牙技术更多地应用在更短距离设备的连接与通信。作为 WPAN 技术之一，与无线城域网甚至无线广域网（Wireless Wide Area Network, WWAN）技术有很大的区别，规避了它们之间的竞争。

IEEE 802.15.4 标准主要研究低速无线个域网（Low-Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN），旨在提供低能耗、低传输速率、低代价的各类便携设备的网络互连与通信。基于开放系统互连模型（Open System Interconnection, OSI），IEEE 802.15.4 仅包含物理层与数据链路层。采用 IEEE 802.15.4 标准的低速无线个域网支持三种固定传输速率、支持星形与点对点的网络拓扑、两种地址格式，采用载波监听多路访问/冲突访问检测方法（Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect, CSMA/CD）。基于 IEEE 802.15.4 标准的商业技术有很多，如 ZigBee, WirelessHART（High Addressable Remote Transducer Protocol）和个人热点 MiWi 等。这些技术当中，ZigBee 技术提出仅仅数年，但发展迅速，如今更是在无线传感器领域发挥重要作用。除此之外，ZigBee 与无线射频识别技术（Radio Frequency Identification, RFID）均成为发展迅速的物联网行业的基础通信技术。

IEEE 802.16 标准被美国电子与电器工程师协会命名为无线城域网，而在商业上被称为全球微波互联接入（Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX）^[3]。作为一种新型的无线宽带接入技术，WiMAX 可以提供高速的互联网连接，覆盖距离最远可以达到 50km。2007 年，国际电信联盟将 WiMAX 技术列为第四个 3G 标准，为其获取全球统一频谱扫清了障碍。全球微波互联接入技术基于正交频分复用技术，拥有非视距传输能力，可以有效降低衰落与多径效应的影响。覆盖面积最多可以达到一般 3G 基站的 10 倍，数个 WiMAX 基站便可以覆盖整个城市。相比于其他无线接入技术，WiMAX 拥有统一的技术标准，使得 WiMAX 设备即使工作于不同频段依然可以在同一系统工作。802.20 标准作为一种无线广域网技术，工作在 3.5GHz 的许可频段以下，单小区覆盖半径可达 15km。除上述无线接入技术之外，拥有不同技术标准、不同市场定位的技术标准还有很多，推动移动无线网络进一步发展。

1.2 研究背景

1.1.1 小节与 1.1.2 小节分别介绍了移动通信与无线技术的发展过程与趋势，结合图 1.1，纵观两条发展脉络，当无线通信技术发展到 4G 甚至于向下一代无线通信技术发展时，上述大部分无线通信技术还将继续存在，如已经商用的 4G 系统依然保留 GSM 系统提供语音服务等。这是因为无线通信技术的更替需要时间与过程，一种新技术的产生并不意味着旧技术完

全被取代，不同的无线通信技术在带宽、传输速率、时延、安全性、抖动、能耗、市场定位等方面竞争与差别共存，因此多种无线通信技术共存的局面将长期存在。不同无线通信技术在很多区域相互重叠覆盖，组成一种新的无线网络的混合模型，这就是异构无线网络。图 1.2 给出了一种异构网络场景图，该场景下，三种异构网络重叠覆盖，为用户提供不同服务。

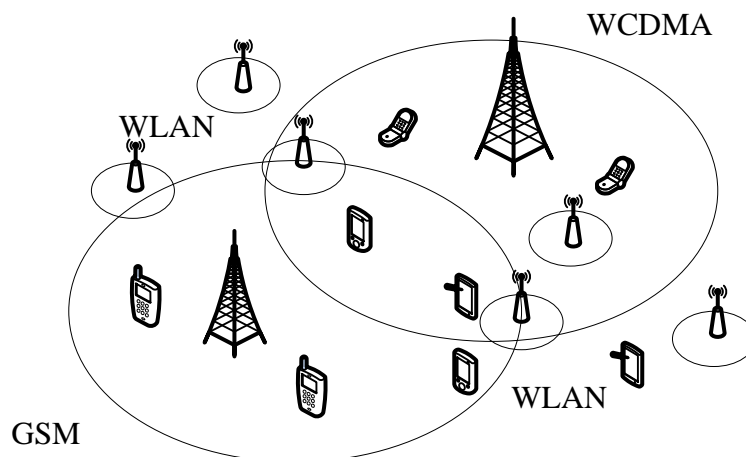


图 1.2 异构网络场景

当前对于异构无线网络的研究主要有：从系统角度出发，研究异构无线网络的总体架构，并对框架划分具体功能模块；研究实现异构网络融合涉及的各种问题与策略，比如网络发现，位置更新，垂直切换，移动性管理等^[4]。在异构无线多接入环境下，充分整合网络资源可以为用户连接实现无缝连接与垂直切换。异构无线网络实现融合要解决的问题有很多，譬如，不同移动网络的运营商之间要充分合作使得用户可以自由地在不同的异构网络之间切换，从而保证用户更佳的网络服务质量。而从用户角度出发，在任何时间任何地点，用户对于通过异构无线网络接入因特网的需求日渐提升。在此条件下，异构网络融合作为充分整合异构无线网络资源，为用户提供更好的服务质量的关键技术则显得更加重要。

在多种异构无线网络重叠覆盖的区域内，对于初始到达的用户或者不断移动的用户来说，在任何时间任何地点，选择合适的异构无线接入网络始终保持最佳连接状态（Always Best Connected, ABC），可以满足自身需求并获得更优质的无线通信服务。ABC 包含许多重要的问题，比如网络发现，网络选择，切换执行等^[5]。而在这些问题当中，网络选择即无线接入机制是实现 ABC 的关键因素，因此本文将重点进行研究与探讨。

异构网络选择算法经过多年研究，如今已经取得了一定的成果。研究者将管理学、经济学模型与理论等各类学科理论应用于此研究领域，大大推进了无线资源管理研究的多样化进程。如基于多属性决策、博弈论、模糊逻辑、神经网络、优化方法等理论的单网络选择算法。随着可选网络的增多，以及多模移动终端技术的提升，单个移动终端同时接入多个异构无线

网络来提升用户服务质量将慢慢变为现实，并逐渐成为异构无线网络接入的研究趋势。然而，基于多网络选择的研究目前仍然处于起步阶段，因此，在进一步完善单网络选择算法的基础上，本文将重点研究基于多网络选择的网络选择算法。

1.3 论文主要工作及内容安排

异构网络融合作为充分调度异构无线网络资源的方式涉及的问题很多，而无线网络接入机制作为其中重要的一个环节需要充分展开研究。为移动终端确定最合适的异构无线网络需要考虑的因素很多，比如带宽、传输速率、时延、抖动、能耗、代价等等。充分考虑上述因素，做出最恰当的决定，本文分别从单网络接入条件下多属性决策权重的确定，多网络接入时多属性排序方法以及联合效用优化角度来研究异构网络选择算法。

本文分为六章，具体安排如下：

第一章首先从移动通信网络的发展过程以及无线接入技术的发展两条脉络对异构无线网络产生的原因做了铺垫性的阐述，通过介绍课题研究背景，对本文课题研究的必要性进行了分析；

第二章主要阐述了异构网络互连互通方案，异构网络融合所涉及的异构网络架构研究、无线资源管理、移动性管理与垂直切换与网络选择等问题，并且分析了异构无线网络中的接入选择策略的研究现状；

第三章在多属性决策算法的基础上提出了一种基于群组决策的多属性异构无线网络选择算法。该算法利用四种不同的多属性权重确定方法求解权重向量，并基于群组决策理论，对四种权重向量进行组合从而获取一个综合权重向量，满足相容性要求的权重向量将结合多属性决策简单排序法执行网络选择工作，最后，分别针对四种不同的业务类型对算法性能进行仿真和分析；

第四章研究了基于多网络连接的多属性排序异构网络选择算法。首先对移动终端从单网络连接过渡到多网络并行连接的技术的可行性进行了分析，根据接收信号强度来区分可以接入的异构无线网络并构建网络可连接集合，通过分别考虑各个网络的接收信号强度、网络负载、功率损耗、带宽以及代价情况，并结合一种多属性排序方法对可连接网络集合进行排序，从而选择出最佳的接入网络，最后通过仿真证明了算法的有效性；

第五章提出了一种基于生灭过程的异构网络多接入的优化方法。该方法采用生灭过程来分析异构网络的系统性能，充分支持用户的移动性，从而获取异构网络系统的联合效用表达式；该方法通过合理分配异构网络重叠区域内接入不同类型和多种网络的用户比例来最大化

系统联合效用，采用次梯度方法对优化问题进行求解，仿真表明该方法有效提升了异构网络系统的联合效用和吞吐量。

第二章 异构无线网络融合技术与网络选择算法

无线通信网络未来的发展趋势不再仅仅意味新技术更替旧技术，现存的无线接入技术各有特点，任何无线网络都无法满足用户所有需求。因此，要充分考虑当前已经存在的多种无线网络的互联互通，各种无线技术相互补充，从而走向异构网络的融合。本章将对为实现网络融合所面临众多问题进行阐述，同时，异构网络接入选择机制作为实现异构网络共存与“始终最佳连接”目标的关键技术，本章将重点分析其研究现状。

2.1 异构无线网络融合所涉及的技术问题

图 2.1 给出了一种异构无线网络融合的结构^[6]，图中不同的异构网络，通过网关连接到同一个核心网，借此来连接至因特网，从而实现各个异构网络的融合。然而，为实现多种异构无线网络的融合面临的问题和挑战很多，主要包括融合架构研究、资源管理、移动性管理、垂直切换与网络选择等，如图 2.2 所示，本节将分别对这些主要问题进行讨论。

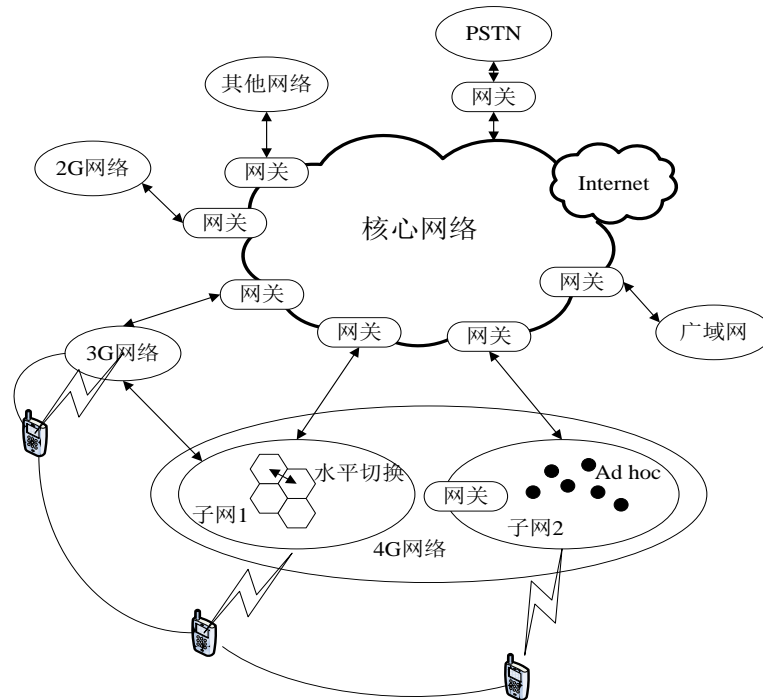
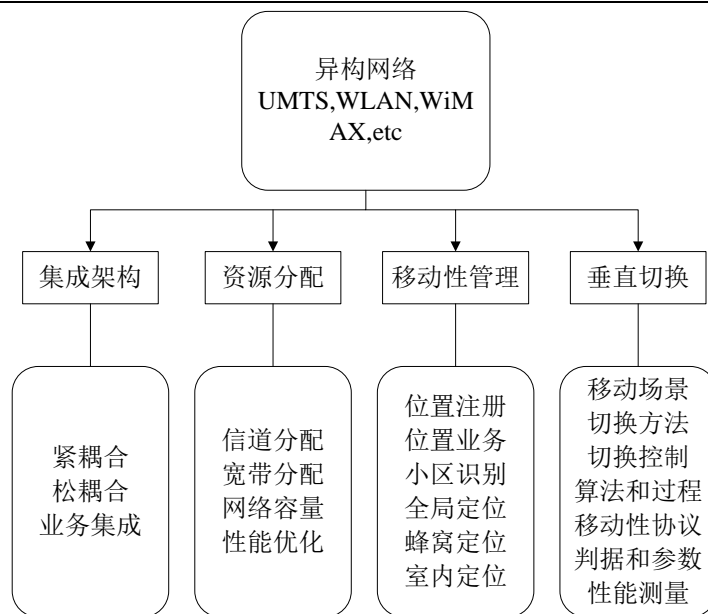


图 2.1 一种异构无线网络融合结构



2.1.1 异构无线网络融合架构

现有的与未来新的无线网络之间巨大的差异性以及用户日益多样化的需求，对异构无线网络的融合架构有了更高的要求。不同覆盖区域异构网络的组成不同，网络融合架构与需求也不同，因此实现网络融合的方法与模型多种多样。在异构网络融合的背景之下，实现异构网络融合一般从两个方面进行建模和架构。第一，通过实现现有异构无线网络的互联互通，使得用户能够体验到移动性、无缝连接以及无线系统兼容的灵活性。第二，根据具体的业务对异构网络进行集成，从而充分满足模块化的业务需求。

实现异构无线网络的互联互通，一般采用紧耦合模式与松耦合模式的网络架构^[7]。所谓紧耦合模式，就是在网络融合的过程中，通过增加功能模块使得一个网络成为另外一个网络的一部分，最终实现两个网络的互联互通。在紧耦合模式之下，子网络与母网络融为一体，可以减少通信过程中的切换时延，但同时，紧耦合模式的实现较为复杂。而松耦合模式，指的是两个网络在结构上依然保持自主性，即自身的网络结构与协议等可以保留，两者可从属于不同的管理单元，但要实现二者的互联互通，需要网关等其他网络辅助进行完成。相比如紧耦合模式，松耦合模式增加了切换时延，但是它的实现相对简单，也为融合执行者提供了很大的灵活性。譬如，要实现 WLAN 网络和 3G 网络互联互通，如图 2.3 所示^[7]，根据需要，可以在不同位置需要选择不同的耦合方式。两个网络之间的连接选择松耦合方式更为合适，以此减小构建难度。实际上，松耦合方式相对紧耦合而言，总体具有很多结构上的优势。

除了上述对于现有的异构无线接入网络的改造而实现异构无线网络结构外，针对具体业

务对无线网络进行集成和架构可以充分满足具体的业务需求。文献[8]提出了一种异构无线网络结构,将3G网络和WLAN网络集成在一起,是一种全IP结构的异构网络的融合模型。再比如,AN(Ambient Network, AN)网基于IP核心网的连接环境,遵循全IP移动网络互联的方法,重点强调传输功能和控制功能的分离,可以保证网络之间动态、灵活的互操作性^[9]。

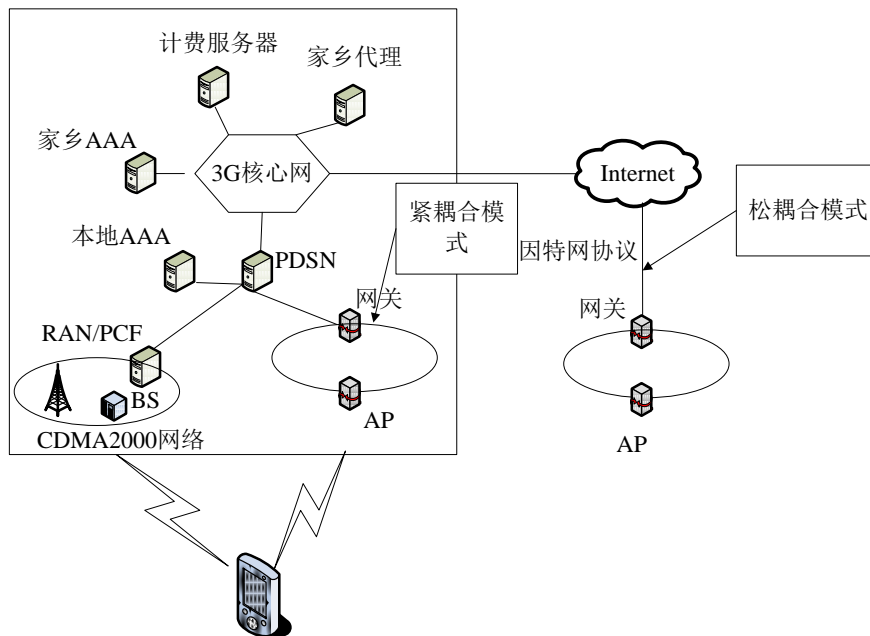


图 2.3 WLAN 与 3G 网络融合方式

2.1.2 异构无线网络资源管理

异构网络的异构性不仅体现在接入网技术、空中接口、底层设置等的差异,还包括可用的无线网络资源的不同,以及对无线资源调度和管理方式的不同。异构无线网络资源管理,是通过信道分配、带宽分配等途径实现系统容量的最大化与网络性能的最优化。在异构无线环境中,采用异构无线资源管理机制,可以优化无线接入,增加频谱资源的使用;对于业务而言,通过选择最恰当和最有效的无线承载,提高频谱使用效率;其次,合理优化异构网络接入,可以大大减小系统间切换时延与连接时延;由于异构网络融合架构选择的多样性与灵活性,对于运营者来说,减小信令与时延可以更好地协调处理^[10]。异构无线网络资源管理主要包括多接入无线资源管理(Multi-access Radio Resource Management, MRRM)、协同无线资源管理(Common Radio Resource Management, CRRM)^[11]与联合无线资源管理(Joint Radio Resource Management, JRRM)^[12]三种模式。

与传统蜂窝网络的无线资源管理方式相比,异构无线网络对无线资源管理模式进行了进一步的发展,使得管理模式更加多样化,集中式、分布式以及分级式的管理方式均得以采用。

集中式，顾名思义，集中控制的意思。集中式无线资源管理，如图 2.4 所示，通过集中控制实体，统一管辖所属多个网络的无线资源使用，分配和管理所管辖的异构无线网络资源。一般来说，集中式对应于紧耦合的异构网络融合架构，更容易实现系统资源的最佳使用。

与集中式的无线资源管理方式相比，分布式没有集中管理模块，其统一协调功能分散在各个对等的无线网络中，能够基于同一目标，各分布式节点配合完成管理工作，如图 2.5 所示^[13]。通过对比二者的结构图，可以发现，分布式的管理模式更加灵活，不会因为集中管理模块的破坏影响整个网络管理工作的进行。然而，分布式管理模式统一调度能力逊于集中式，且很难达到系统资源的最佳使用，一般对应于松耦合的异构网络融合架构。

在网络数量较多的情况下，分布式的信息交换也阻碍系统快速整合资源的速度。分级式的管理方式介于集中式与分布式之间，一般采用如图 2.6 所示的管理架构^[5]，它实质上是集中式与分布式的混合管理模型，集合两种架构的优点，具有较高的灵活性，在三者当中也最具竞争力。

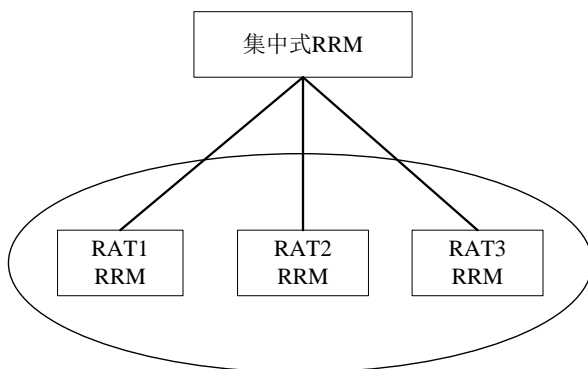


图 2.4 集中式无线资源管理架构

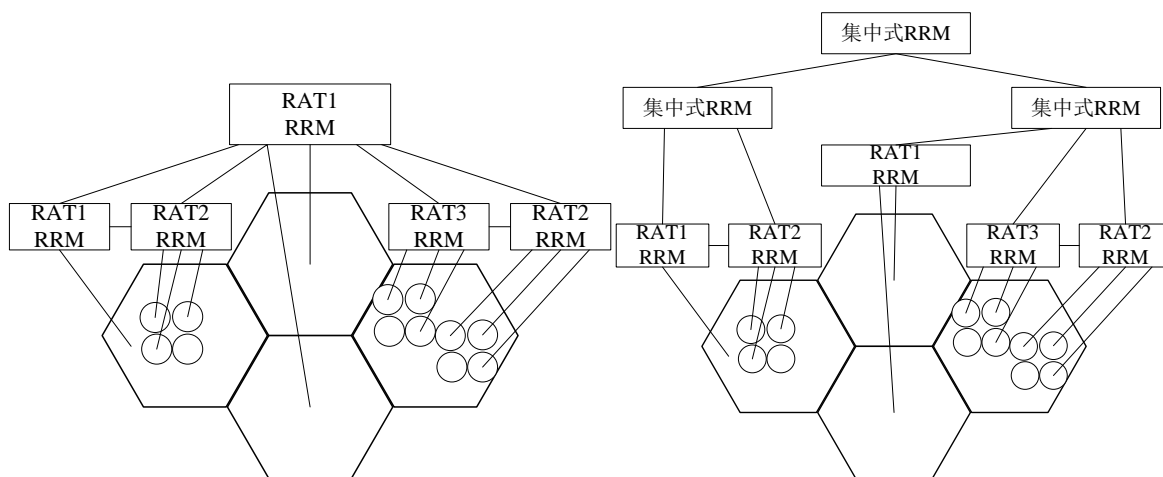


图 2.5 分布式无线资源管理架构

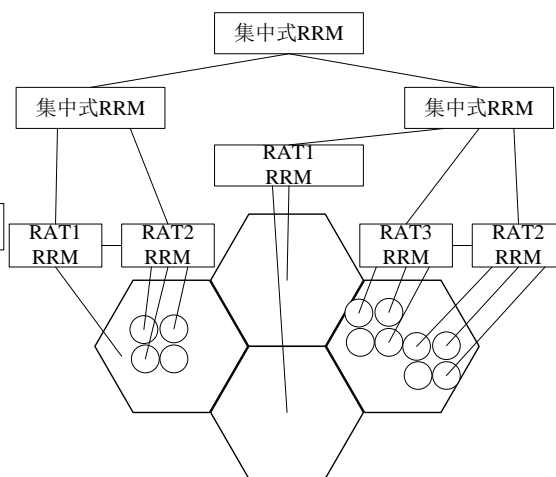


图 2.6 分级式无线资源管理架构

除了上述三种多接入无线资源管理模式之外，异构无线资源管理还包括 3GPP 提出的协同无线资源管理以及联合无线资源管理模式。协同无线资源管理从协同学角度来管理所有可

用的无线网络资源。每个异构无线网络都需要一个无线资源管理模块 (Radio Resource Management, RRM), 每个 CRRM 控制若干 RRM 模块, 通过与 RRM 协调, 保证每个 RRM 充分考虑其他可用的无线资源情况, 从而满足不同类型业务的需求。联合无线资源管理通过联合多个可接入异构无线网络服务于一个移动用户, 即允许一个移动终端同时连接多个无线网络, 从而最大化系统容量、优化网络性能。本文将在第四、第五章对两种无线资源管理方式给出更为详细的介绍。

2.1.3 异构无线网络移动性管理

异构无线网络移动性管理主要包括位置管理和切换管理^[14], 它要求支持移动终端无缝切换与漫游。位置管理包括移动终端的位置注册与位置更新等, 它的目的在于实时跟踪用户从而保证呼叫或者业务到达时系统可以通过位置信息寻呼、锁定相关用户, 同时, 注册过程中对于用户的认证与鉴权、用户环境等也需要进行管理; 而切换管理主要是保证移动终端在移动过程中连续可靠的通信, 移动用户在通信中可能会漫游到其他区域, 切换管理可以在不中断用户通信的前提下为用户建立新的连接。然而, 移动终端在不同类型的无线接入网络之间漫游甚至请求切换过程中, 由于各个异构网络的经营者不同、底层接入技术的差异性, 异构无线网络融合场景给移动性管理工作带来了诸多挑战, 因此需要一种通用的网络层的协议来屏蔽异构无线网络底层差异、从网络层提供不同系统间移动性管理。

在异构无线网络的覆盖范围内, 移动用户面临的切换问题与传统的蜂窝小区之间的切换相比更加复杂。相同小区之间或者同一种接入技术的网络之间的用户切换被称之为水平切换。而用户在异构无线网络之间进行的切换被称为垂直切换。

传统的水平切换的准则都是基于单个性能参数的, 比如根据移动终端接收到的接收信号强度、接收信噪比或者误码率等。通过判断性能参数, 比如接收信号强度是否低于预先设定的门限值来决定是否执行切换。基于决策阶段的执行, 一般水平切换可分为终端控制的切换 (Mobile Controlled HandOver, MCHO)、网络控制的切换 (Network Controlled HandOver, NCHO) 与终端协助性切换 (Mobile Assisted HandOver, MAHO)。最初的垂直切换的研究不管在判定准则与切换方式上面均借鉴了水平切换, 即最初的垂直切换也基于单个性能参数判定是否执行切换。而随着垂直切换研究工作的深入, 仅仅依靠单个网络因素来判决逐渐无法满足垂直切换的要求。因此, 业务类型、网络状态、系统阻塞情况、费用情况、用户喜好、能耗、安全性^[15]等多种因素被考虑进来。垂直切换相比水平切换更加复杂, 一般分为上行链路的垂直切换与下行链路的垂直切换, 而执行过程包括切换触发事件判决、切换初始化与切

换执行三个步骤^[16]。

2.1.4 异构无线网络选择算法

下一代无线通信代表了多种异构无线接入技术共存的局面，各种异构无线网络在带宽、时延或代价方面千差万别。与此同时，各种无线设备，如平板电脑等，开始配备多种无线网络连接接口。此外，用户在任何时间任何地点对于网络接入的需求也在增加。下一代无线通信必须能够为具有多种接入接口的移动终端充分协调网络资源满足用户的网络服务需求。一方面，实现连续无缝连接的一个挑战是协调用户从一种网络垂直切换到另外一种网络。另一方面，根据网络状况与用户偏好为用户选择最有效、最合适的目标异构无线网络尤为必要^[17]。合适的网络选择可以为用户提供最佳的服务质量，实现用户对于无线资源的最佳利用^[18]。具体来说，网络选择是指协助用户或者移动终端根据不同的技术准则连接到无线接入网络从而充分满足用户的业务需求。网络选择为异构网络提供了以用户为中心的连接模型。根据这些模型，用户可以更自由地在不同网络间漫游。因此，从保证用户“始终最佳连接”的角度，网络选择问题值得深入研究。异构网络选择算法作为本文研究的重点，本文将在 2.2 节对其研究现状作出详细介绍。

2.2 异构网络选择算法及研究现状

异构无线网络接入算法，作为无线资源管理的重要研究课题与实现异构网络融合的关键技术，经过一段时间的研究，已经取得了一些的成果。

2.2.1 基于单一网络参数的网络选择

2.1.3 小节已经介绍了传统的水平切换一般基于单一的网络参数，比如接收信号强度 (Received Signal Strength, RSS)、接收信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR)、误码率 (Word Error Indicator, WEI) 等因素，来判决是否执行切换。异构无线网络选择算法在研究的早期也借鉴了水平切换判决的思路，即基于单一网络参数进行网络选择。

文献[19-20]给出了基于接收信号强度的网络选择算法，该方法通过设定接收信号强度门限值来裁定切换标准，同时，为了避免处于两个网络边缘地带的用户由于移动带来的乒乓效应，设定信号强度的滞后余量，使得用户在面对具有较强接收信号强度的网络时再决定网络选择的目标。文献[21]提出了一种借鉴历史信息，并通过数学迭代的方法来预测出目标网络

接收信号强度。相似的，在文献[22]中，通过计算接收信号强度的斜率来预测未来的接收信号强度，将预测方法大大简化，但该方法只能预测估值。文献[23]研究了一种基于接收信噪比的接入选择算法，该方法选择具有最大接收信噪比的网络作为目标网络，最佳的接收信噪比往往具有较好的网络阻塞性能。

然而，基于单一网络参数的网络选择的方法基本只出现在研究早期。随着无线网络的进一步发展以及业务需要的增大，基于单个网络参数的网络选择方法已经无法根据业务需要考虑多种因素来满足用户的服务质量了。

2.2.2 基于多属性决策理论的网络选择

在异构网络环境下，多种接入判决指标应该被综合考虑。多属性决策理论（Multiple Attribute Decision Making, MADM）^[24]通过综合考虑网络的多个属性，使得决策者的期望值最大化，最终选择出最佳方案。因此，多属性决策理论，在异构无线网络选择算法领域得到了广泛的研究与应用。

基于多属性决策的异构无线网络算法一般分为两个部分，一部分是确定权重，另一部分是网络性能排序。对于多属性决策问题，无论采用什么方法，都应该首先确定各个属性的相对重要程度，一般由属性权重来反映，权重越大则说明该属性的相对重要程度高，该属性也更加重要。确定权重的方法主要分为两类，一类是主观赋权法，即属性权重由决策者根据自己的主观经验判断或者根据用户具体需求确定，决策结果具有较强的主观性，常见的主观赋权法层次分析法（Analytical Hierarchy Process, AHP）^[25]，德尔菲法等。另一类是客观赋权法，即根据客观属性的差异进行权重确定，具有较强的属性依据，也能够很好地反映方案环境的客观属性特点，经典的客观赋权法有熵权法（Entropy Weight, EW）^[26]等。为了兼顾主客观权重，许多网络选择算法在确定权重时采用主观与客观相结合的方法，如文献[27]利用熵权法与层次分析法分别计算主客观权重，然后将二者组合进行网络判决，该方法可以兼顾用户偏好于网络客观属性。

除了确定权重的方法之外，往往还需要多属性排序法即多属性决策算法对多个目标网络进行排序，然后将性能最佳的网络将作为目标网络。多属性决策的过程通常先将属性分为效益型属性与成本型属性，两者采用不同的归一化方法进行处理，然后结合权重值对可选异构网络进行多属性排序。多属性决策算法主要有如下几种：

- (1) 简单加权法（Simple Additive Weighting, SAW）^[28]，该方法将所有决策属性值线性加权后获得代价函数。具有最高代价函数值的可选网络就是最终的目标网络；

- (2) 乘数指数加权法 (Multiplication Exponent Weighting, MEW)^[28], 该方法与 SAW 方法类似, 通过指数加权的方法获取代价函数;
- (3) 接近理想方案的序数偏好方法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)^[29], TOPSIS 的中心思想是假设一个正理想方案和一个负理想方案, 通过检测候选方案与正理想方案、负理想方案的距离来进行排序, 若候选方案最靠近正理想方案同时又最远离负理想方案, 则为最佳方案, 否则为最差方案;
- (4) 灰色关联分析 (Grey Relational Analysis, GRA)^[30]将每个可比较序列看作一个可行的解决方案, 采用灰色关联分析进行切换网络的判决, 先将候选网络分为不同的等级, 并选择具有最高等级的网络为目的网络;
- (5) 淘汰选择法 (Elimination and Choice Translating Priority, ELECTRE)^[31], 该方法引入一致性与不一致性的概念, 分别测定决策者对于每个网络的满意度与不满意度矩阵。根据这两个满意度矩阵, 确定网络的性能排序, 确定最合适的网络。

2.2.3 基于模糊逻辑与神经网络理论的网络选择

基于模糊逻辑与神经网络理论的方法中, 有单纯使用模糊理论进行网络选择的, 也有将模糊理论与其他理论如神经网络理论相结合来进行接入机制选择的。

模糊逻辑, 是将模糊的、难以数学量化的网络参数通过模糊理论进行处理, 通过模糊化、模糊推理以及解模糊的过程得到较理想的目标网络^[32]。文献[33]提出了一种单纯基于模糊逻辑理论的网络选择算法, 该方法首先将模糊变量转为模糊集, 最后通过解模糊的方法得到网络性能评价结论。

许多研究者将模糊理论与其他理论 (比如多属性决策理论) 相结合进行异构网络选择, 这些方法被称作模糊多属性决策算法。模糊多属性决策算法通常使用在网络参数难以量化的场景之下, 借助模糊理论处理网络参数, 通过多属性决策对网络进行性能排序, 确定目标网络。文献[34]介绍了一种基于模糊多属性理论的异构网络选择算法。文献[35]将多属性决策理论与模糊理论相结合, 提出了一种基于模糊层次分析法和 ELECTRE 的网络选择方案。

相比于多属性决策, 基于模糊逻辑与神经网络结合的网络选择算法研究更加主流和多样。神经网络借助于人体神经网络结构进行训练学习, 通过反馈调整网络参数, 选择出具有最佳性能的异构网络。文献[36]在 GPRS 和 WLAN 网络重叠覆盖区域, 使用神经网络模型检测信号衰落提出了一种垂直切换策略。文献[37]提出了一种基于新颖学习训练方法的模糊逻辑和神

神经网络算法，该算法可以根据反馈误差对隶属度函数实时调整，从而选择最优网络。文献[38]提出了一种基于模糊逻辑与神经网络的接入选择算法，通过引入预判决模块，减少神经网络采样点从而进行网络选择判决。基于模糊逻辑与神经网络的接入选择算法具有较好的自学习与自适应能力，该方法通过训练学习，动态调整网络参数，使得接入网络能够达到预期的网络性能。然而训练学习阶段一般耗时较长且神经网络理论相对复杂，在对时间或者能耗要求较高的终端上竞争力较弱。

2.2.4 基于博弈论的网络选择

博弈论在异构无线网络资源管理领域广为使用。基于博弈论的网络选择算法主要分为三类：用户间的博弈、网络间的博弈以及用户与网络之间的博弈^[39]。

用户间的博弈指的是每个用户都各自选择自己认为最好的网络，该行为会导致的网络阻塞与性能的恶化。文献[40]提出了一种用户与网络间非合作博弈的异构无线网络选择算法，该算法通过综合考虑网络和用户代价选择目标网络。文献[41]通过拓展非合作博弈模型设计了一种进化博弈的模型。而处理不完整信息的贝叶斯博弈算法在文献[42]中给出了介绍。

不同异构网络运营商之间争夺用户获取商业利润的过程被称作网络间的博弈。网络间的博弈不直接为用户提供网络选择，而是让用户相信他们的网络最具竞争力。文献[43]给出了一种通过多轮博弈竞争消费者的异构网络选择模型。

用户与网络之间的博弈有两个决策者，即用户与网络。用户的策略是选择最佳网络从而最大化效用函数，比如服务质量等。与此同时，网络则希望选择可以为其带来最大收益的用户[44]。两者选择过程中如果存在纳什均衡，用户和网络则互相选择彼此，如若不然，将采用其他的解决方案。

2.2.5 基于最优化策略的网络选择

从系统角度出发，网络选择的目标往往需要最优化吞吐量、网络阻塞率等性能。而用户选择通常是多目标为导向的，比如，用户希望得到较大的带宽、优质的服务质量、低廉的价格等。多属性决策算法作为兼顾多项性能的一种异构网络选择算法，无法使得每个目标同时达到最优，因此，需要采取最优化策略来满足用户或系统对于某些性能最优化的需求。

建立最优化问题的方法有很多，比如，当面临多个目标时，需要建立多个目标函数，但从解优化的角度，需要将一些目标函数转化为限制条件，从而减少目标函数的数量。其次，

通过联合处理不同的目标函数，如规范化不同目标函数，然后将它们结合为同一个目标函数，这样就可以采用解优化的方式处理此类问题。上述两种建立最优化问题的方法可以单独使用，也可以结合使用，目的使得问题得以利用最优化方法解答。

文献[45]提出了一种基于中继节点优化系统吞吐量与能耗的异构网络优化方法，该方法设计了一种优化工具计算最佳网络配置能耗从而最大化系统吞吐量，通过采用中继节点，权衡能耗与吞吐量的优化。文献[46]使得流量接入控制、异构网络节点流量处理、能耗分配等问题受制于能力损耗建立 Lyapunov 优化问题，提出了一种优化流量排队阻塞与系统吞吐量平均效用的异构云网络优化方法。

2.2.6 基于多网络接入的网络选择

移动终端技术的快速发展，使得多模终端具有接入不同无线网络的接口，在多网络覆盖场景下，选择一个最佳网络接入，获取优质的服务质量是传统异构无线网络接入算法研究的重点。而随着可以同时接入多个异构无线网络的多宿终端技术的完善，基于协同无线资源管理与联合无线资源管理技术的多网络接入的网络选择研究也逐渐开展。多个网络同时接入，意味着用户能够获取更大的网络带宽、更快的数据传输速率以及更高的无线资源利用率。基于多网络同时接入技术的研究虽然才刚刚开始，但随着载波聚合等技术的使用，多网络同时接入技术已经逐渐成为实现异构网络融合的一个新的趋势。文献[47]提出了一种基于能量效率的多网络同时接入的网络选择算法，根据最大化吞吐量与功率损耗的比值来确定网络选择方案。文献[48]则充分考虑用户移动性与网络负载均衡对网络选择的影响，提出了一种基于 TOPSIS 的多网络同时选择的方案，该方法在较小能耗的前提下，充分优化系统吞吐量，可以为用户提供较好的服务质量。文献[49]提出了一种异构无线网络中基于联合效用优化的多网络接入选择算法，该方法采用指数平滑法对终端接收信号强度进行处理，利用用户接入网络产生的效益与代价建立效用方程，采用拉格朗日乘子法求解该优化问题，获得了理想的用户服务质量。

2.3 本章小结

本章首先给出了一种异构网络融合的架构，然后对实现异构网络融合所涉及的四个主要问题进行研究，即异构无线网络融合架构研究、无线资源管理技术、移动性管理、垂直切换与网络选择等。网络选择算法作为实现网络融合与无线资源管理的一项重要技术，本章针对

其研究现状对异构无线网络选择算法进行了分类讨论。

第三章 基于四种权值向量的异构无线网络群组决策算法

3.1 引言

多属性决策方法(Multiple Attributes Decision Making, MADM)是异构网络选择算法中最有效的算法之一。常用的 MADM 算法在 2.2 小节中给出了介绍,比如乘法指数权值算法(MEW)、接近理想值的排序算法(TOPSIS)、灰色关联分析法(GRA)、VIKOR 法和淘汰选择法(ELECTRE)等。这些多属性决策算法都会涉及多属性权重向量。计算多属性权重向量的方法有主观和客观之分。常用的客观赋权法有熵权法(Entropy Method, EW),标准离差法等;经典的主观赋权法包括层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, AHP)和 G-1 法等。为了兼顾网络的客观属性与用户主观因素和业务需求,很多文献将主客观权重综合起来进行网络选择。但每种算法都存在相应的问题。本章为了弥补以往算法的不足,提出了一种改进的基于群组决策的组合权重的方法。该方法首先通过 G-1 法和 AHP 法分别得到各自的主观网络属性权值向量,然后利用熵值法和 CRITIC(Criteria Importance Through Intercriteria Correlation)法计算出各自的客观网络属性权重。四种方法代表了四个决策者,两个主观决策者,两个客观决策者,决策者数量适中而且具有代表性。利用群组决策理论将四种权值向量组合,生成新的权值向量,该权值向量需要利用相容性理论验证其合理性。如果不合理,需要对主观赋权法判决矩阵进行修改从而保证判决矩阵与网络的客观属性相近。这种方法不仅可以充分利用群组决策集合多人智慧的优势,又能充分考虑用户需要和网络状况,仿真结果表明,该算法可以为不同业务类型提供满意的服务质量。

3.2 系统模型

本章的异构网络模型如图 3.1 所示。包含了三种异构网络六个基站,包括两个 WLAN 基站、两个 UMTS 基站和两个 WiMAX 基站。

算法框图如图 3.2 所示,首先赋予客观参数通过熵值法和 CRITIC 法计算出客观网络属性权值向量,赋予主观参数通过 AHP 法和 G-1 法分别得到各自的主观网络属性权值向量,四种方法代表了四个决策者,利用群组决策理论将四种权值向量组合生成新的权值向量,从而获取一个综合权值向量 W ,最后结合简单加权法进行网络选择。主观赋权法中 AHP 法最为经典,在多属性决策确定权重时经常被选用;G-1 法特点比较鲜明,较 AHP 赋权法相对简单。AHP

法需要任何两个属性相比获取相对重要关系，而 G-1 法先主观排序再按照排序依次比较，即 G-1 法使得指标之间的序关系唯一、真实的确定。AHP 法可以使得各指标间相对重要性精准，但当指标过多时，指标序关系将变得混乱，而 G-1 法则能充分确定唯一的指标序关系，因此，这两种算法在此方面互补。同样的，客观赋权法中 EW 最为常用，在多属性决策确定客观权重经常被选用，CRITIC 法通过统计指标冲突性获取权重，能客观反映指标情况，此两种算法结合能充分考虑参数差异性从而获取更为准确的客观权重。四种方法各有特点并相互补充，主观权重和客观权重结合能一定程度兼顾主客观情况。因此，选取利用群组决策理论结合的四重权重是十分合适的组合。

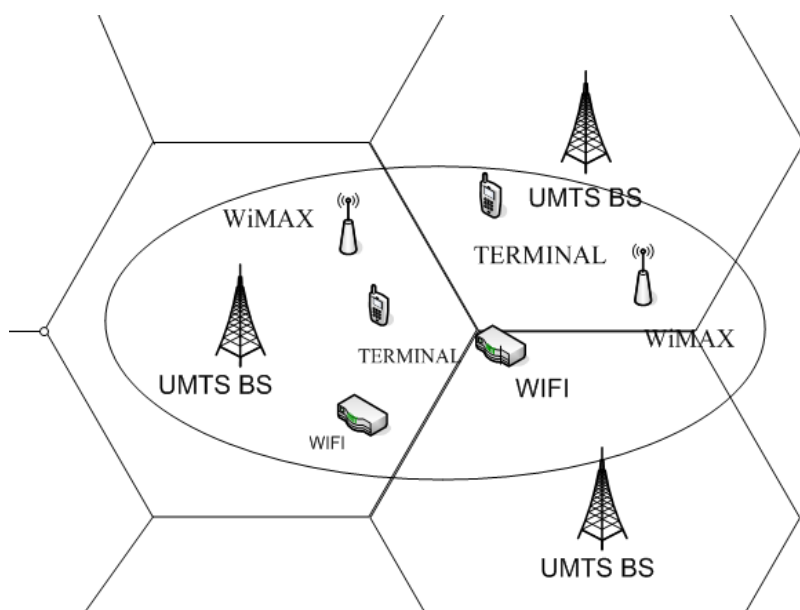


图 3.1 异构网络模型图

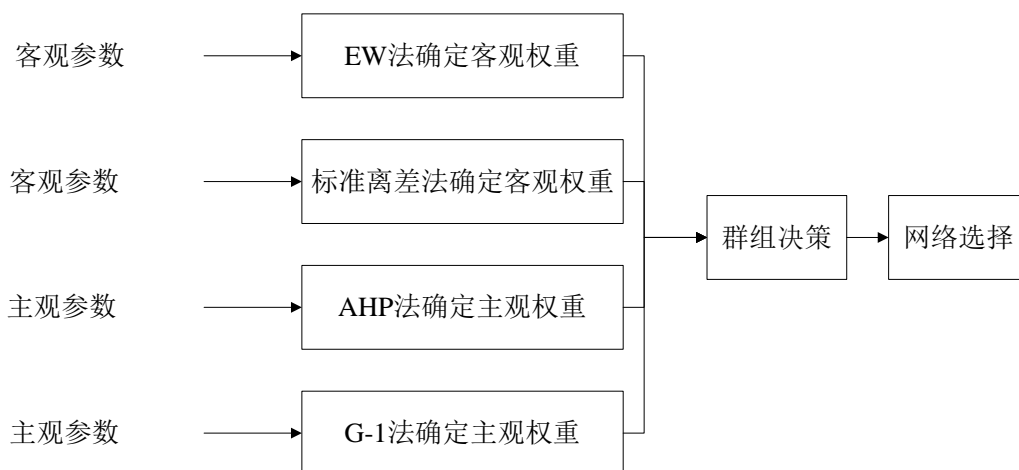


图 3.2 算法框图

3.3 权重向量的确定

多属性决策首先要确定各个属性的权重，传统的权重向量的确定方法可以分为主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法包括 AHP、G-1 法和 Delphi^[50]法等；客观赋权法包括熵值法、标准离差法、CRITIC 法等。两类赋权法各有侧重和特点。因此，为了综合考虑业务类型、用户偏好、网络客观属性等因素，并充分利用群组决策权衡和集合多个决策者结论的特点，本章将综合多种主客观权重来得到多属性权重向量。其中主观赋权法采用 AHP 和 G-1 法，客观赋权法采用熵值法和 CRITIC 法。使用四种赋权法得到四组权重向量后，通过群组决策获取一个综合权重向量，然后衡量其相容性来判定综合权重向量的合理性。满足相容性的综合权重向量将结合简单加权法法进行网络选择。

客观赋权法采用熵值法和 CRITIC 法。在本章的异构网络模型下，网络选择中涉及的属性参数为包抖动 (Packet Jitter, J)、可用带宽 (Available Bandwidth, B)、每比特费用 (Cost Per Bit, C)、包时延 (Packet Delay, D)、包丢失 (Packet Loss, L) 与峰值传输速率 (Peak Data Rate, R)，根据网络属性参数可以计算出客观权重，网络属性参数如表 3.1 所示^{[51][52]}。

表 3.1 网络参数

网络	B/MHz	$R/(\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1})$	D/ms	J/ms	$L/10^{-6}$	C/bit^{-1}
UMTS1	0.1~2.0	2	25~50	5~10	20~80	0.6
UMTS2	0.1~2.0	2	25~50	5~10	20~80	0.8
WLAN1	1~11	11	100~150	10~20	20~80	0.1
WLAN2	1~54	54	100~150	10~20	20~80	0.05
WiMAX1	1~60	60	60~100	3~10	20~80	0.5
WiMAX2	1~60	60	60~100	3~10	20~80	0.4

假设熵值法和 CRITIC 法中的标准化的网络属性矩阵为 $R' = (x_{ij})_{6 \times 6}$ ，即 6 个异构无线网络，6 种网络属性， x_{ij} 表示第 i 个网络的第 j 个属性，并且 $1 \leq i \leq 6, 1 \leq j \leq 6$ ， x_{ij} 落在表 3.1 的各个范围内。一般而言，属性分为效益型和成本型，效益型的属性越大越好，成本型的属性越小越好^[39]。本章涉及的参数中可用带宽、峰值传输速率属于效益型属性，包时延、包抖动、包丢失与每比特费用属于成本型属性。取 $x_{\max}^j = \max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{6j})$ ， $x_{\min}^j = \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{6j})$ 。对于 B 和 R ，标准化处理公式为

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{max}^j + x_{min}^j}, 1 \leq j \leq 2 \quad (3.1)$$

对于 D , J , L 和 C , 标准化处理公式为

$$r_{ij} = \frac{x_{max}^i + x_{min}^i - x_{ij}}{x_{max}^i + x_{min}^i}, 3 \leq j \leq 6 \quad (3.2)$$

标准化后的网络参数矩阵记为 $R = (r_{ij})_{6 \times 6}$ 。

3.3.1 熵权法确定客观权重

熵的概念最先由香农引入信息论, 已在工程技术、社会经济等领域得到十分广泛的应用^[53]。根据香农的定义, 如果用 P_i 表示第 i 个信息不确定度则整个信息的信息熵为

$$S = -K \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (3.3)$$

式中 K 是一个大于零的常数。

假设有 m 个候选网络方案 $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ 和 n 个评价指标 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 形成原始数据的决策矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$, 即

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

其中, x_{ij} 表示备选方案 Y_i 对于判决准则 X_j 的属性参数。

由于各评估属性数据之间的量纲、性能不同, 难以直接比较, 必须对这些属性首先进行规范化。假设规范化后的评估矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$, 式中, r_{ij} 为第 i 个评估方案的第 j 个评估属性值, 且 $r_{ij} \in [0,1]$ 。

将各指标量化, 计算在第 i 方案指标下第 j 个评估指标的标准化属性参数为

$$d_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}, i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n \quad (3.5)$$

在比较各候选网络的参数时, 显然, 如果各个网络的某项指标的所有数值都相等, 则该指标在综合评价中不起作用, 当该项指标的值差异越大, 则该指标在综合评价中所起的作用越大。由前面熵的定义可知, 在决策中获得信息的多少和质量, 是影响决策精度和可靠性的

关键因素之一。而熵在应用于决策过程评价时是一个较为理想的评判尺度。因而在确定客观权重时，本文将熵权法作为目标方法之一。

根据熵权法计算客观权重的步骤，计算过程如下：

(1) 对网络参数进行规范化

$$\bar{r}_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^6 r_{ij}, 1 \leq j \leq 6 \quad (3.6)$$

(2) 计算属性信息熵

$$H_i = -K \sum_{j=1}^6 \bar{r}_{ij} \ln \bar{r}_{ij}, 1 \leq i \leq 6 \quad (3.7)$$

其中 $K=1/\ln 6$ 。

(3) 计算权重向量

$$w_j^{EW} = \frac{1 - H_i}{6 - \sum_{j=1}^6 H_i}, 1 \leq i \leq 6 \quad (3.8)$$

通过熵权法可以得到属性的权重向量 $W^{EW} = (w_1^{EW}, w_2^{EW}, w_3^{EW}, w_4^{EW}, w_5^{EW}, w_6^{EW})$ 。

3.3.2 CRITIC 法确定客观权重

CRITIC 法^[54]与熵权法原理不同。该方法确定客观权重需要考量两个不同的指标，一个是指标与各个评价方案之间的对比强度，反映形式为标准差，标准差越大说明评价方案之间的差距越大，另一个是评价指标之间的冲突性，反映形式为指标之间的相关系数，相关系数越强，则说明指标之间的冲突性越弱。CRITIC 法通过综合参数的对比强度和冲突强度获取客观权重。结合 CRITIC 法客观权重的步骤，计算过程如下：

(1) 计算标准差

一般在某个网络中一个指标的标准差与指标值的变异程度成正比，如果标准差越大，则该指标的变异程度越大，提供的信息量越大，在评价中发挥作用越大，其权重也越大。反之，则权重越小。本章计算六个网络统一属性标准差公式为

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}{6}}, \bar{r}_j = \frac{\sum_{i=1}^6 r_{ij}}{6}, 1 \leq j \leq 6 \quad (3.9)$$

(2) 计算指标信息量

指标信息量定义为

$$C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^6 (1 - r_{ij}), 1 \leq j \leq 6 \quad (3.10)$$

(3) 确定权重

信息量越大，则说明指标重要性程度越高，因此，利用 CRITIC 法计算 6 个网络的各指标权重公式如下

$$w_j^C = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^6 C_j}, j=1,2,\dots,6 \quad (3.11)$$

则网络属性矩阵 $R = (r_{ij})_{6 \times 6}$ 利用 CRITIC 法计算出的权重向量为 $W^C = (w_1^C, w_2^C, w_3^C, w_4^C, w_5^C, w_6^C)$ 。

3.3.3 AHP 法确定主权重

层次分析方法 (Analytical Hierarchy Process, AHP) 是 70 年代由美国运筹学家 T.L.Satty 提出的^[55]，采用层次结构描述决策问题，反映其递阶控制关系。最高层为决策的目标，中间是准则层，根据问题的不同场景可以有更多的子准则层，最下层为方案层，如图 3.3 所示。在 AHP 的层次结构中，上层元素控制并影响下层元素。

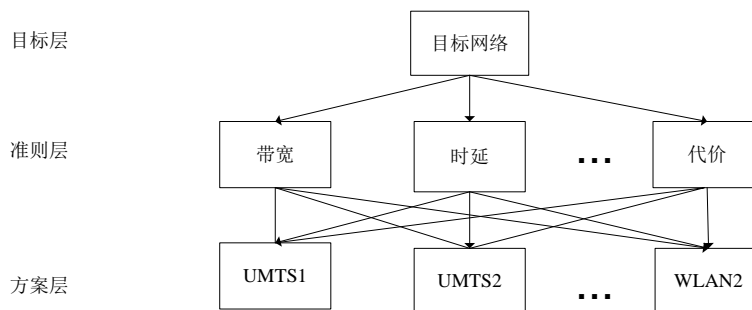


图 3.3 AHP 的层次结构

AHP 是蕴含深刻数学原理的决策思维方式，整个过程体现了人们分解、判断、综合的思维特征。因此，本文将 AHP 法作为确定权重向量的方法之一。

参照层次分析法计算主观权重的步骤，计算过程如下：

(1) 构造判断矩阵

判断矩阵主要用来表示具有相同属性层的因素的重要性关系，不同属性层将生成各自的判断矩阵。判断矩阵中的值可以通过两两比较，回答诸如“这两个哪个更重要”，或者是“重要到何种程度”来得到。假设准则层下的因素两两比较得出的 t 阶的判断矩阵形式如下

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} = (b_{ij}), i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.12)$$

b_{ij} 表示第 i 个属性相对于第 j 个属性的重要程度, n 为属性的个数。

关于如何确定 b_{ij} 的值, Saaty 等建议引用数字 1-9 及其倒数作为标度。表 3.2 列出了 1-9 标度的含义来表示基于选择者的个性、经验和知识而进行的重要程度的参数选择。从表中可以看出, 判断矩阵沿对角线具有对称性, 对角线上的元素值为 1。而且矩阵元素具有自反性, 即 $b_{ij} = 1/b_{ji}$ 。

表 3.2 判断矩阵的 b_{ij} 的取值标度表

序号	重要性等级	b_{ij} 赋值
1	i, j 两元素同等重要	1
2	i 元素比 j 元素稍微重要	3
3	i 元素比 j 元素明显重要	5
4	i 元素比 j 元素强烈重要	7
5	i 元素比 j 元素极端重要	9
6	i 元素比 j 元素稍不重要	1/3
7	i 元素比 j 元素明显不重要	1/5
8	i 元素比 j 元素强烈不重要	1/7
9	i 元素比 j 元素极端不重要	1/9

注: 2,4,6,8 和 1/2, 1/4, 1/6, 1/8 介于其间

本章主观赋权法采用 AHP 法以及 G-1 法。根据业务类型的不同, 主观赋权法的判决矩阵会发生变化。AHP 法中的判断矩阵为 A^{AHP} , G-1 法的判断向量为 G^{G-1} , AHP 和 G-1 法不同类型判决矩阵分别在表 3.3 和表 3.5 中给出。因此在每种业务类型之下, A^{AHP} 和 G^{G-1} 分别与表 3.3 和表 3.5 中判决矩阵对应。

在每种业务类型之下, AHP 法中的判断矩阵为 A^{AHP} , 每种业务类型的判断决策矩阵分别如表 3.3 所示。

表3.3 不同业务类型对应的判断矩阵 (AHP)

网络参数	会话类						流媒体					
	B	R	D	J	L	C	B	R	D	J	L	C
B	1	1	1/9	1/5	1/3	1/3	1	2	4	5	4	1/5
R	1	1	1/9	1/5	1/3	1/3	1/2	1	3	4	3	1/4
D	9	9	1	3	4	4	1/4	1/3	1	3	1/3	1/8
J	5	5	1/3	1	2	2	1/5	1/4	1/3	1	1/5	1/9
L	3	3	1/4	1/2	1	2	1/4	1/3	3	5	1	1/7
C	3	3	1/4	1/2	1/2	1	5	4	8	9	7	1
网络参数	交互类						背景类					
	B	R	D	J	L	C	B	R	D	J	L	C
B	1	1	2	3	1/7	1/7	1	2	1	1	1/3	1/5
R	1	1	2	3	1/7	1/8	1/2	1	1	1	1/4	1/7
D	1/2	1/2	1	2	1/8	1/9	1	1	1	1	1/5	1/6
J	1/3	1/3	1/2	1	1/9	1/9	1	1	1	1	1/4	1/7
L	7	7	8	9	1	1/5	3	4	5	4	1	1/3
C	7	8	9	9	5	1	5	7	6	7	3	1

(2) 权重计算

因为判断矩阵 B 的对角对称性, 所以一定存在特征方程 $B \times V = \lambda \times V$, 其中 V 为非零的特征向量, λ 为其特征值。AHP 的判断矩阵中每一个元素都是一个属性相对于另一个同准则层下的属性的权重的比例, 可以将 B 矩阵写成如下形式

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

其中各 w_i 是属性因素的权重, $i=1,2,\dots,n$, n 是属性因素的个数。所有的 w_i 共同组成一个权重向量, 即 $W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n]^T$ 。

因此, 确定各属性权值的关键在于求得判断矩阵的特征向量和特征值。在实际应用当中, 对一个矩阵近似求其特征向量和特征值有多种方法, 包括和法、根法、幂法等。这三个方法都能近似求得特征向量和特征值, 其中“和法”的方法是最简便的, 其计算步骤如下:

①将矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n}$ 的每一列向量的归一处理, 得到矩阵 $Q = (q_{ij})_{n \times n}$, 其中

$$q_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}}, (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (3.14)$$

②对 q_{ij} 按行求和相加，得到向量 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)^T$ ，其中

$$\alpha_j = \sum_{i=1}^n q_{ij}, (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.15)$$

③将 α 归一化，即有

$$w_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{k=1}^n \alpha_k}, (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.16)$$

则有特征向量近似值： $W = (w_1, \dots, w_n)^T$ 。

对应于每种业务类型，结合表 3.2，根据（2）中和法计算步骤，特定业务类型条件下，可以算出 AHP 法确定的主观权重 $W^{AHP} = (w_1^{AHP}, w_2^{AHP}, w_3^{AHP}, w_4^{AHP}, w_5^{AHP}, w_6^{AHP})$ 。

（3）一致性检验

人们对复杂事件的各因素采用两两比较时，所得到的主观判断矩阵 B 不一定具有一致性。判断矩阵的一致性指数用一致性比率 CR 表示

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.17)$$

RI 为平均随机一致性指标，同 AHP 中的 RI 一致，不同矩阵维数下的 RI 有不同的定值。一致性指标 CI 的计算公式为

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.18)$$

n 为判断矩阵维数。

其中相应的平均随机一致性指标 RI 需要查表。对不同矩阵的维数 1-9, Saaty 给出了 RI 的值，如表 3.4 所示。

表 3.4 不同矩阵维数的平均随机一致性指标 RI

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当 $CR > 0.1$ ，说明决策者先前的判断存在自相矛盾的情况，或事物自身具有循环规律或对称性，这时需要对判断矩阵元素做调整再按照同样的放大计算；当 $CR < 0.1$ 时，说明判断矩阵的一致性水平是可以接受的，此时的特征向量值即为各属性的权值。经实验验证，权重

$W^{AHP} = (w_1^{AHP}, w_2^{AHP}, w_3^{AHP}, w_4^{AHP}, w_5^{AHP}, w_6^{AHP})$ 满足一致性要求。

3.3.4 G-1 法确定主观权重

G-1 法确定主观权重分为三个步骤，首先根据某个评价标准对所有评价指标进行重要性排序，然后给定排序后相邻指标的重要程度比值，最后计算各个指标的权重。具体步骤如下：

(1) 序关系的确定

对所有评价指标相对于某评价标准重要程度排序，则该异构网络模型下的六种属性在每种业务类型下的重要性排序情况如下：会话类业务： $R>J>B>C>P>L$ ；流媒体业务： $L>B>P>R>J>C$ ；交互类业务： $L>C>R>J>B>P$ ；背景类业务： $C>L>J>R>B>R$ 。

(2) 相邻属性相对重要性程度判断

在某种评价标准的重要程度排序之下相邻属性之间重要程度之比 w_{k-1}/w_k 记为

$$w_{k-1} / w_k = r_k, 2 \leq k \leq 6 \tag{3.19}$$

r_k 赋值可参照表 3.6。

表 3.5 中各种业务类型下的 r 值是结合表 3.3 和表 3.6 给出的，从而保证对于所有业务类型的主观判断保持一致。

表3.5 不同业务类型对应的判断矩阵 (G-1)

业务类型	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	排序
会话类	1.2	1.6	1.0	1.2	1.2	$R>J>B>C>P>L$
流媒体	1.8	1.0	1.0	1.0	1.0	$L>B>P>R>J>C$
交互类	1.0	1.8	1.0	1.4	1.0	$L>C>R>J>B>P$
背景类	1.2	1.4	1.0	1.0	1.2	$C>L>J>R>B>R$

表 3.6 r_k 赋值表

r_k	说明
1.0	指标 w_{k-1} 和 w_k 有相同重要性
1.2	指标 w_{k-1} 比 w_k 稍微重要
1.4	指标 w_{k-1} 比 w_k 明显重要
1.6	指标 w_{k-1} 比 w_k 强烈重要
1.8	指标 w_{k-1} 比 w_k 极端重要

(3) 权重的确定

首先计算重要性排序后最重要的属性权重 w_6 ，然后依次计算出后续权重。其中， w_6 的权重计算公式如下

$$w_6 = \frac{1}{1 + \sum_{k=2}^6 \prod_{i=k}^6 r_i} \quad (3.20)$$

而后续权重的计算过程如下

$$w_{k-1} = r_k \times w_k, k = 6, 5, \dots, 2 \quad (3.21)$$

结合上述公式，并参照表 3 中 r 值，某种特定业务类型下的 G-1 法确定的主观权值向量为 $W^{G-1} = (w_1^{G-1}, w_2^{G-1}, w_3^{G-1}, w_4^{G-1}, w_5^{G-1}, w_6^{G-1})$ 。

3.4 群组决策及相容性理论

3.4.1 群组决策及综合权重的确定

群组决策是通过集中群体成员智慧来发挥群体决策的优势^[56]，因此所选群体成员应当具有代表性并要保证一定数量。本章所选的四种决策成员分别为层次分析法、熵值法、G-1 法和 CRITIC 法，四种决策方法包括两种主观赋权法两种客观赋权法，数量适中，通过群组决策获取网络属性权重参数不仅能利用多个决策者参与时群组决策的优势，更能充分考虑用户要求、业务类型以及网络状况。接下来将介绍运用群组决策和相容性理论组合四种权重向量。

设 $A = (a_{ij})$ ， $B = (b_{ij})$ 和 $C = (c_{ij})$ 均为 n 阶正互反矩阵，由 A 得到的排序向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ ，矩阵 $A^C = (w_i / w_j)$ 成为 A 的特征矩阵。定义 A 和 B 的乘积 $C(A, B) = e^T (AB^T) e$ 为 A, B 的相容度，其中 $e^T = (1, 1, \dots, 1)$ 。为了方便，一般取其对数作为相容度，记为 $C_L(A, B) = \sum_i \sum_j \lg^2(a_{ij} b_{ji})$ 。一般地， $C_L(A, B) \geq 0$ ，如果 $C_L(A, B) = 0$ ，则 A, B 完全相容。

四种赋权法基于同一个网络参数矩阵，由这四种赋权法确定的排序向量分别为 W^{EW} ， W^C ， W^{AHP} 和 W^{G-1} ，为方便计算，记： $W^{EW} = W^1 = (w_1^1, w_2^1, w_3^1, w_4^1, w_5^1, w_6^1)$ ， $W^C = W^2 = (w_1^2, w_2^2, w_3^2, w_4^2, w_5^2, w_6^2)$ ， $W^{AHP} = W^3 = (w_1^3, w_2^3, w_3^3, w_4^3, w_5^3, w_6^3)$ 和 $W^{G-1} = W^4 = (w_1^4, w_2^4, w_3^4, w_4^4, w_5^4, w_6^4)$ 。四个排序向量对应的特征矩阵分别为 A^{EW} ， A^C ， A^{AHP} 和 A^{G-1} 。几何综合平均向量 $W = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6)^T$ 是对数意义下使得 A^{EW} ， A^C ， A^{AHP} 和 A^{G-1} 与综合特

征矩阵 $W = (w_i / w_j)$ 最相容的向量，即使 $P = \sum_{i,j=1}^6 \sum_{k=1}^4 \lg^2 \left(\frac{w_i}{w_j} \frac{w_j^{(k)}}{w_i^{(k)}} \right)$ 取最小值的向量。如果综合平均向量 W 使得 P 取最小值，那么应该满足

$$\frac{\partial P}{\partial t} = 0, 1 \leq t \leq 6 \tag{3.22}$$

因为 $\sum_{i=1}^6 w_i = 1$ ，解公式 (3.22) 得

$$w_t = (w_t^{EW} w_t^C w_t^{AHP} w_t^{G-1}) / \sum_{i=1}^6 (w_i^{EW} w_i^C w_i^{AHP} w_i^{G-1})^{1/4} = (w_t^1 w_t^2 w_t^3 w_t^4) / \sum_{i=1}^6 (w_i^1 w_i^2 w_i^3 w_i^4)^{1/4} \tag{3.23}$$

综合上述公式，得到四种权重向量的几何综合平均向量 $W = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6)^T$ ，综合特征矩阵 $A = \left[\left(w_i / w_j \right) \right], 1 \leq i, j \leq 6$ 。

3.4.2 相容性检验

本章将指标 $S_I(A, B) = C(A, B) / n^2$ 称为矩阵 A, B 的相容性指标。一般地， A 与 W 具有相容性，但是， A 和 W 的相容性完全由 A 决定，而当 $S_I(A, B) \leq 0.1 \left(\frac{n-1}{n} \right) R_{R.I.} + 1$ ，认为 A 和 W 具有满意的相容性。因此为了便于判断，取 $\bar{S}_I = 0.1 \left(\frac{n-1}{n} \right) R_{R.I.} + 1$ 作为相容性指标的边界值。

当衡量 A 和 B 是否相容时，当 $S_I(A, B) \leq \bar{S}_I$ 时认为 A 和 B 具有令人满意的相容性。

表 3.7 S_I 临界值

n	\bar{S}_I	n	\bar{S}_I
1	1	7	1.116
2	1	8	1.124
3	1.035	9	1.128
4	1.067	10	1.134
5	1.090	11	1.138
6	1.104	12	1.141

为保证组合向量的合理性，对合成权重进行相容性检验，即判断矩阵 A 是否和 A^{EW} ， A^C 、 A^{AHP} 和 A^{G-1} 分别具有满意的相容性，它们的相容性指标分别为

$$\begin{aligned}
S_{11} &= S_I(\mathbf{A}, \mathbf{A}^{\text{EW}}) = C(\mathbf{A}, \mathbf{A}^{\text{EW}}) / M^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (w_i / w_j)(w_j^{\text{EW}} / w_i^{\text{EW}}) \\
&= \sum_{i=1}^M (w_i / w_i^{\text{EW}}) \sum_{j=1}^M (w_j^{\text{EW}} / w_j) / M^2
\end{aligned} \tag{3.24}$$

$$\begin{aligned}
S_{12} &= S_I(\mathbf{A}, \mathbf{A}^{\text{C}}) = C(\mathbf{A}, \mathbf{A}^{\text{C}}) / M^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (w_i / w_j)(w_j^{\text{C}} / w_i^{\text{C}}) \\
&= \sum_{i=1}^M (w_i / w_i^{\text{C}}) \sum_{j=1}^M (w_j^{\text{C}} / w_j) / M^2
\end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}
S_{13} &= S_I(\mathbf{A}, \mathbf{A}^{\text{G-1}}) = C(\mathbf{A}, \mathbf{A}^{\text{G-1}}) / M^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (w_i / w_j)(w_j^{\text{G-1}} / w_i^{\text{G-1}}) \\
&= \sum_{i=1}^M (w_i / w_i^{\text{G-1}}) \sum_{j=1}^M (w_j^{\text{G-1}} / w_j) / M^2
\end{aligned} \tag{3.26}$$

$$S_{14} = S_I(\mathbf{A}, \mathbf{A}^{\text{AHP}}) = C(\mathbf{A}, \mathbf{A}^{\text{AHP}}) / M^2 \tag{3.27}$$

当四个相容性指标同时小于同阶相容性指标临界值 \bar{S}_1 ，则说明合成的权重符合相容性要求。利用群组决策得到的权值向量来进行网络选择，即获取权重之后，结合 SAW 算法，每个网络的性能函数可以表示为

$$F = \sum_{j=1}^6 w_j r_{ij}, 1 \leq i \leq 6 \tag{3.28}$$

最佳网络为

$$F^* = \arg \max_{i \in 6} \sum_{j \in 6} w_j r_{ij} \tag{3.29}$$

3.4.3 算法流程

本章网络选择算法流程如图 3.4 所示，具体步骤如下：

第一步：网络属性变化利用马尔科夫链表示，假定每个网络属性有若干个马尔科夫状态，每个状态转移到相邻两个状态的概率为 $P/2$ ，首末位两个状态发生转移的概率为 P ，不发生转移的概率也为 $1-P$ ，因此在网络遵循马尔科夫原理发生变化后，将得到一个特定了网络属性矩阵；

第二步：首先将网络属性矩阵进行标准化处理，一般而言，属性分为效益型和成本型，效益型的属性越大越好，成本型的属性越小越好，本章中可用带宽、峰值传输速率属于效益型属性，包时延、包抖动、包丢失与每比特费用属于成本型属性。取 $x_{\max}^j = \max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{6j})$ ，

$x_{min}^j = \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{6j})$ ，对于 B 和 R ，标准化处理公式为 (3.1)，对于 D ， J ， L 和 C ，标准化处理公式为 (3.2)，标准化后所有属性参数都将落在 0 和 1 之间；

第三步：将此标准化的网络属性矩阵分别结合熵权法和 CRITIC 法计算出两组客观权重向量，分别为 $\mathbf{W}^{EW} = \mathbf{W}^1 = (w_1^1, w_2^1, w_3^1, w_4^1, w_5^1, w_6^1)^T$ 和 $\mathbf{W}^C = \mathbf{W}^2 = (w_1^2, w_2^2, w_3^2, w_4^2, w_5^2, w_6^2)$ ，根据业务类型，给定 AHP 法的判决矩阵（参照表 3.3），结合网络属性矩阵利用 AHP 法计算出一组主观权重向量 $\mathbf{W}^{AHP} = \mathbf{W}^3 = (w_1^3, w_2^3, w_3^3, w_4^3, w_5^3, w_6^3)$ ，同样的，根据业务类型，给定 G-1 法的判决矩阵（参照表 3.3）利用 G-1 法计算出另一种主观权重向量 $\mathbf{W}^{G-1} = \mathbf{W}^4 = (w_1^4, w_2^4, w_3^4, w_4^4, w_5^4, w_6^4)$ ；

第四步：将计算出的四组权重向量进行群组决策，结合公式 (3.23) 计算出几何综合平均向量 \mathbf{W} 以及其特征矩阵 \mathbf{A} 。然后利用公式 (3.24) (3.25) (3.26) (3.27) 分别计算特征矩阵 \mathbf{A} 和四种权重向量的特征矩阵 \mathbf{A}^{EW} ， \mathbf{A}^C ， \mathbf{A}^{AHP} 和 \mathbf{A}^{G-1} 的相容性指标；

第五步：判断这些指标是否同时小于同阶相容性指标临界值 \bar{S}_1 。如果不满足相容性指标，则需要修改此种业务类型之下的主观判决矩阵，再次计算，如果满足，则进入第六步；

第六步：前五步计算出了六个属性的满足相容性指标的几何综合权重向量，在此步骤中，权重向量结合 SAW 法从而得到这种网络状态下的最佳网络编号。

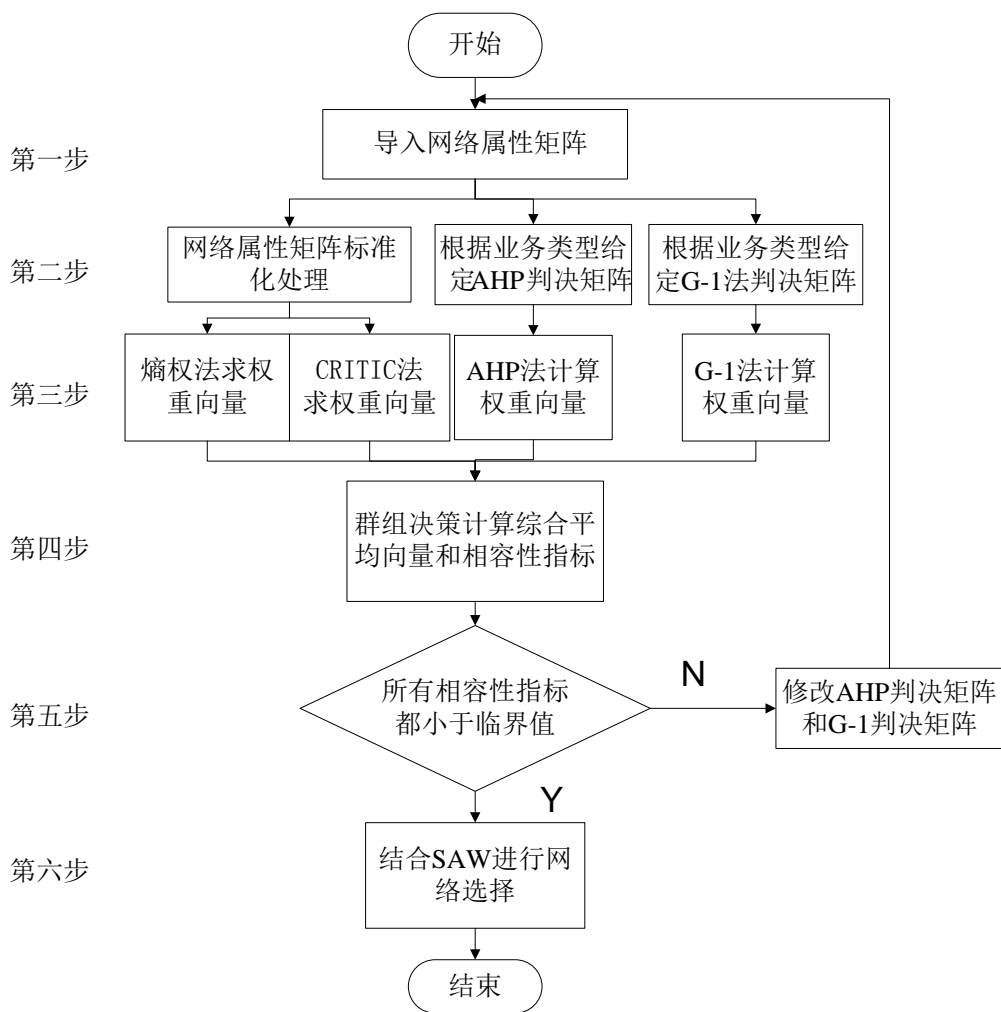


图 3.4 算法流程图

3.5 仿真结果分析

仿真的异构网络分别是 WLAN、UMTS 与 WiMAX，每种类型包含两个网络。仿真中采用 EW^[57]和 GRA^[58]与本章算法 (Group Algorithm)比较。网络选择中涉及的属性参数为可用带宽、峰值传输速率、包时延、包抖动、包丢失与每比特费用，表 5.1 所示。

网络属性变化则利用马尔科夫链进行表示，假定每个网络属性有若干个马尔科夫状态，每个状态转移到相邻两个状态的概率为 P/2，首位两个状态发生转移的概率为 P，不发生转移的概率也为 1-P，转移概率 P 越大表示网络状态越不稳定，终端越容易执行网络重新选择与切换。

本章选择 4 种业务类型来衡量算法性能，但是根据业务类型是一种主观决策，这里采用 G-1 法和 AHP 法，每种业务类型的判断决策矩阵分别如表 3.3 和表 3.5 所示。

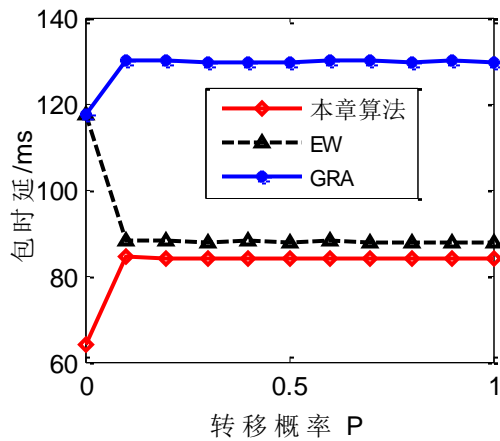


图 3.5 会话类业务的时延

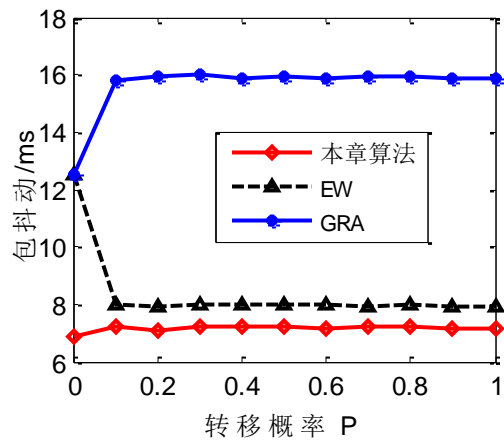


图 3.6 会话类业务的抖动

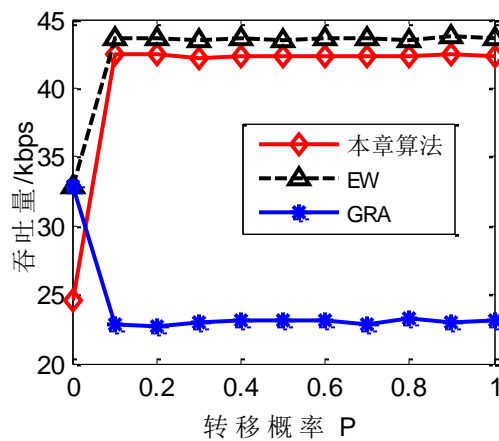


图 3.7 会话类业务的吞吐量

图 3.5~图 3.7 给出了会话类业务的性能。会话类业务的语音通信要求低时延以及较低带宽，而视频通信要求低时延以及足够带宽，因此表 3.3 和表 3.5 的判决矩阵中会话类业务更看重时延抖动状况。从图中可以看出，对比其他两种算法，本章算法可以提供最优的时延和抖动性能以及令人满意的带宽，从而可以满足用户的 QoS 要求。

图 3.8~图 3.10 给出了流媒体业务的性能。流媒体业务要求较高的误码率并允许一定时延，对带宽要求较高，因此表 3.3 和表 3.5 的判决矩阵中会话类业务更看重吞吐量状况。从图中可以看出，对比其他两种算法，本章算法可以提供最佳抖动状态，令人满意的丢包率以及最优的带宽性能，从而可以满足用户的 QoS 要求。

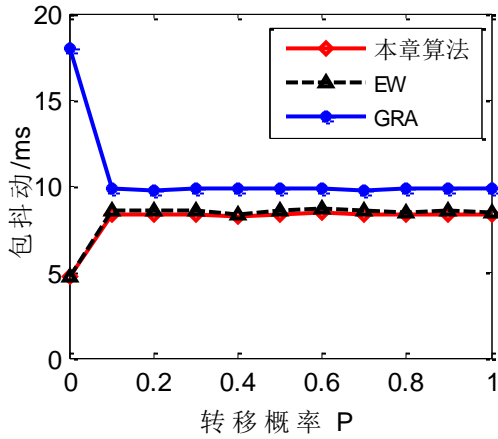


图 3.8 流媒体业务的抖动

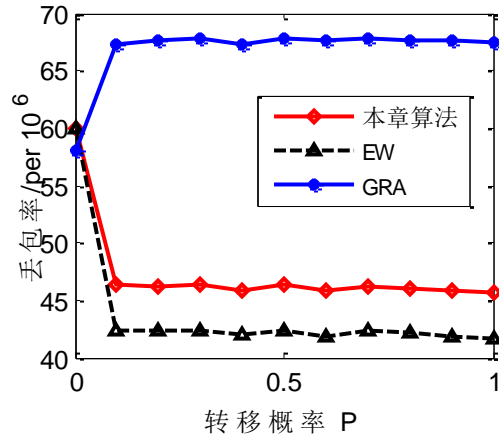


图 3.9 流媒体业务的丢包率

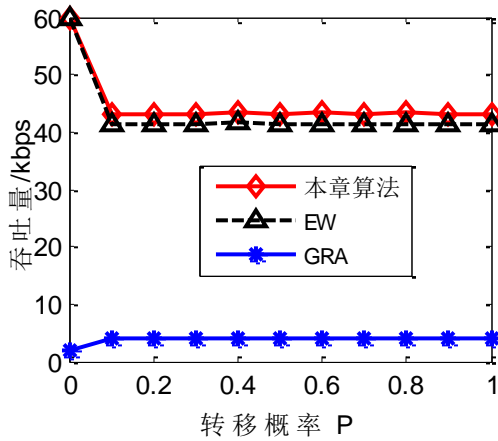


图 3.10 流媒体业务的吞吐量

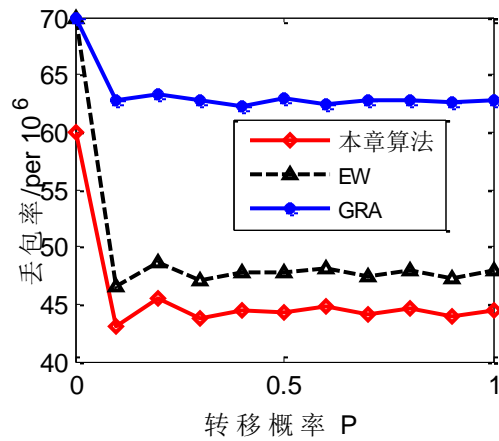


图 3.11 交互型业务的丢包率

图 3.11~图 3.13 给出了交互型业务的性能。交互类业务对误码率有一定要求，相对较低时延以及相对较高的数据下行速率，因此表 3.3 和表 3.5 的判决矩阵中会话类业务更看重丢包率状况。从图中可以看出，对比其他两种算法，本章算法可以在最低代价前提下提供最佳丢包率性能以及较高的吞吐量，从而可以满足用户的 QoS 要求。

图 3.14~图 3.15 给出了背景类业务的性能。背景类业务对时延要求较低，有较高的误码率要求，因此表 3.3 和表 3.5 的判决矩阵中会话类业务更看重丢包率状况。从图中可以看出，对比其他两种算法，本章算法可以在最低代价前提下提供最佳丢包率性能，从而可以满足用户的 QoS 要求。

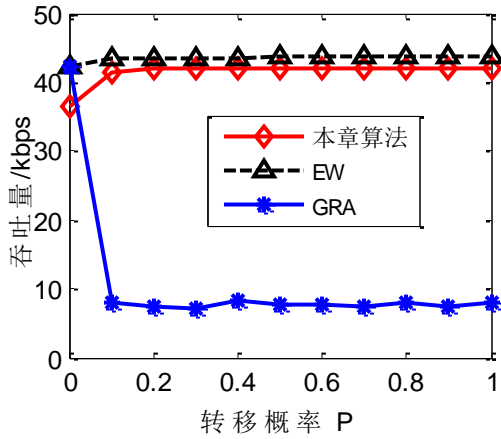


图 3.12 交互型业务的吞吐量

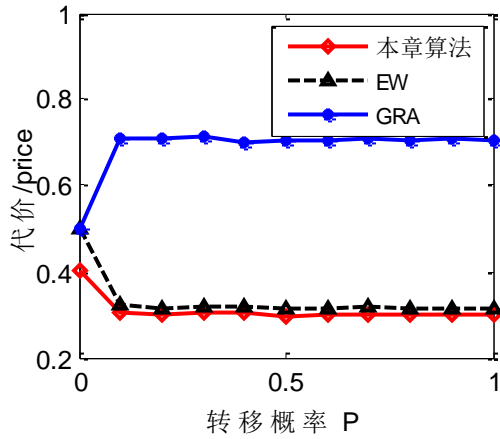


图 3.13 交互型业务的代价

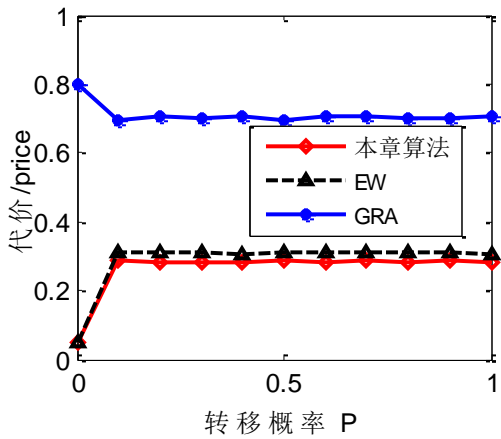


图 3.14 背景类业务的代价

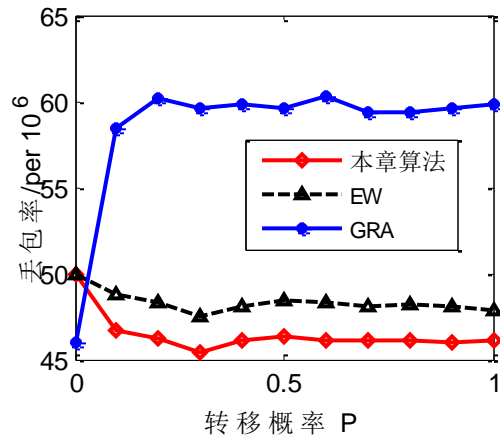


图 3.15 背景类业务的丢包率

因此，根据上述仿真结果并结合各种业务类型的特点，可以得出结论，本章算法可以根据业务类型提供令用户满意的 QoS。

3.6 本章小结

本章运用群组决策理论对多属性决策中多种权重向量进行组合，提出了一种网络选择算法。首先给出了本章的异构网络模型和简单算法流程，其次分别介绍熵权法、CRITIC 法 AHP 法和 G-1 法计算主客观权重向量，然后研究了群组决策理论，在异构环境下，充分利用群组决策集中多个决策者决定的特点，并充分考虑业务类型，用户偏好以及网络状况，通过四种赋权法分别得到权重向量，最后运用群组决策理论进行组合，通过相容性进行验证组合合理性。仿真结果表明，本章算法可以根据业务类型为用户提供令人满意的 QoS。

第四章 基于灰色关联分析的多网络接入算法

4.1 引言

不断革新的移动无线接入新技术与现存的无线接入网络一道，重叠覆盖在用户活动区域。多种无线接入技术在覆盖能力、技术特点、商业定位、服务质量方面千差万别，造成了多种异构无线网络长期共存的局面。异构无线网络融合作为实现高效整合异构无线网络资源的一种方式，已经成为驱动下一代无线接入技术革新与发展的引擎。在异构无线网络重叠覆盖的场景下，合理地选择无线网络可以为用户根据业务类型以及多样化的需求提供移动性服务与无缝连接，因此，异构无线网络接入选择一直是无线资源管理研究的一个热点。异构网络选择算法的研究如今逐渐从单网络选择向多网络选择过渡。多网络接入可以高效利用可用的异构无线网络，在保证能耗的前提下，充分提高用户吞吐量，为用户提供更佳的服务质量。

异构无线网络选择算法的研究经历多年的积累，如今已经取得了一定的成果。研究者将各类学科知识比如管理学、经济学模型与理论应用在此模块，大大推进了无线资源管理研究的多样化进程。多属性决策作为管理学理论，在异构网络决策时不仅有效，还成为该领域开展研究最为广泛的一个分支。文献[59]提出了一种由层次分析法确定主观权重结合灰色关联分析确定最佳网络连接目标的异构无线网络多属性决策算法。文献[35]将多属性决策理论与模糊理论相结合，提出了一种基于模糊层次分析法和 ELECTRE 的网络选择方案。文献[20]在异构网络覆盖场景下，对比了 SAW、TOPSIS、GRA 和 MEW 等多种经典多属性决策的算法性能。模糊逻辑经常结合神经网络理论应用在网络选择算法中。文献[36]在 GPRS 和 WLAN 网络重叠覆盖区域，使用神经网络模型检测信号衰落提出了一种垂直切换策略。相似地，博弈论理论在网络选择时也被研究者广为采用。文献[40]从用户和网络角度出发，提出一种基于非合作博弈的异构网络选择算法，通过综合考虑用户偏好、业务价格和准入代价得到最佳的网络选择目标。除此以外，最优化理论、效用方程等理论也逐渐应用在此领域。然而，上述算法均是针对单网络连接的，即移动终端选择一个最佳的网络连接。

随着可选网络的增多，以及多模移动终端技术的提升，单个移动终端同时接入多个异构无线网络来提升用户服务质量慢慢变为现实并逐渐成为异构无线网络接入的研究趋势。文献[60]提出了一种基于多网络同时连接的异构网络选择算法，该算法在保证用户能耗的前提下，有效提升了用户吞吐量。然而，该算法没有考虑多网络选择带来的网络负载加重情况。文献

[48]提出了一种基于多网络并行传输与 TOPSIS 的多模终端异构网络选择算法,该方法充分考虑用户移动性、网络负载等情况,可以为用户提供理想的服务质量。但该算法没有考虑业务类型,仅仅给出了一种属性权重下的网络性能情况。除此之外,基于多个异构网络并行传输的网络选择算法的研究仍然有待深入。

针对上述不足与多网络连接的研究现状,本章提出了一种基于灰色关联分析的多网络同时连接的异构网络选择算法。该算法对于移动终端网络多接入模块进行统筹规划。通过判断接收信号强度,为处于异构无线网络覆盖区域的移动终端确定可接入网络集合。充分考虑单网络接入与多网络同时接入的情况,结合可接入网络集合,进一步确定目标网络集集合。目标网络集集合中的每一个元素代表了网络连接的一种方案。通过为每个目标网络集计算吞吐量、接入代价、功能损耗与网络负载等参数构建网络属性集合,结合权重向量,形成多属性决策问题。最后,采用灰色关联分析算法解决此问题。仿真结果表明,与单网络和其他多属性多网络接入算法相比,本章所提出的多网络同时连接算法可以明显提升网络性能,针对不同权重向量,为用户提供满意的服务质量。

4.2 多网络接入系统模型

在多种异构无线网络重叠覆盖区域内,具有多种无线网络接口的多模移动终端可以选择同时接入多个可用网络。图 4.1 给出了移动终端多网络同时接入实现数据流量分集传输的示意图。假设在覆盖区域内有多个可选的无线接入网络(Radio Access Network, RAN),移动用户可以根据自身需要以及网络可用性智能地选择一个或者多个 RAN 接入,从而满足自身及其业务需求。

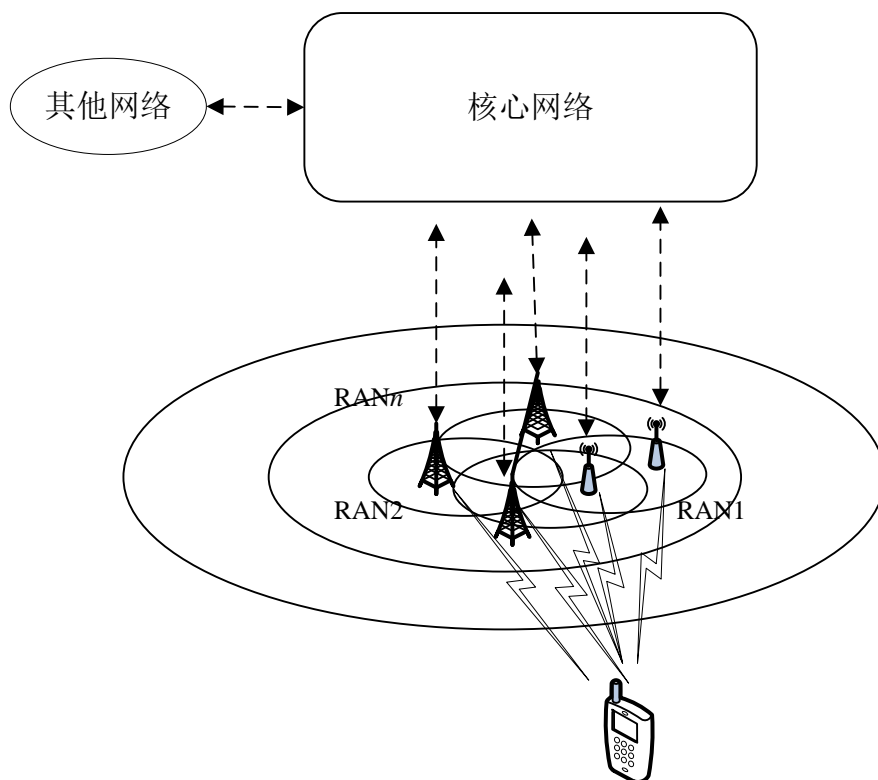


图 4.1 多模终端多网络接入示意图

要实现智能终端的多网络接入，支持多种无线接入技术（Radio Access Technology, RAT）的多模终端需要模块化的系统功能框架。图 4.2 给出了本章设计的多模终端多网络接入功能架构，主要包含接口控制模块（Interface Control Module, ICM）、信息处理模块（Information Process Module, IPM）、用户与网络信息模块（User and Network Information Module, UNIM）以及多接入控制模块（Multi-Access Control Module, MACM）。接口控制模块负责网络信息的采集，包括接收信号强度（Received Signal Strength, RSS）、网络可用信道（Available Channel, AC）等。接口控制模块对 RSS 以外的信息不做分析处理，直接打包发送给信息处理模块。接口控制模块通过对比 RSS 和接收信号强度门限值来控制相应网络接口的激活与关闭，对于 RSS 高于门限值的网络，则激活终端上该网络的接口，并开始网络连接准备，而由于用户移动或其他原因导致 RSS 低于门限值的无线网络实时关闭其相应网络接口。信息处理模块则根据接口控制模块和用户与网络信息模块提供的用户和网络信息计算各个网络的吞吐量、网络负载等参数。用户与网络信息模块存储了各个无线网络的接入费用、可连接信道数量以及用户偏好信息，这些信息需要定期更新，比如在采用协同无线资源管理^[61]的异构无线网络中，移动终端通过与每个网络的无线资源管理模块进行信息交互从而获取无线网络的基本信息。信息处理模块将处理后的信息与用户与网络信息模块发来的信息统一打包发送给接入控制模块。接入控制模块首先区分可用网络并建立可用网络集合，然后针对各种网络参数，采用相

应网络选择算法确定最佳网络集合，该集合可以包含单个网络或者多个网络，再通知接口控制模块调整网络连接的发起与建立。需要补充说明的是，多模移动终端多接入功能模块集聚在移动终端网络连接单元，各个模块之间高度互联，从而最小化信息传输时延。同时借助于终端技术的进步，大大减小信息处理时延。高速、实时的网络连接调整与控制策略可以兼顾终端移动性，为用户提供理想的服务质量（Quality of Service, QoS）。

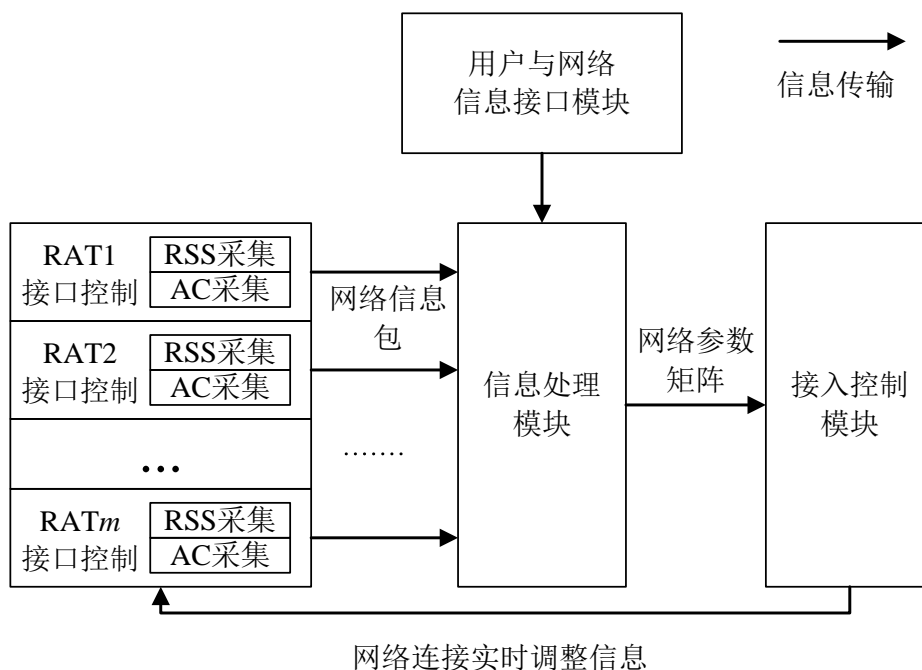


图 4.2 多模移动终端多接入功能模块框架

4.3 基于灰色关联分析的多网络接入异构网络选择算法

为了确定最合适的异构无线网络接入方案，本章采用在单网络选择算法广为使用的多属性决策理论对多网络接入问题进行求解。网络参数选择网络接入吞吐量（Access Throughput, AT）、网络负载均衡（Network Load Balance, NLB）、接入功耗（Access Power Consumption, APC）与接入代价（Network Cost, NC）作为多属性决策的属性参数。建立多属性决策问题，需要选取可接入网络集合，建立网络参数矩阵，确定属性相对权重向量，最后采用合适的多属性决策排序算法确定最佳目标网络。

4.3.1 异构网络多属性决策问题的建立

(1) 网络参数权重向量的确定

本文在第三章提出了一种基于群组决策的异构无线网络选择算法，其实质就是综合四种权重向量从而获取一个更佳的综合权重，多属性排序算法采用最简单的简单加权法的原因就是为了凸显权重向量的作用。然而，在多网络接入的网络选择算法中，算法的重点在于多网络功能的实现与目标网络集的确定，本文多属性排序算法采用的是灰色关联分析，这是一种偏主观的网络选择算法，例如文献[58]提出了一种基于层次分析法与灰色关联分析的单网络选择算法。与第三章算法和文献[58]不同的是，本章缺乏针对具体业务类型的专家判决矩阵，因此在本章中，用户与网络信息模块负责采集用户信息，即通过收集用户行为习惯与偏好从而确定网络参数的权重向量，权重向量表示为 $W = [w_1, w_2, w_3, w_4]$ 。采用这种方法的好处是有效地避免了多网络选择算法复杂性的进一步增加，有效降低处理时延。由于本章算法采用的网络参数数量不多且重要性相似，因此，在算法最初，网络参数享有相等的权重值。然后，随着时间的改变，用户行为习惯与偏好的改变，用户与网络信息模块也会相应地对权重向量实时地调整。因此，本章算法将分析不同的网络参数权重向量对算法的有效性与网络性能的影响。

(2) 可接入网络集合的确定

处于异构无线网络重叠覆盖区域内的移动用户，首先应当判断所有无线网络中值得连接的网络集合，即可接入网络集合 (Available network Set, AnS)。可接入网络集合的确定发生在移动终端接口控制模块。由于异构无线网络都具有一定的覆盖范围，但是终端距离无线接入点 (Access Point, AP) 越远，终端接收到的信号强度越弱，在此情况下建立网络连接，往往需要终端付出较大的发射功率，实现移动终端多条链路同时连接本来相对单网络连接就是更加耗能的，因此，为了避免终端能耗的过分恶化，本章通过设定接收信号强度门限值对可接入网络进行筛选。设定接收信号强度门限值来选取合适的网络连接在无线网络水平切换、垂直切换与网络选择算法研究早期被较多采用，如文献[19]介绍了一种基于接收信号强度的异构无线网络选择算法，对于低于 RSS 门限值的网络不予考虑，而选取具有最优 RSS 的异构无线网络作为切换选择目标。通过设定多个属性值来确定可接入网络集合可以有效减少目标网络的数量，但同时也增加了优质网络集合被排除的可能性，因为网络性能的确定不单单依靠比较每个网络属性与门限值的关系，而是需要建立效用方程综合评定。因此，在算法的早期，本章仅仅基于接收信号强度来确定可接入网络集合。

假设网络接收信号门限值表述为 $RSS^{\text{threshold}}$ ，对于所有满足接收信号强度门限要求，即大于门限值的无线网络，在终端接口控制模块被统一划分到可接入网络集合 AnS。因此，当移动终端停留在由 N 个异构无线网络场景下，此时可接入网络集合可以表述为

$$AnS = \{i | RSS_i(t) \geq RSS_i^{threshold}, i \in [1, N]\} \quad (4.1)$$

为了确定可接入无线网络集的数量，这里假设满足门限要求即 (4.1) 的异构无线网络数量为 M ，且 $M \leq N$ 。

(3) 目标网络集集合的确定

目标网络集 (Target network Set, TnS) 是指由任意满足 AnS 的网络构成的网络集合，它代表了多网络连接的各种可能性。TnS 可以用行向量表示，如 $TnS = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_M]$ ，其中 a_i 可以为 0 或者 1, 1 代表当前终端与第 i 个网络可以建立连接，0 则反之。基于多网络同时连接的异构无线网络选择算法，要兼顾网络选择过程中单个网络与多网络连接的可能性，因此，目标网络集合的数量会随着可接入网络集合规模的增大指数性的扩张。因此，在规模为 M 的可接入网络集合中，单网络连接的情况有 M 种，即分别选择一种网络进行接入；同时接入两个网络的情况有 $M \cdot (M-1)/2$ 可能；以此类推，目标网络集集合的数量可以达到 2^M 个，排除全部网络都不连接的情况，集合规模实际为 2^M-1 个。由于可接入无线网络的数目，即 M 一般不会很大，使得目标网络集集合始终处在可以处理和计算的范围之内。

(4) 目标网络集网络参数的计算

与单一网络选择算法确定网络参数不同，多网络选择算法将每个目标网络集当做一种网络连接的可能，因此，需要分别确定每种网络连接的属性参数。网络接入的吞吐量是移动终端最为看重的问题，也是无限资源管理的一个目标。多网络选择带来的问题当中包括较大的能量损耗与网络阻塞加重，因此，将接入网络负载和接入能耗作为多属性决策的属性参数，可以使得终端在能量与网络负载受限的情况下，作出更合适的决策。同时，接入代价也始终为用户重点考虑的因素之一。

对于任意目标网络集 $TnS = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_M]$ ，本章需要分别确定该网络集合的网络参数。首先考虑网络接入吞吐量情况。本章采用香农公式并结合接口控制模块检测的 RSS 信息计算网络 i 可以提供的接入吞吐量为

$$AT_i = \alpha_i \cdot B_i \ln \left(1 + \frac{RSS_i(t)}{N} \right), 0 \leq \alpha_i \leq 1 \quad (4.2)$$

其中 α 为吞吐量的利用率， B 是终端可享用的网络提供的带宽， N 为均值为 0、方差为 5 的高斯白噪声功率^[60]。

因此，目标网络集的可接入总吞吐量为

$$AT_{TnS} = \sum_{i=1}^M a_i \cdot AT_i \quad (4.3)$$

接口控制模块与用户和网络信息模块协作可以得知每种网络可以连接的总信道数，定义网络 i 的总信道数为 C_i^{Total} ， t 时刻可接入信道数为 C_i ，可接入信道数与总信道数的比值代表了网络实际可接入比例，比例越大，则说明网络负载情况越好。因此，本章通过计算目标网络集网络接入比例的方差来统计网络负载的情况，方差越大，说明网络负载情况越不均衡；反之，则说明网络负载情况良好，网络集负载较为均衡。下面给出了计算负载均衡程度的公式

$$NLB_{TnS} = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{i=1}^M a_i \cdot \left(\frac{C_i}{C_i^{total}} - \frac{1}{M} \cdot \sum_{j=1}^M \frac{C_j}{C_j^{total}} \right) \quad (4.4)$$

相似地，网络接入总代价为各个网络接入代价之和

$$NC_{TnS} = \sum_{i=1}^M a_i \cdot NC_i \quad (4.5)$$

最后，在统计网络接入功耗 APC 时，本章采用文献[60]提供的终端功耗计算方法，即

$$APC_{TnS} = \sum_{i=1}^M t_i \cdot (PC_i^{minT} + PC_i^{minR} + \beta_i PC_i^{Trans}) \quad (4.6)$$

其中， PC_i^{minT} 和 PC_i^{minR} 分别为移动终端在距离网络 i 的基站一定距离下的最小发射和接收功率，而 PC_i^{Trans} 为为满足基站最小接收功率门限移动终端最小的信号传输功率， β 为功率转换系数。其中 PC_i^{Trans} 由两部分组成，一部分为基站最小接收功率门限，另一部分为信号在考虑大尺度衰落与阴影衰落的无线信号传输时所需的传输功率，无线信道采用文献[62]中的所提供的传播模型。

自此，本小节已经介绍了四种无线网络参数的确定方法，由于目标网络集集合的规模可以达到 2^M-1 个，代表了 2^M-1 种网络连接的方案。这里为了表示方便，令

$$N(M) = 2^M - 1 \quad (4.7)$$

因此，该问题的多属性决策网络参数矩阵即目标网络集集合的网络参数矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} AT_{TnS1} & APC_{TnS1} & NC_{TnS1} & NLB_{TnS1} \\ AT_{TnS2} & APC_{TnS2} & NC_{TnS2} & NLB_{TnS2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ AT_{TnSN(M)} & APC_{TnSN(M)} & NC_{TnSN(M)} & NLB_{TnSN(M)} \end{bmatrix} = (x_{ij})_{N(M) \times N} \quad (4.8)$$

其中, N 代表网络参数的个数, 在本章算法中, $N=4$ 。

4.3.2 最佳网络集合的确定

4.3.1 小节给出了确定网络参数权重向量的方法并构建了目标网络集集合的网络参数矩阵, 下面将研究选出最佳目标网络集的方法。

灰色关联分析算法^[30]是一种有效分析离散序列间关联程度的测量方法。由于接口控制模块与用户和网络信息模块均周期性地检测网络参数, 因此, 网络参数实质上是时间离散状态连续变化的。灰色关联分析算法把每种可比较序列看做一个可行的解决方案, 将候选网络集分为不同的等级, 并选择等级最高的目标网络集作为最佳接入网络目标。评判网络等级需要计算网络集的灰色关联系数 (Grey Relational Coefficient, GRC), 它描述了网络集与理想网络集的近似程度, 最终与理想网络集最为接近的网络集具有最高的等级。文献[48]采用的 TOPSIS 算法虽然也是计算与理想方案的关系, 但是由于 TOPSIS 是假设网络参数是单调的。实际的网络参数并不是全都如此, 而灰色关联分析法可以有效处理非单调属性的情况。其次, TOPSIS 对于网络属性权重较高的参数具有更高的敏感性, 使得其在某些特定权重向量情况下可以取得理想的网络性能, 而 GRA 算法则对于权重向量的变化有更好地适应性。因此本章采用灰色关联分析算法来选出最佳网络集合。

基于灰色关联分析算法来确定目标接入方案的步骤如下所示:

(1) 网络参数矩阵的规范化

对于 (4.8) 中的网络参数, 参照本文 3.3 小节网络参数处理准则。网络接入吞吐量与网络负载均衡参数采用如下方法进行归一化:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i(x_{ij})}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})} \quad (4.9)$$

而对于其他两个参数采用下式进行归一化处理:

$$r_{ij} = \frac{\max_i(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})} \quad (4.10)$$

(2) 灰色关联系数的确定

该多网络同时接入问题的影响空间可以表征为 $\{P(X); Q\}$, 其中 $P(X)$ 为网络参数空间, Q 表示影响空间。首先, 对影响空间中的序列作如下表示:

$$x_0 = (x_0(k)), k = 1, \dots, N \quad (4.11)$$

$$x_i = (x_i(k)), k = 1, \dots, N \quad (4.12)$$

$$x_j = (x_j(k)), k = 1, \dots, N \quad (4.13)$$

在影响空间中，有序列：

$$x_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k)) \in X, i = 1, \dots, N(M); k = 1, \dots, N \quad (4.14)$$

采用局部灰色关联等级来计算灰色关联系数可表示为：

$$\gamma(x_i(k), x_j(k)) = \frac{\Delta_{\min.} + \Delta_{\max.}}{\Delta_{0i}(k) + \Delta_{\max.}}, i = 1, \dots, N(M); k = 1, \dots, N \quad (4.15)$$

其中， $\Delta_{\min.} = \min_{\forall j \neq i, \forall k} \|x_0(k) - x_j(k)\|$ ； $\Delta_{\max.} = \max_{\forall j \neq i, \forall k} \|x_0(k) - x_j(k)\|$ 。 x_0 为参考序列， x_i 为被比较序列。

当获得式 (4.15) 所示的灰色关联系数后，通常采用 GRC 的加权平均值作为灰色关联等级，如下表示：

$$Q = \bar{\gamma}(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^N w_k \gamma(x_i(k), x_j(k)) \quad (4.16)$$

其中， w 为每个网络参数对应的权重值。

由于 GRC 描述了每个被选网络与理想网络的相似程度，选择与理想网络方案最接近的网络集作为最佳目标网络集，最佳网络集可以表示为：

$$A_{GRA}^* = \arg \max_{i \in InS} Q_{0i} \quad (4.17)$$

4.3.3 算法步骤

基于灰色关联分析的多网络接入异构网络选择算法具体步骤如下：

第一步： 接口控制模块负责采集各个网络的接收信号强度与可接入信道参数，接口控制模块对接收信号强度以外的信息不做分析处理，直接打包发送给信息处理模块；

第二步： 接口控制模块通过比较接收信号强度与存储于用户与网络信息模块的无线网络接收信号门限值确定可接入网络集合，对于 RSS 高于门限值的网络，则将其纳入可接入网络集合并激活对应终端接口，为网络连接做准备；

第三步： 获取可接入网络集合后，充分考虑单网络接入与多网络接入的情况，确定目标网络集集合，目标网络集集合当中的每一个元素代表了网络连接的一种可能性，目标网络集集合应当涉及每一种网络连接的可能；

第四步：通过汇总目标网络集集合中各个网络的网络参数，即网络接入吞吐量（Access Throughput, AT）、网络负载均衡（Network Load Balance, NLB）、接入功耗（Access Power Consumption, APC）与接入代价（Network Cost, NC）等，建立目标网络集集合网络参数矩阵，并从用户和网络信息模块获取网络参数权重向量；

第五步：对上述建立的多属性决策问题采用灰色关联分析法进行处理，首先对网络参数矩阵进行归一化处理，其次，计算灰色关联系数与灰色关联等级，通过比较与理想方案的关系确定最佳网络选择方案；

第六步：多接入控制模块将最佳网络连接方案通知接口控制模块，从而建立相应的多网络连接。

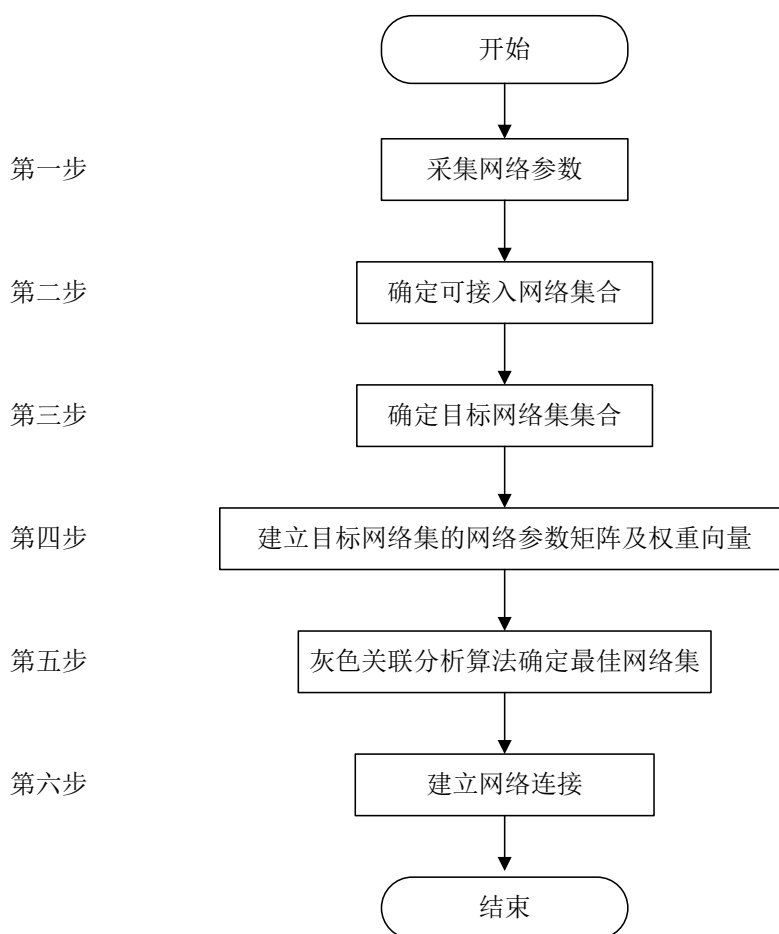


图 4.3 多接入算法流程图

4.4 仿真与性能分析

4.4.1 仿真场景

为了验证本章算法的有效性，本章采用如图 4.4 所示的异构无线网络场景，并使用 MATLAB 软件进行仿真分析。该场景中四种无线网络重叠覆盖，假设覆盖半径 3km、圆心位于原点位置的 RAN1 为 UMTS 网络，覆盖半径 1.5km、圆心位于原点的 RAN2 为 WiMAX 网络，而覆盖半径 0.2km、圆心位于横轴上左右距离原点 0.1km 的 RAN3 和 RAN4 均为 WLAN 网络。其他网络参数如表 4.1 所示。假设用户均匀出现在图 4.4 所示的网络区域，并以 0~10km/h 的速度在网络覆盖区域内任意方向移动。本章通过统计一段时间内用户的服务质量从来获取各个网络参数的平均性能。

本章选择网络接入吞吐量(Access Throughput, AT)、网络负载均衡(Network Load Balance, NLB)、接入功耗(Access Power Consumption, APC)与接入代价(Network Cost, NC)作为多属性决策的属性参数。假设网络参数最初享有相同的重要性，因此权重向量 W_1 为 $\{0.25, 0.25, 0.25, 0.25\}$ 。然而，由于用户偏好会随着业务类型及需要的改变而发生变化，权重向量的值也需要作出对应调整。因此，为了充分考虑多种不同情况下的网络性能，本章也将考察权重向量 $W_2 = \{0.3, 0.2, 0.2, 0.3\}$ 和 $W_3 = \{0.35, 0.15, 0.15, 0.35\}$ 时网络性能变化。需要补充说明的是，多网络选择的目标就是充分利用无线网络资源从而获取更大的网络接入吞吐量，同时，提升吞吐量也应顾及网络负载情况，因此，三种权重中，吞吐量和网络负载享有相对较大的权重，也突出了用户和网络关心的重点。

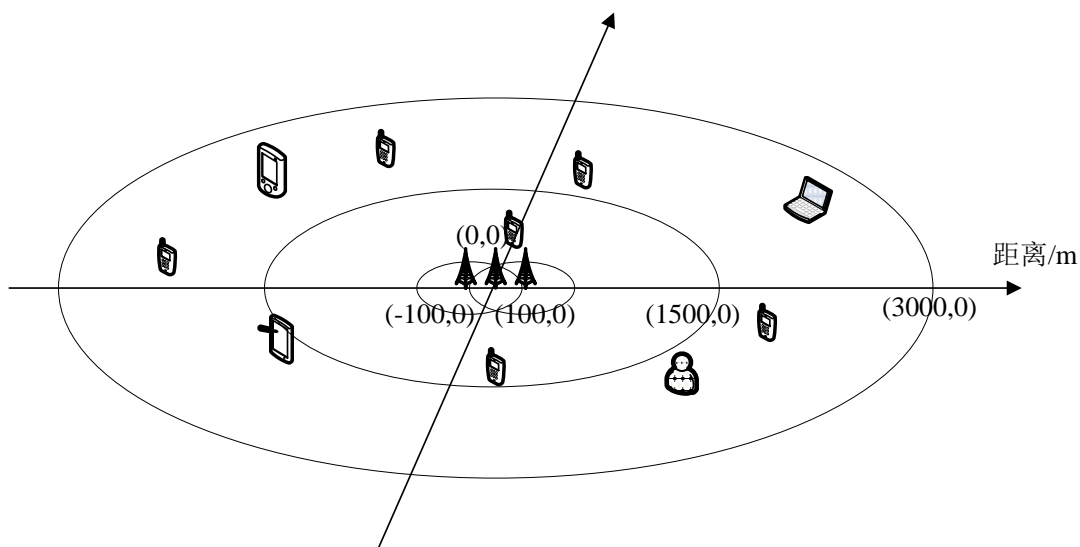


图 4.4 仿真场景

表 4.1 仿真参数^[60]

网络参数	RAN1	RAN2	RAN3	RAN4
吞吐量的利用率 α	0.85	0.7	0.6	0.6
功率转换系数 β	1/8	1/7	2/11	1/6
接收信号强度门限值 $RSS^{\text{threshold}}$ (dBm)	-108	-105	-95	-95
终端固定发射功耗 (mW)	20	12	8	8
终端固定接收功耗 (mW)	18	8	4	4
最小接收功率门限 (dBm)	17	12	9	9
单位距离路径损耗	5.27	27	8	8
费用 (元/min)	0.8	0.6	0.4	0.4
总带宽 (MHz)	5	15	11	11
信道总数	20	30	8	8

4.4.2 仿真结果分析

为了充分说明本章算法的性能，本章将分别采用文献[59]中的灰色关联分析单网络选择算法与文献[48]中基于 TOPSIS 的多网络选择算法进行对比。需要说明是，虽然文献[48]中也提出了基于多属性决策的多网络选择算法，但是该文章中仅仅考虑了固定权重下的网络性能情况，没有根据实际情况与需要变化相应调整权重向量，而本章算法充分考虑不同权重向量下的网络性能。

图 4.5~图 4.7 给出了三种权重向量下用户平均接入吞吐量的变化情况。从图中可以看出，随着用户数量的增多，一开始，由于网络资源较多，每个用户都倾向同时接入多个无线网络，平均接入吞吐量随着用户数的增多迅速变大，然而，随着用户数量的进一步增加，网络信道有限的情况下，选择接入多个网络的用户数在逐渐减少，用户之间对于无线信道的竞争也逐渐激烈，用户接入阻塞情况越发严重，这也是网络接入平均吞吐量达到顶峰后下降的原因。然后，随着用户数量的进一步增加，网络逐渐进入满负荷状态，接入吞吐量也因此达到平稳状态。从三张图中可以看出，在前两种权重向量条件下，本章算法能提供最好的吞吐量服务，而在第三种权重向量时，吞吐量性能仅次于文献[48]，优于单网络连接。 W_3 相比 W_1 和 W_2 ，接入吞吐量的权重最大，由于文献[48]采用的 TOPSIS 算法对于权重较高的属性具有较高的敏

感性^[20]，这也是该算法在 W_3 条件下具有较好吞吐量性能的原因。但是，综合三种情况可以看出，针对不同的权重向量，本章算法具有更好的网络接入吞吐量性能。

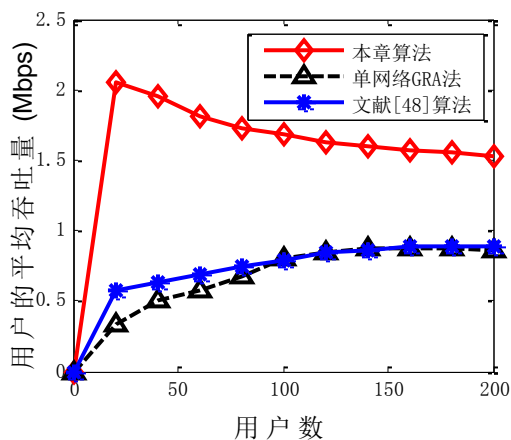
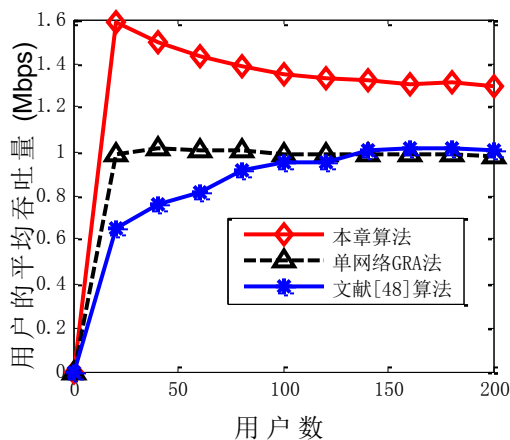
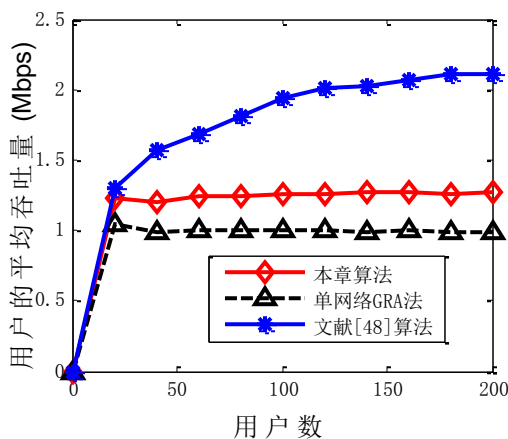
图 4.5 W_1 时的用户接入吞吐量图 4.6 W_2 时的用户接入吞吐量图 4.7 W_3 时的用户接入吞吐量

图 4.8~图 4.10 给出了三种权重向量下单位带宽的平均接入代价的变化情况。单位带宽的平均接入代价表示通过牺牲接入代价来提升网络吞吐量的效果。从图中可以看出，单位带宽的用户平均接入代价随着用户数量的增多迅速增加后达到平稳。这是因为，在用户数量较少的情况下，多网络接入较受欢迎，接入代价也因此提高。然后，用户数量的进一步增加，使得网络选择的规模逐渐达到平稳，接入方式也逐渐稳定，因此，接入代价在达到一定用户数后将逐渐保持不变。同其他两种算法相比，本章算法在单位带宽平均接入代价方面具有全面的优势。但不可避免的是，要得到更好的网络性能，网络总体接入代价相对较高，图 4.14 给出了 W_1 条件下网络接入代价，本章借助较高的接入花费，实现了更理想的吞吐量情况与网络性能。除此以外，单位带宽的平均接入代价更能说明回报率，也应该是用户更佳看重的。

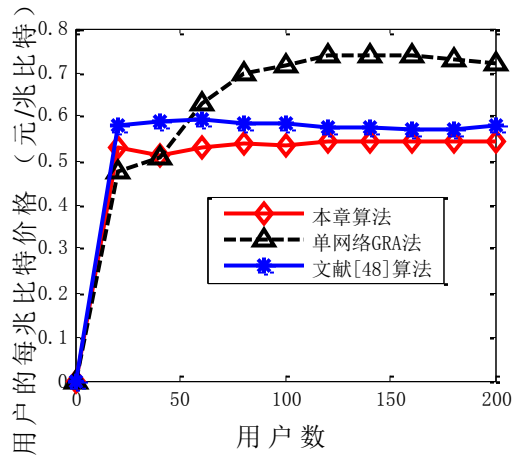


图 4.8 W_1 时的单位带宽网络接入代价

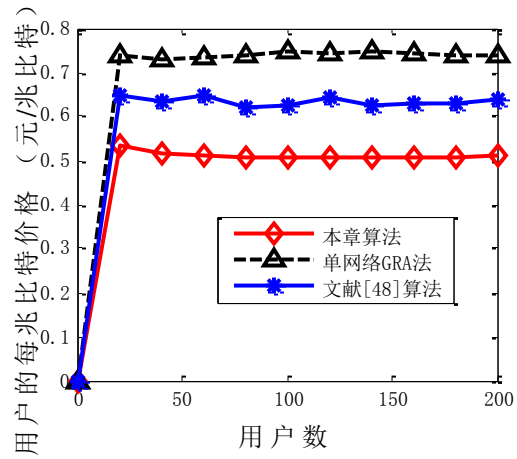


图 4.9 W_2 时的单位带宽网络接入代价

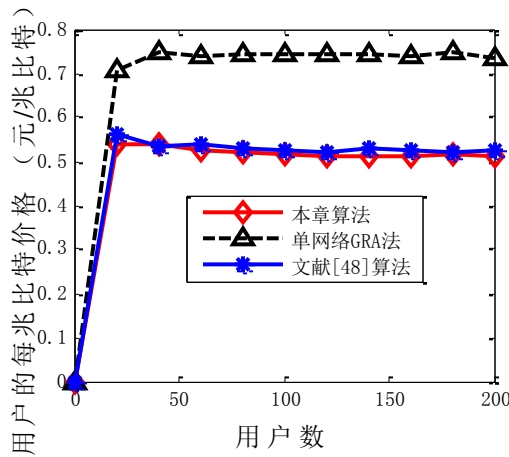


图 4.10 W_3 时的单位带宽网络接入代价

与单位带宽的平均接入代价相似，图 4.11~图 4.13 给出了三种权重下相似趋势的单位带宽的平均接入功耗情况。单位带宽的平均接入功耗表示功耗换取更佳服务质量的能力。单位带宽的平均接入功耗变化趋势和原因与接入代价相似，这里不再赘述。需要说明的是，尽管在图 4.15 中，本章算法 W_1 条件下总体能耗较高，但是通过更高的回报率，本章算法，在三种权重向量条件下，都拥有最好的单位带宽网络接入功能性能。图 4.16~图 4.19 给出了三种权重向量下的网络负载情况。从图中可以看出，在任何权重向量条件下，网络负载情况都是随着用户数量在增多的。因为毫无疑问，用户数量的逐渐增多，意味着更多的网络接入与更加激烈的无线网络资源的竞争，网络负载便随着用户数量的增加而变大。需要说明的是，在 W_3 条件下，本章算法拥有最佳的网络负载性能，尽管吞吐量情况不是最佳，但在其他三种性能的表现，还是奠定了本章算法的优势。

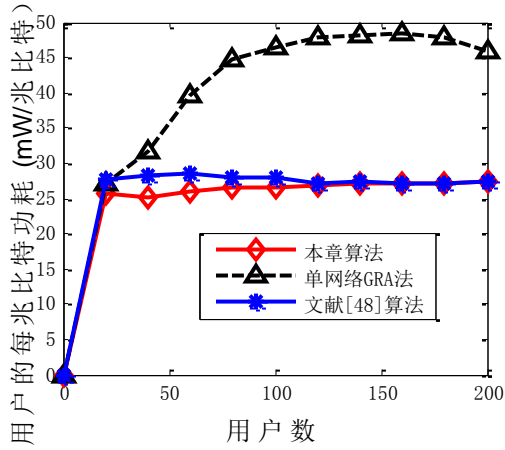


图 4.11 W_1 时的单位带宽网络接入功耗

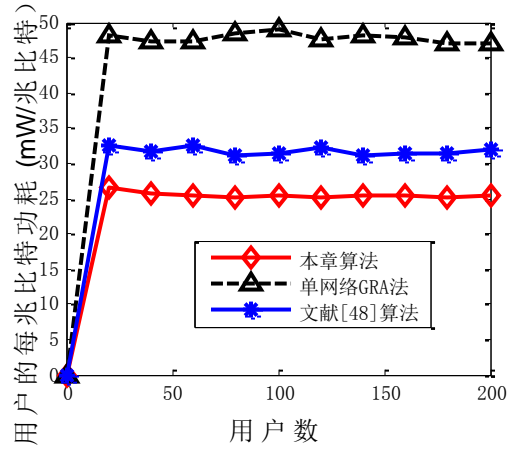


图 4.12 W_2 时的单位带宽网络接入功耗

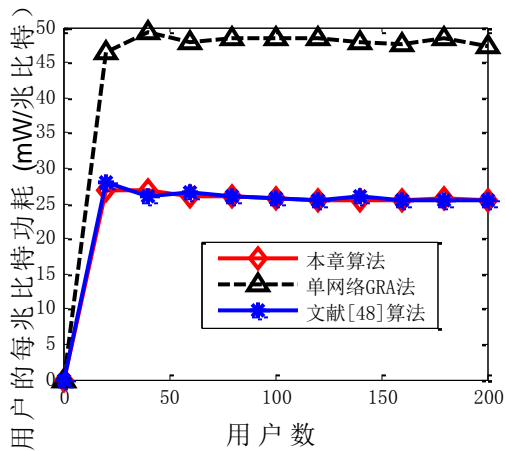


图 4.13 W_3 时的单位带宽网络接入功耗

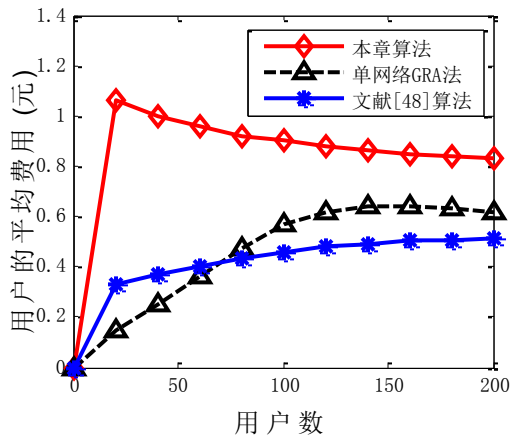


图 4.14 W_1 时的网络接入代价

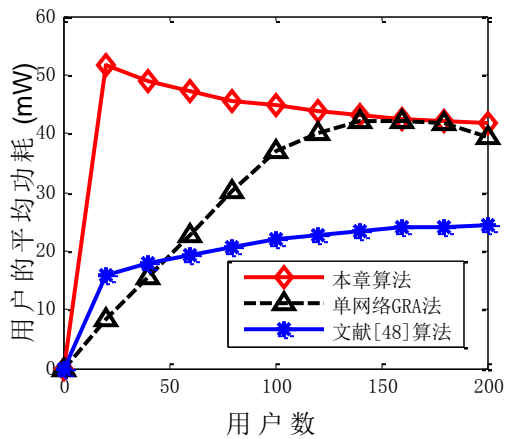


图 4.15 W_1 时的网络接入功耗

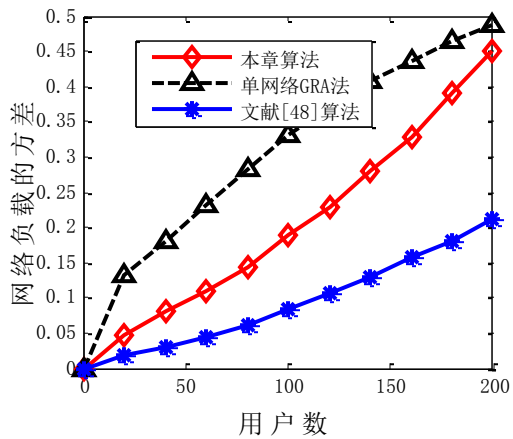
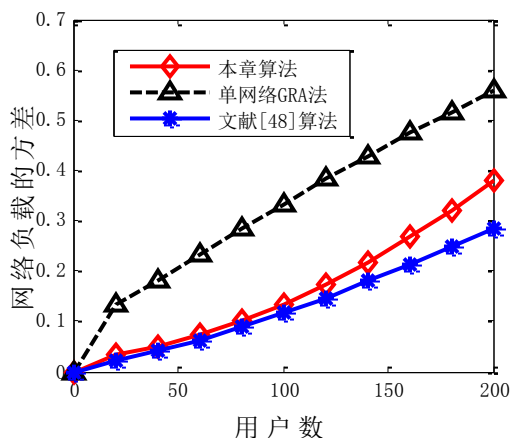
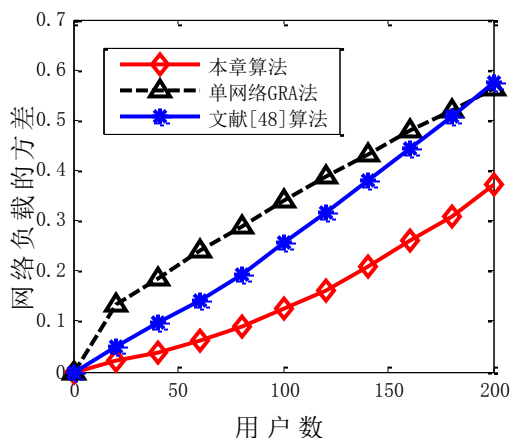


图 4.16 W_1 时的网络负载

图 4.17 W_2 时的网络负载图 4.18 W_3 时的网络负载

综上所述，相较于其他两种算法，本章算法在接入吞吐量和网络负载方面拥有理想的性能表现。而单位带宽的平均接入代价与功耗性能最佳，则说明，本章算法在转化多网络接入代价方面具有更理性的回报率。通过研究不同权重向量条件下的网络性能情况，可以看出，本章算法具有更好的适应性，在不同的业务类型条件下，均能提供较为理想的用户服务质量。

4.5 本章小结

为了更加充分地利用异构无线网络资源，本章提出了一种基于多网络同时连接的异构无线网络选择算法。该算法基于移动终端，对移动终端网络多接入模块进行统筹规划。通过判断接收信号强度，为处于异构无线网络覆盖区域的移动终端确定可接入网络集合。充分考虑单网络接入与多网络同时接入的情况，结合可接入网络集合，进一步确定目标网络集集合。目标网络集集合中的每一个元素代表了网络连接的一种方案。通过为每个目标网络集计算吞吐量、接入代价、功能损耗与网络负载等参数构建网络属性集合，结合权重向量，形成多属性决策问题。最后，采用灰色关联分析算法解决此问题。仿真结果表明，与单网络和其他多属性多网络接入算法相比，本章所提出的多网络同时连接算法可以明显提升网络性能，针对不同权重向量，为用户提供满意的服务质量。

第五章 基于生灭过程的多网络接入的优化算法

5.1 引言

随着 4G 技术大规模商用, 用户可以选择的无线网络服务更加多样, 下一代无线网络技术的发展使得多种异构网络共存的局面更加复杂。异构网络融合作为一种高效使用多种异构网络的无线资源管理 (RRM) 技术被广泛研究, 而异构网络选择算法作为实现网络融合的关键技术也因此成为研究热点。

3GPP 组织提出的协同无线资源管理 (CRRM) 的概念能有效实现无线资源管理, 异构网络接入算法作为无线资源管理的关键方法, 文献[64]提出了一种基于层次分析法关键技术经过多年的研究已经取得一定进展。文献[41]提出了基于模糊神经网络的异构无线网络接入算法, 文献[63]提出了基于进化博弈理论提高能效的网络选择和模糊逼近理想解排序法的网络选择算法。在文献[65]中, 提出了一种端到端的基于不同业务类型的无线资源管理方法, 该方法将用户移动性作为网络选择的一个影响因素。在文献[66]中, 算法以用户偏好为导向, 通过联合熵权法 (EW) 和模糊层次分析法 (FAHP) 来获取令用户满意的 QoE。在系统总带宽受限前提下, 文献[67]将多种目标函数转化为限制条件, 合理选择网络从而使得网络内终端使用时间最大化。但是上述文献中的算法在进行网络选择时, 目标均是单一最佳网络。随着异构网络共存局面的复杂化以及终端多模技术的发展, 相比于单网络选择算法, 终端同时接入多个异构网络在实现系统性能的优化, 提升用户服务质量以及提高无线资源的利用效率方面都有很大的优势。文献[60]提出了一种基于多网络同时连接的异构网络选择算法, 该算法在保证用户能耗的前提下, 有效提升了用户吞吐量。然而, 该算法没有考虑多网络选择带来的网络负载加重情况。文献[48]提出了一种基于多网络并行传输与 TOPSIS 的多模终端异构网络选择算法, 该方法充分考虑用户移动性、网络负载等情况, 可以为用户提供理想的服务质量。但该算法没有考虑业务类型, 仅仅给出了一种属性权重下的网络性能情况。文献[68]提出了一种涉及到多个无线接入网络中并行传输的算法, 但决策机制较为简单。

针对上述不足, 本章提出了一种基于生灭过程的异构网络多网络优化接入算法。利用生灭过程来分析异构网络系统的性能, 得到每个网络的生灭过程稳态分布。通过进一步推导得到异构网络系统中总的效用, 效用函数包含稳态时系统总的单位代价吞吐量和网络非阻塞率, 从而获取优化的目标函数。目标函数包含一个比例因子向量, 表示异构网络重叠区域内接入

不同类型和多种异构网络的用户比例，通过选择合理的用户接入比例，来实现系统目标函数的最大化。本章采用次梯度方法来获取目标函数的最佳解。仿真结果表明，该方法可以有效提升异构网络系统的联合效用以及吞吐量，从而改善无线资源的使用效率。

本章接下来的内容安排如下：第 2 节给出异构网络的系统模型、切换率和生灭过程理论；第 3 节结合生灭稳态分布构建了系统联合效用模型，提出采用次梯度方法求解效用解的多网络接入方法；第 4 节通过仿真说明该方法可以改善无线资源率提高系统效用和吞吐量；第 5 节总结全文。

5.2 异构网络系统模型和稳态方程

本章的异构网络模型如图 5.1 所示^[69]，异构场景由 UMTS（Universal Mobile Telecommunications System）和 WiMAX（Worldwide Interoperability for Microwave Access）两个网络组成，两个网络有一定的重叠区域。每个网络对应的 RRM 实体负责收集网络参数信息，包括终端移动速度、网络覆盖半径、网络信道带宽和信道数、业务到达率等，然后将测量信息发送给 CRRM 服务器。CRRM 服务器根据所接收信息进行网络决策，并将决策结果反馈给每个网络的 RRM 实体，RRM 实体负责具体的决策执行和资源分配。

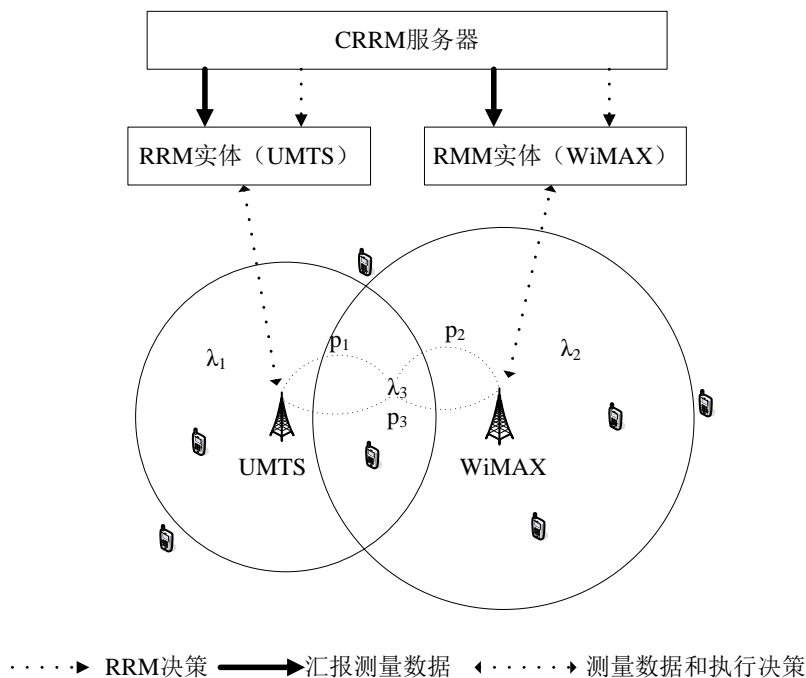


图 5.1 异构网络系统模型和 CRRM 结构

为了便于分析，本章假设用户业务为视频业务。因此给出以下网络参数的定义： λ_0 表示网络重叠区域内视频业务的到达率，UMTS 和 WiMAX 网络非重叠区域内视频业务的到达率

分别为 λ_1 和 λ_2 ；业务服务时间服从指数分布，其均值定义为 $1/\mu$ ； v 表示终端的平均移动速度； d_1 和 d_2 分别定义为 UMTS 和 WiMAX 网络的覆盖半径，其分配给视频业务的信道数分别为 C_1 和 C_2 。此外，泊松分布与负指数分布均具有无记忆特征。为方便使用马尔科夫链理论，这里规定每种网络信道所提供的数据传输速率是相等的，分别定义为 R_1 和 R_2 ，而占用这两种信道所要花费的代价定义为 $Cost_1$ 和 $Cost_2$ 。

本章方法将用户的移动性作为影响系统效用的一个重要因素，通过切换率来反映用户的移动性，文献[70]给出了角度移动模型的用户切换率表达式，即

$$\lambda^h = \frac{2nv}{\pi d} \tag{5.1}$$

其中 n 表示网络中正在接受服务的用户数， d 表示当前网络的覆盖半径， v 是终端平均移动速度。

随着移动终端技术的发展，本章假设异构网络中的终端均是多宿终端（Multi-homed terminal），多宿终端有别于多模终端（Multi-mode terminal），它可以满足移动数据的并行传输，即终端可以同时接入不同的异构网络享受不同网络带来的网络服务。多种异构网络同时接入可以更好地支持用户的移动性，同时提升系统的性能^[39]。图 5.2 是网络重叠区域多宿用户多网络接入模型，RRM 实体通过接收终端发送的用户信息和搜集的网络属性参数，发送给 CRRM 进行决策，再根据来自 CRRM 的决策信息，通知各个终端，允许终端接入 UMTS 网络、WiMAX 网络或者同时接入这两种网络，在保证系统总性能的前提下满足每个终端的请求。

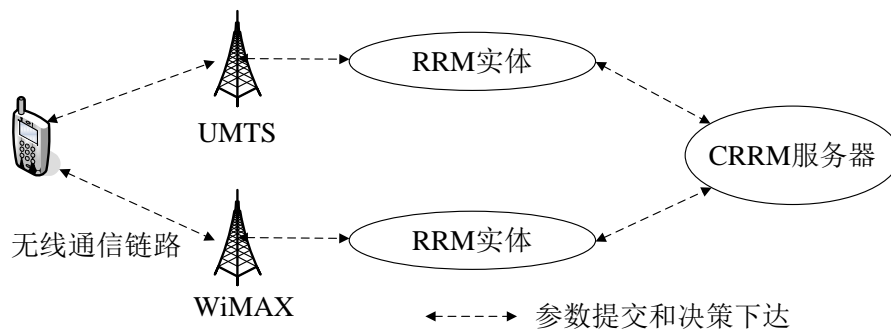


图 5.2 多宿终端多网络接入模型

本章采用连续时间马尔科夫链的生灭过程来分析每个网络的性能^[71]。假设网络的信道数为 C ，每个用户在一种网络中只能占用一个信道，因此最多有 C 个用户使用了信道，考虑到信道完全没有被利用的情况，一共有 $C+1$ 个网络状态，该马尔科夫过程如图 5.3 所示， i 表示该网络中有 i 个视频信道被用户使用。其中 λ^i 和 μ^i 表示出生率和死亡率。根据文献[39]中的

结论，该生灭过程的稳态分布为

$$\pi^i = \left(1 + \sum_{j=1}^C \left(\prod_{k=0}^{j-1} \lambda^k / \prod_{l=1}^j \mu^l \right) \right)^{-1} \left(\prod_{k=0}^{i-1} \lambda^k / \prod_{l=1}^i \mu^l \right), 0 \leq i \leq C \quad (5.2)$$

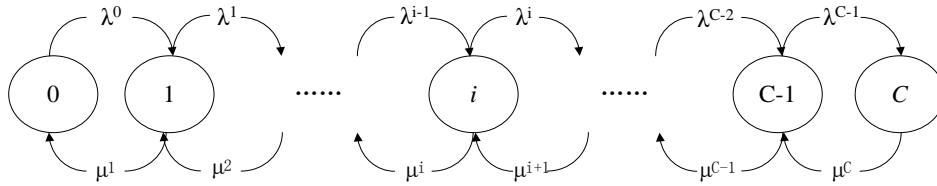


图 5.3 马尔科夫链

5.3 基于生灭过程的异构网络多网络接入优化算法

5.3.1 构建系统效用方程

在图 5.1 两个网络的重叠区域，移动用户有不同的异构网络可供选择。合理的网络选择可以在满足用户需求的情况下使得系统获取更好的吞吐量、网络接入率等性能。本章提出的方法通过合理分配网络重叠区域接入不同网络的比例提升系统性能。该方法规定，在重叠区域，移动多宿终端有三种选择，即接入 UMTS 网络、接入 WiMAX 网络以及同时接入两个网络，这里定义三种情况下的业务到达率占据重叠区域总业务到达率的比例分别为 p_1 、 p_2 和 p_3 。CRRM 服务器根据当前网络资源情况分配比例因子来实现无线资源的合理应用。

本章采用生灭过程理论来分析两个网络的性能。根据图 5.3，网络场景包含两个无线接入网，RAN1 和 RAN2，网络 j ($j=1,2$) 中马尔科夫状态数为 C_j+1 。网络 j 从状态 i 转移到状态 $i+1$ 的出生率定义为 λ_j^i ，其重叠区域的业务到达率为 $p_j \lambda_0$ ，但是由于同时接入两个网络的业务到达率为 $p_3 \lambda_0$ ，因此网络 j 在重叠区域内的业务到达率为 $(p_j + p_3) \lambda_0$ 。出生率除了包含网络非重叠区域和重叠区域内业务到达率外，由于终端的移动特性，还应当包含网络内的平均切换率。这里定义网络 j 的网络平均切换率为 $\overline{\lambda_j^h}$ ，根据动态平衡理论^[70]，终端从网络 j 中切换出去的用户数与外部终端切换到网络 j 中的用户数是相等的，因此，这里通过计算网络 j 中切换出去的概率来得到平均切换率。假设稳定状态下，网络 j 的平均用户数为 M_j ，根据公式 (5.1)，平均切换率 $\overline{\lambda_j^h}$ 表示为

$$\overline{\lambda_j^h} = \frac{2M_j}{\pi d_j} \quad (5.3)$$

其中 v 为用户平均运动速度。因此出生率可以写为

$$\lambda_j^i = \lambda_j + (p_j + p_3)\lambda_0 + \overline{\lambda_j^h}, i=0, \dots, C_j - 1, 1 \leq j \leq 2 \quad (5.4)$$

同样的，网络 j 从状态 i 转移到状态 $i-1$ 的死亡率我们定义为 μ_j^i 。 μ_j^i 由两部分组成，首先是视频用户业务结束率，其次是终端移动导致的从网络 j 切换到网络 j 外部的切换率。由于网络 j 中当前用户数为 i ，则视频用户业务结束率为 $i\mu$ ；结合公式 (5.1) 得到平均切换率为 $2iv/(\pi d_j)$ ，其中 v 为用户平均运动速度。因此死亡率为

$$\mu_j^i = i \left(\mu + \frac{2v}{\pi d_j} \right), i=1, \dots, C_j, 1 \leq j \leq 2 \quad (5.5)$$

结合公式 (2) 可以得到，网络 j 的生灭过程稳态方程为

$$\pi_j^i = \left(\sum_{k=0}^{C_j} \left(\frac{(\xi_j)^k}{k!} \right) \right)^{-1} (\xi_j)^i / i!, 0 \leq i \leq C_j, 1 \leq j \leq 2 \quad (5.6)$$

$$\text{其中 } \xi_j = \frac{\lambda_j + (p_j + p_3)\lambda_0 + \overline{\lambda_j^h}}{\mu + 2v/(\pi d_j)} \quad (5.7)$$

接下来根据稳态分布结论，即公式 (5.2)，网络 j 中平均用户数为

$$M_j(\xi_j) = \sum_{i=0}^{C_j} i \pi_j^i = \xi_j \left(1 - \left(\sum_{k=0}^{C_j} \left(\frac{(\xi_j)^k}{k!} \right) \right)^{-1} (\xi_j)^{C_j} / C_j! \right) = \xi_j (1 - P_j^b) = \xi_j P_j^{nb} \quad (5.8)$$

这里定义 P_j^b 和 P_j^{nb} 分别为网络阻塞率和网络接入率，且

$$P_j^b = 1 - P_j^{nb} = \pi_j^{C_j} = \left(\sum_{k=0}^{C_j} \left(\frac{(\xi_j)^k}{k!} \right) \right)^{-1} (\xi_j)^{C_j} / C_j! = P(\xi_j) \quad (5.9)$$

将平均用户数公式 (5.8) 代入公式 (5.3)，则从网络 j 内切换到网络外的平均切换率表示为

$$\overline{\lambda_j^h} = \frac{2M_j(\xi_j)v}{\pi d_j} = \frac{2\xi_j v P_j^{nb}}{\pi d_j} = \frac{2v P_j^{nb}}{\pi d_j} \frac{\lambda_j + (p_j + p_3)\lambda_0 + \overline{\lambda_j^h}}{\mu + 2v/(\pi d_j)} \quad (5.10)$$

为方便计算，对公式 (5.7) 作合并同类项处理，得到关于 P_j^b 的表达式

$$\overline{\lambda_j^h} = \frac{2v P_j^{nb} (\lambda_j + (p_j + p_N)\lambda_0)}{\pi d_j \mu + 2v P_j^b} = f(P_j^b) \quad (5.11)$$

将上式代入公式 (5.9)，得到

$$P_j^b = P\left(\xi_j\right)\Big|_{\xi_j = \frac{\lambda_j + (p_j + p_N)\lambda_0 + f(P_j^b)}{\mu + 2v/(\pi d_j)}} = g\left(P_j^b\right) \quad (5.12)$$

这里定义

$$\varphi(x) = x - g(x) \quad (5.13)$$

则 P_j^b 为上式等于零的根。由于

$$\varphi'(x) = 1 + \frac{1}{\mu + 2v/(\pi d_j)} \frac{2v(\lambda_j + (p_j + p_N)\lambda_0)(\pi d_j \mu + 2v) P_j^b (C_j - \xi_j P_j^{nb})}{(\pi d_j \mu + 2vx)^2 \xi_j} \Big|_{\xi_j = \frac{\lambda_j + (p_j + p_N)\lambda_0 + f(P_j^b)}{\mu + 2v/(\pi d_j)}} \quad (5.14)$$

网络最多接纳的用户数不会超过信道数，即 $M_j(\xi_j) = \xi_j P_j^{nb} < C_j \sum_{i=0}^{C_j} \pi_j^i = C_j$ ，则 $\varphi'(x) > 0$ ，

因此容易看出公式 (5.13) 为关于 P_j^b 的单调增函数。又由于 $0 < \varphi(x) < 1$ 而 $\varphi(0) = -f(0) < 0$ ， $\varphi(1) = 1 - f(1) > 0$ 可以用二分法求出 P_j^b ，进而求取 $\bar{\lambda}_j^h$ 。获取网络阻塞率和平均切换率后，我们可以进一步求取系统稳定状态用户数、系统吞吐量等，接下来构建系统效用方程。

本章中系统效用分为两部分：单位代价吞吐量模型和网络接入率模型。异构网络的目标是获取更高的网络吞吐量，这里将代价情况考虑进去，使得网络选择更注重吞吐量的性价比。考虑网络接入率是因为更大的吞吐量会造成更高的网络阻塞，因此必须综合考虑。具体参数模型下面给出，首先网络 j 获取的单位代价吞吐量模型为

$$T(\bar{\mathbf{p}}) = \frac{R_j M(\xi_j)}{Cost_j} \quad (5.15)$$

网络接入率模型为

$$A(\bar{\mathbf{p}}) = 1 - P_j^b = P_j^{nb} \quad (5.16)$$

定义网络 j 的效用函数为

$$U(\bar{\mathbf{p}}) = \alpha T(\bar{\mathbf{p}}) + A[\bar{\mathbf{p}}] = \frac{\alpha R_j M(\xi_j)}{Cost_j} + P_j^{nb} = Q_j M(\xi_j) + P_j^{nb} \quad (5.17)$$

其中 α 为使得吞吐量和网络接入率在相同数量级的调节因子。

$$Q_j = \frac{\alpha R_j}{Cost_j} \quad (5.18)$$

本章异构网络系统模型中包含两个异构网络，因此，最终的系统总效用定义为

$$U(\vec{p}) = \sum_{j=1}^{N-1} (Q_j M(\xi_j) - P_j^b) = \sum_{j=1}^{N-1} (Q_j \xi_j (1 - P_j^b) - P_j^b) = \sum_{j=1}^{N-1} \left(Q_j (1 - P_j^b) \frac{\lambda_j + (p_j + p_N) \lambda_0 + \bar{\lambda}_i^h}{\mu + 2\nu / (\pi d_j)} - P_j^b \right) \quad (5.19)$$

其中 N 为 \mathbf{p} 向量的维数，这里 $N=3$ 。

可以通过分配合适的比例因子，即 \vec{p} 来最大化系统总效用，从而获取更优异的网络性能。因此，上述问题可以转化为凸优化问题

$$\begin{aligned} \max U &= \sum_{j=1}^{N-1} (Q_j M(\xi_j) - P_j^b) \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^N p_j &\leq 1, p_1, \dots, p_N \geq 0 \end{aligned} \quad (5.20)$$

为了分析方便，这里给出系统吞吐量的表达式

$$T'(\vec{p}) = \sum_{j=1}^{N-1} (R_j M(\xi_j)) = \sum_{j=1}^{N-1} (Q_j \xi_j (1 - P_j^b)) = \sum_{j=1}^{N-1} \left(Q_j (1 - P_j^b) \frac{\lambda_j + (p_j + p_N) \lambda_0 + \bar{\lambda}_i^h}{\mu + 2\nu / (\pi d_j)} \right) \quad (5.21)$$

以及系统网络接入率的表达式

$$p_s^{nb} = \frac{M(\xi_1) + M(\xi_2)}{\xi_1 + \xi_2} = \frac{\xi_1 p_1^{nb} + \xi_2 p_2^{nb}}{\xi_1 + \xi_2} \quad (5.22)$$

5.3.2 系统效用凸优化问题的证明

为了说明公式 (5.20) 是一个凸优化问题，需要证明式 (5.19) 是凸函数，这里可以通过证明效用函数关于 \mathbf{p} 向量的二阶偏导矩阵（黑色矩阵），即 $\frac{\partial^2 U}{\partial \mathbf{p}^2}$ ，是一个负定矩阵来说明，设

此矩阵记为 \mathbf{A} 。根据凸优化问题的结论，矩阵 \mathbf{A} 为负定矩阵的充要条件为 $-\mathbf{A}$ 是正定矩阵。因此，本章通过判定矩阵 $-\frac{\partial^2 U}{\partial \mathbf{p}^2}$ 的正定性来证明该问题是凸优化问题。 $-\frac{\partial^2 U}{\partial \mathbf{p}^2}$ 可以写成如下形式

式

$$-\mathbf{A} = -\frac{\partial^2 U}{\partial \mathbf{p}^2} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 U}{\partial p_1^2} & 0 & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_1 \partial p_3} \\ 0 & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_2^2} & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_2 \partial p_3} \\ -\frac{\partial^2 U}{\partial p_3 \partial p_1} & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_3 \partial p_2} & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_3^2} \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

容易证明, $\frac{\partial^2 U}{\partial p_3 \partial p_1} = \frac{\partial^2 U}{\partial p_1 \partial p_3} = \frac{\partial^2 U}{\partial p_1^2}$ 且 $\frac{\partial^2 U}{\partial p_3 \partial p_2} = \frac{\partial^2 U}{\partial p_2 \partial p_3} = \frac{\partial^2 U}{\partial p_2^2}$, 则矩阵变为

$$-\mathbf{A} = -\frac{\partial^2 U}{\partial \mathbf{p}^2} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 U}{\partial p_1^2} & 0 & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_1^2} \\ 0 & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_2^2} & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_2^2} \\ -\frac{\partial^2 U}{\partial p_1^2} & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_2^2} & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_3^2} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

可以看出, 上述矩阵为三阶实对称矩阵。根据文献[72]中引理, “ n 阶实对称矩阵为半正定矩阵的充要条件为该矩阵的全部特征值非负”。由于 $\frac{\partial^2 U}{\partial p_3^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial p_1^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial p_2^2}$, 对矩阵进行线性行变换后变为

$$-\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 U}{\partial p_1^2} & 0 & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_1^2} \\ 0 & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_2^2} & -\frac{\partial^2 U}{\partial p_2^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

矩阵 $-\mathbf{A}$ 和 $-\mathbf{A}'$ 有相同的特征值。接下来求解矩阵特征值。根据方阵特征值的定义, 则特征值为下式的解

$$|-\mathbf{A}' - \lambda \mathbf{E}| = 0 \quad (5.26)$$

其中 \mathbf{E} 为三阶单位矩阵。则矩阵特征值为

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\frac{\partial^2 U}{\partial p_1^2} \\ \lambda_2 = -\frac{\partial^2 U}{\partial p_2^2} \\ \lambda_3 = 0 \end{cases} \quad (5.27)$$

因此，只要 λ_1, λ_2 和 λ_3 均不小于零，即满足

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U}{\partial p_1^2} \leq 0 \\ \frac{\partial^2 U}{\partial p_2^2} \leq 0 \end{cases} \quad (5.28)$$

时，特征值全部非负，矩阵 $-A$ 具有半正定性^[73]，即矩阵 A 为半负定矩阵，公式 (5.19) 为凸函数。

条件 (5.28) 的证明如下，对于网络 j ($j=1,2$)

$$\frac{\partial P_j^b}{\partial \xi_j} = \frac{P_j^b (C_j - \xi_j P_j^{nb})}{\xi_j} \quad (5.29)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \xi_j} = Q_j (1 - P_j^b (C_j + 1 - \xi_j P_j^{nb})) - \frac{P_j^b (C_j - \xi_j P_j^{nb})}{\xi_j} \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial \xi_j^2} &= -Q_j \frac{P_j^b}{\xi_j} ((C_j + 1 - \xi_j P_j^{nb})(C_j - \xi_j P_j^{nb} + \xi_j P_j^b) - \xi_j) \\ &\quad - \frac{P_j^b}{\xi_j^2} (C_j - \xi_j + 2\xi_j P_j^b)(C_j - \xi_j P_j^{nb}) + \frac{C_j P_j^b}{\xi_j^2} \end{aligned} \quad (5.31)$$

令 $\frac{\partial U}{\partial \xi_j} \geq 0$ 得

$$P_j^b \leq \frac{Q_j}{Q_j (C_j + 1 - \xi_j P_j^{nb}) + (C_j - \xi_j P_j^{nb}) / \xi_j} \quad (5.32)$$

这里假设式 (5.32) 为网络阻塞率的上限。

令 $\frac{\partial^2 U}{\partial \xi_j^2} \leq 0$ 可得

$$P_j^b \geq \frac{C_j + Q_j \xi_j^2}{\xi_j (Q_j \xi_j (C_j + 1 - \xi_j P_j^{nb}) + (C_j - \xi_j P_j^{nb}))} - \frac{C_j - \xi_j P_j^{nb}}{\xi_j} \quad (5.33)$$

这里假设式 (5.33) 为网络阻塞率的下限。同时满足上下限要求的情况才能使得优化问题有最优解。

效用 U 对 \mathbf{p} 向量的一阶和二阶偏导分别为

$$\frac{\partial U}{\partial p_j} = \frac{\partial U}{\partial \xi_j} \frac{\partial \xi_j}{\partial p_j} \quad (5.34)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial p_j^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial \xi_j^2} \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial p_j} \right)^2 + \frac{\partial U}{\partial \xi_j} \frac{\partial^2 \xi_j}{\partial p_j^2} \quad (5.35)$$

根据文献[6]中的结论，这里可以得到

$$\frac{\partial \xi_j}{\partial p_j} = \frac{\lambda_0}{\mu + 2\nu/(\pi d_j)} \left(1 + \frac{2\nu P_j^{nb}}{\pi d_j \mu + 2\nu P_j^b} \right) \left(1 + \frac{2\pi P_j^b d_j \nu (\lambda_j + (p_j + p_N) \lambda_0 (C_j - \xi_j P_j^{nb}))}{(\pi d_j \mu + 2\nu P_j^b)^2 \xi_j} \right)^{-1} \quad (5.36)$$

则 $\frac{\partial \xi_j}{\partial p_j} > 0$ 。根据文献[6]中的结论，容易证明 $\frac{\partial^2 \xi_j}{\partial p_j^2} < 0$ 。对于满足上下限要求，即当满足 $\frac{\partial U}{\partial \xi_j} \geq 0$

和 $\frac{\partial^2 U}{\partial \xi_j^2} \leq 0$ 时，对于 $j=1$ 和 2 ，由于 $\frac{\partial^2 \xi_j}{\partial p_j^2} < 0$ ，则 $\frac{\partial^2 U}{\partial p_j^2} \leq 0$ 。因此矩阵 \mathbf{A} 是半负定矩阵。式 (5.19)

是一个凸函数。

5.3.3 凸优化问题的求解

上面证明了公式 (5.19) 为一个凸函数，根据式 (5.20) 可知可行域是凸集，因此问题 (5.20) 是一个凸优化问题。将上述问题写成拉格朗日乘子函数表达式

$$\begin{aligned} \max L(\bar{\mathbf{p}}, \gamma) &= \sum_{j=1}^{N-1} \left(Q_j (1 - P_j^b) \frac{\lambda_j + (p_j + p_N) \lambda_0 + \bar{\lambda}_i^h}{\mu + 2\nu/(\pi d_j)} - P_j^b \right) - \gamma \left(\sum_{j=1}^N p_j - 1 \right), \gamma > 0 \\ \text{s.t. } p_1, \dots, p_N &\geq 0 \end{aligned} \quad (5.37)$$

这里 $N=3$ 。按照拉格朗日乘子函数的一般解法，首先对其求 p_j 的偏微分，这里 $j=1, 2$ 。

$$\frac{\partial L(\bar{\mathbf{p}}, \alpha)}{\partial p_j} = \left(Q_j (1 - P_j^b (C_j + 1 - \xi_j P_j^{nb})) - \frac{P_j^b (C_j - \xi_j P_j^{nb})}{\xi_j} \right) \frac{\partial \xi_j}{\partial p_j} - \gamma \quad (5.38)$$

当 $j=3$ 时，偏微分如下所示

$$\frac{\partial L(\bar{\mathbf{p}}, \alpha)}{\partial p_N} = \sum_{j=1}^{N-1} \left(Q_j (1 - P_j^b (C_j + 1 - \xi_j P_j^{nb})) - \frac{P_j^b (C_j - \xi_j P_j^{nb})}{\xi_j} \right) \frac{\partial \xi_j}{\partial p_j} - \gamma \quad (5.39)$$

在众多解优化方法中，次梯度方法更适用于不可微目标方程，同时，所需计算内存较小，

因此本章采用次梯度方法解该优化问题^[75]。 γ 可以通过文献[75]中的方法更新

$$\gamma^{l+1} = \left[\gamma^l + s^l \left(\sum_{j=1}^N p_j - 1 \right) \right]^+ \quad (5.40)$$

结合 3.2 中结论 $\frac{\partial^2 T}{\partial p_j^2} \leq 0$ 可知，公式 (38) 和 (39) 是关于 p 的减函数，这里采用二分法

求解下面的方程

$$\frac{\partial L(\bar{p}, \alpha)}{\partial \bar{p}} = \left[\frac{\partial L(\bar{p}, \alpha)}{\partial p_1}, \dots, \frac{\partial L(\bar{p}, \alpha)}{\partial p_N} \right]^T = \bar{0} \quad (5.41)$$

设上式的根为 \bar{p}' ，其中 $\bar{p}' = (p_1', \dots, p_N')$ 。如果上式没有零点，可以做迭代处理：如果对

于任意的 $p_j \in [0, 1]$ 有 $\frac{\partial L(\bar{p}, \alpha)}{\partial p_j} > 0$ ，则 γ 太小，为增加它，令 $p_j' = 0$ ；反之，则说明 γ 太大，

令 $p_j' = 1$ 。

采用次梯度方法解本凸优化问题的流程图如图 5.4 所示，具体步骤如下：

Step1: 根据构建的系统效用函数和明确优化因子的可行域，确定该问题为一个凸优化问题；

Step2: 初始化优化因子 $\bar{p}^{(0)} = (p_1^{(0)}, p_2^{(0)}, p_3^{(0)}) = (0, 0, 0)$ 。根据公式 (5.13) 求解每个网络的稳态分布；

Step3: 根据稳态分布结果，推导 γ 初值 $\gamma^{(0)}$

$$\gamma^{(0)} = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^{N-1} \left(Q_j (1 - P_j^b (C_j + 1 - \xi_j P_j^{mb})) - \frac{P_j^b (C_j - \xi_j P_j^{mb})}{\xi_j} \right) \frac{\partial \xi_j}{\partial p_j} \quad (5.42)$$

这里 N 表示比例因子向量的维数，本方法中 $N=3$ ，此时 $l=0$ ；

Step4: 根据式 (5.39) 采用二分法求解 \bar{p}' ，再根据无零点情况更新 $\bar{p}^{(l+1)}$ ；

Step5: 根据判决条件判断是否停止迭代。迭代终止，转 Step6，否则需要根据公式 (5.40) 对 γ 进行更新，然后转至 Step3；

Step6: 最终获取比例因子向量 \bar{p} ，此时 $\bar{p} = \bar{p}^{(l+1)}$ ，CRRM 此时将决策结果，即 \bar{p} ，发送给 RRM 实体，使其具体实施资源分配。

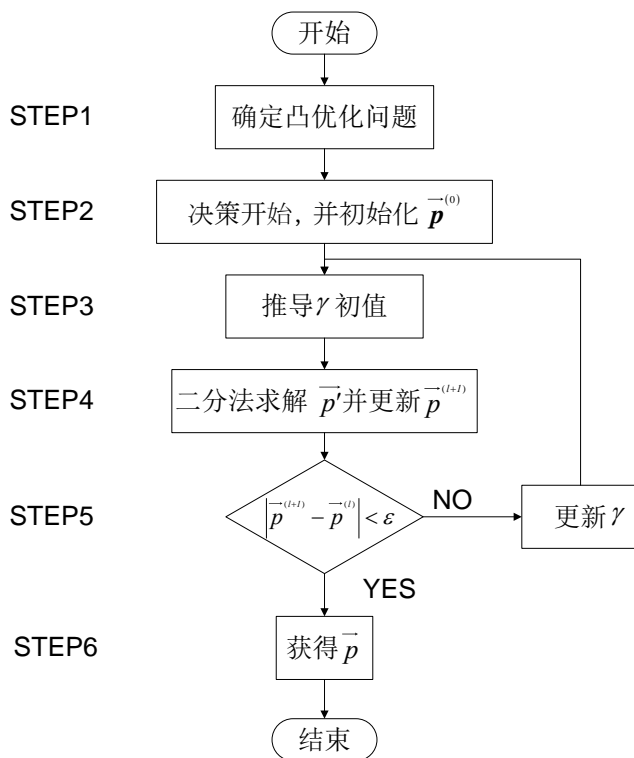


图 5.4 算法流程图

5.3.4 算法框图

本章提出的基于生灭过程的异构网络多网络接入效用优化算法框图如图 5.5 所示，可以看到，本方法首先通过 RRM 实体收集每个网络的参数，这些参数包括网络重叠和非重叠区域内视频用户的业务到达率、小区半径、网络提供的统一信道传输速率和使用网络信道的代价情况等。RRM 实体将参数汇报给 CRRM 服务器进行处理，这里借助生灭过程的理论来分析处理，通过计算马尔科夫链稳态分布，构建系统效用方程，通过分配合理的接入不同网络的比例因子使得系统效用最大化。鉴于构建的效用方程可以建模为一个凸优化问题，本章采用次梯度方法进行解答。

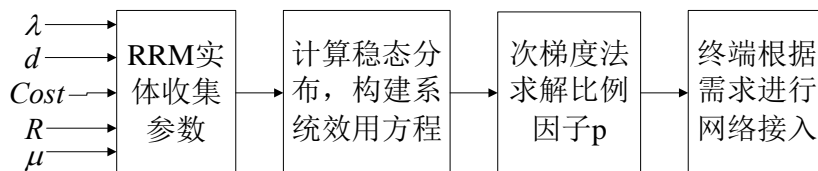


图 5.5 算法框图

按照比例因子进行无线资源分配使得效用最大化。RRM 实体在保证满足比例因子的前提下，使得移动终端根据各自需求选择各自网络接入，这样既使得系统总体性能得到保证，又能给用户以自主权，从而满足用户的需求。

5.4 仿真与结果分析

本章采用 MATLAB 软件对算法进行仿真，异构网络系统模型如图 5.1 所示，由两个异构网络 UMTS 和 WiMAX 网络组成，两个网络有一定比例的重叠区域，网络的详细参数如表 5.1 所示。需要说明的是，WiMAX 网络在数据传输速率方面较之 UMTS 网络有一定优势，但由于其商用推广情况不如 UMTS 网络，因此在费用方面略有劣势。根据公式 (5.18) 以及表 5.1 中参数，这里可以知道 $Q_1=0.192$ ， $Q_2=0.212$ ，说明 WiMAX 网络在单位代价带宽（性价比）上比 UMTS 网络具有优势。

表 5.1 异构网络参数

参数	UMTS	WiMAX
$d_j(\text{m})$	500	800
C_j	12	15
$R_j(\text{Mbps})$	0.096	0.136
$\lambda_j(\text{calls/s})$	3/60	4/60
$1/\mu(\text{s/call})$	120	
$v(\text{m/s})$	5,10	
$\lambda_0(\text{calls/s})$	3/120~7/120	
$Cost(\text{RMB/s})$	0.0050	0.0064
α	0.01	

5.4.1 阻塞率上下限

图 5.6 给出了 UMTS 网络阻塞率与上下限的对比图，上下限如公式 (5.32) 和 (5.33) 所示。由于 UMTS 网络分配给视频业务的信道数为 12，而根据后续结果可知，网络阻塞率一般不大于 20%，因此结合公式 (5.8)， ξ_1 的范围取 5~15，可以包含所有信道被使用情况。图 5.7 给出了在表 1 给出的网络参数情况下，WiMAX 网络阻塞率与上下限的对比图。WiMAX 网络分配给视频业务的信道数为 15，该网络阻塞率与 UMTS 网络的相仿，这里 ξ_2 的范围为 10~20，因此也可以包含所有情况。如图 5.6 和图 5.7 所示，两个异构网络的网络阻塞率均满足上下限要求，从而保证效用问题为凸优化问题。

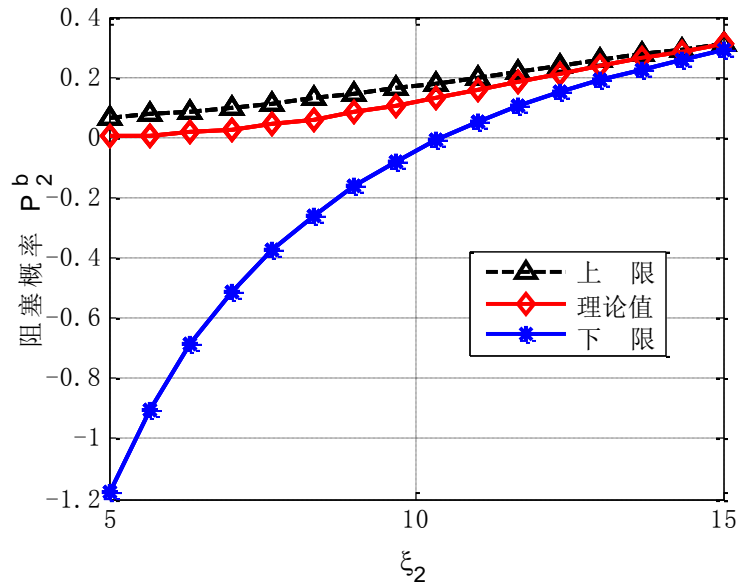


图 5.6 UMTS 网络阻塞率与上下限对比图

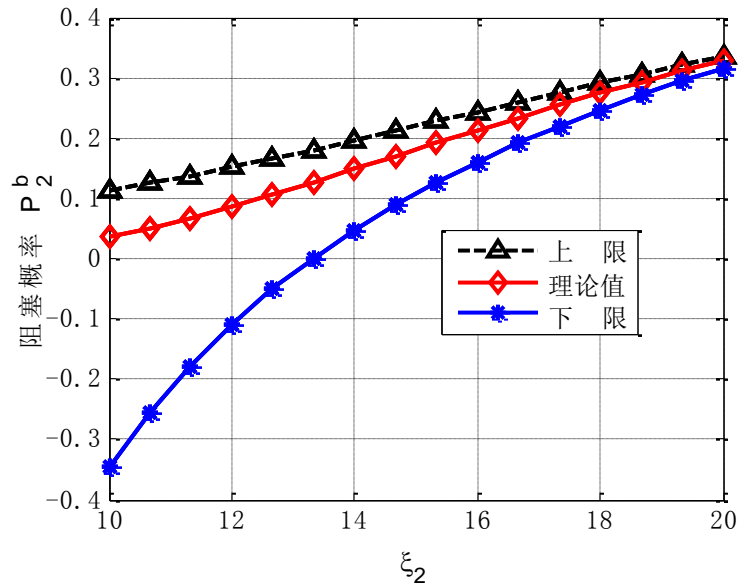


图 5.7 WiMAX 网络阻塞率与上下限对比图

5.4.2 仿真结果

为了分析本章算法的特点，仿真时分别与比例因子 $\vec{p} = [p_1 \ p_2 \ p_3] = \vec{p}_0 = \left[\frac{1}{3} \ \frac{1}{3} \ \frac{1}{3} \right]$ 和异构网络重叠区域单网络接入算法进行对比。需要说明的是， $\vec{p}_0 = \left[\frac{1}{3} \ \frac{1}{3} \ \frac{1}{3} \right]$ 代表了一种随意分配时的平均状态；而异构网络重叠区域单网络接入时，比例因子向量为二维，但是由于两个比例因子之和为 1，可以归结为一维的情况，因此算法采用黄金分割法求取系统效用的

最大值。

图 5.8~图 5.10 给出了为了获取最大的异构网络系统效用，接入 UMTS 网络、WiMAX 网络以及同时接入两个网络的比例因子随重叠区域业务到达率 λ_0 变化的情况。从图中可以看出，重叠区域业务到达率 λ_0 较小时， $p_1=p_2=0$ ， $p_3=1$ ，说明业务量较小时，所有终端都倾向同时接入两个网络，从而均能获得更加好的视频业务用户体验。而随着业务到达率的增大， p_1 和 p_2 都随着业务量的增加慢慢增大，而 p_3 相应减小，这说明业务量较大时用户间竞争趋于激烈，空闲信道数量相应减少，无法保证每个用户都能同时接入两个网络，为了保证系统效用的最大化，用户接入单网络的比例增大，而多网络接入的比例减小。对比图 5.8 和图 5.9，可以看出，WiMAX 的网络的接入比例变化情况与 UMTS 网络的变化情况是相似的，但是 WiMAX 网络的接入比例比 UMTS 网络的接入比例略大，说明 WiMAX 网络与 UMTS 网络相比由于其性价比有一定优势，用户更加倾向于接入 WiMAX 网络。除此之外，图 5.8~图 5.10 均给出了速度变化时对比情况，即 $v=5\text{m/s}$ 和 $v=10\text{m/s}$ 时比例因子随着业务到达率变化情况。从图中可以看出，在两种速度情况下，三个比例因子的变化趋势是相似的。但是由于速度较大导致更大的用户切换率，即从异构网络系统内切换出去的概率更大，从而使得稳定状态时平均用户数量较小，因此， $v=10\text{m/s}$ 时的接入多网络的比例大于 $v=5\text{m/s}$ 时，而接入单网络的比例均小于较小速度时。 p_1 、 p_2 和 p_3 组成了最佳的比例因子向量 \vec{p} ，而需要说明的是，在重叠区域业务到达率变化范围内，三个比例因子之和始终保持为 1，这说明了算法的收敛性与有效性。

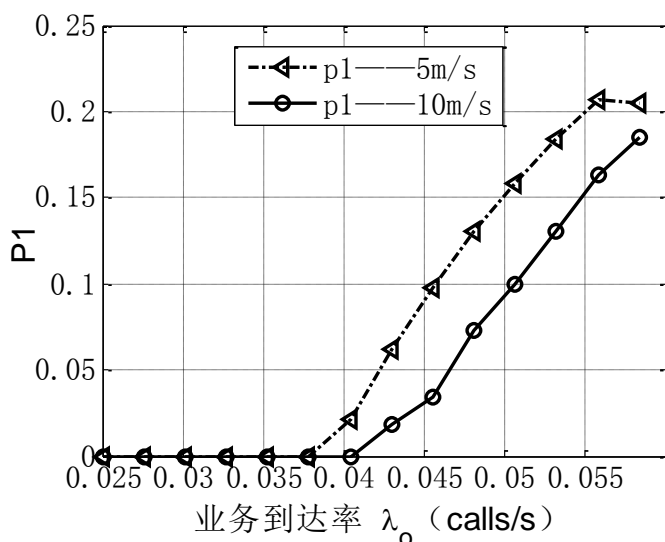


图 5.8 异构网络重叠区域接入到 UMTS 网络业务到达率占重叠区域总业务到达率的比例

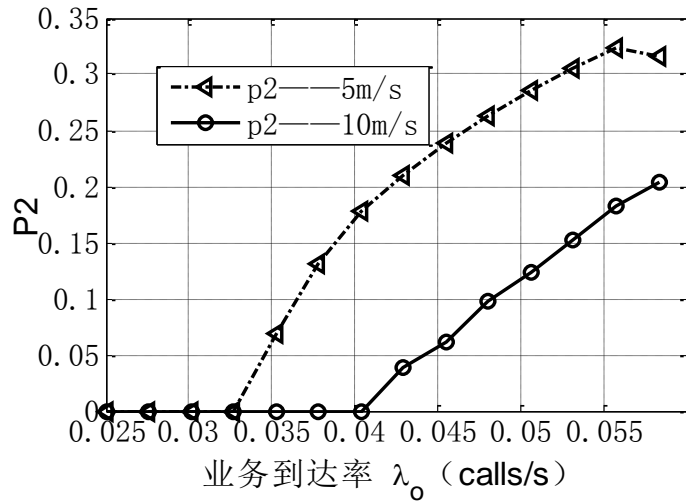


图 5.9 异构网络重叠区域接入到 WiMAX 网络业务到达率占重叠区域总业务到达率的比例

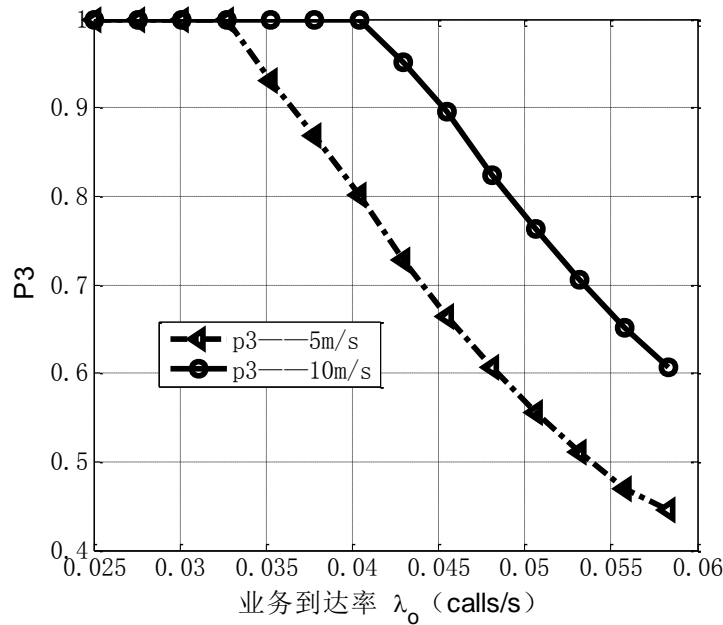


图 5.10 异构网络重叠区域接入到两个网络业务到达率占重叠区域总业务到达率的比例

图 5.11~图 5.12 给出了当满足最佳比例因子向量时，在不同速度情况下随着重叠区域业务到达率 λ_0 增大时异构网络系统效用随之变化的情况。其中图 5.11 为 $v=5m/s$ 的情况，而图 5.12 为 $v=10m/s$ 的情况。从图中可以看出，不管 $v=5m/s$ 还是 $v=10m/s$ ，满足最佳比例因子向量的系统效用均优于比例因子 $\vec{p}_0 = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix}$ 的情况，更优于异构网络重叠区域单网络接入算法，这说明重叠区域多网络选择算法可以有效提高无线资源的利用率。数据表明，相比于单网络连接的情况，多网络连接方法在 $v=5m/s$ 时的网络性能提升 1% 到 6.2%，而在 $v=10m/s$ 时，网络性能有了 4.9% 到 10.2% 的提升。而与 \vec{p}_0 时相比，两组数据分别为：2.7% 到 6.1% 和

6.0% 到 10.7%。随着重叠区域业务到达率的增加，三种算法的效用均随之增大，说明业务量的增大导致网络平均用户数的增多，从而导致了效用的增长。而不同的是，由于

$\bar{\mathbf{p}}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 \end{bmatrix}$ 的情况，比例因子恒定，随着业务量增加，系统效用保持近似线性的增加，

单网络选择算法效用变化与之相似。而本章的多网络接入算法为保证最大化系统效用，业务量增大时由于恒定的信道数量以及多网络的接入使得网络平均用户数增长变慢，系统效用的增加趋于平缓，这也符合实际的情况。

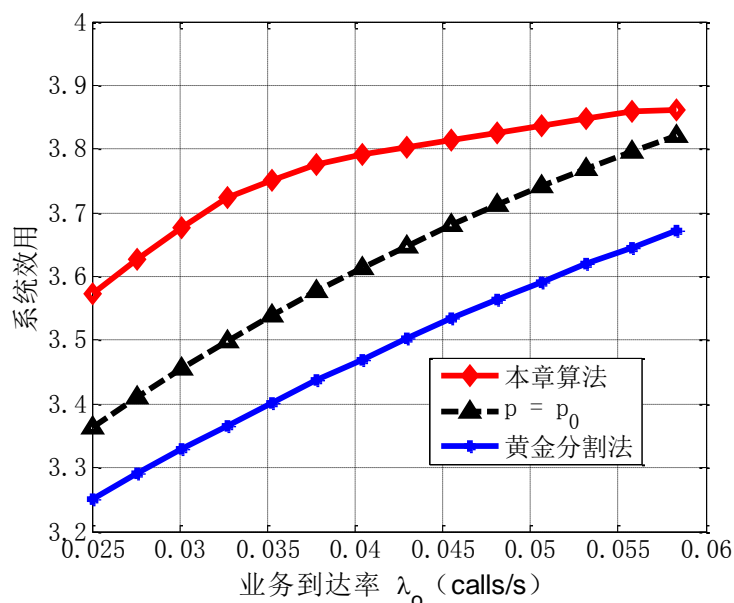


图 5.11 v=5m/s 时异构网络系统效用与重叠区域业务到达率之间的关系

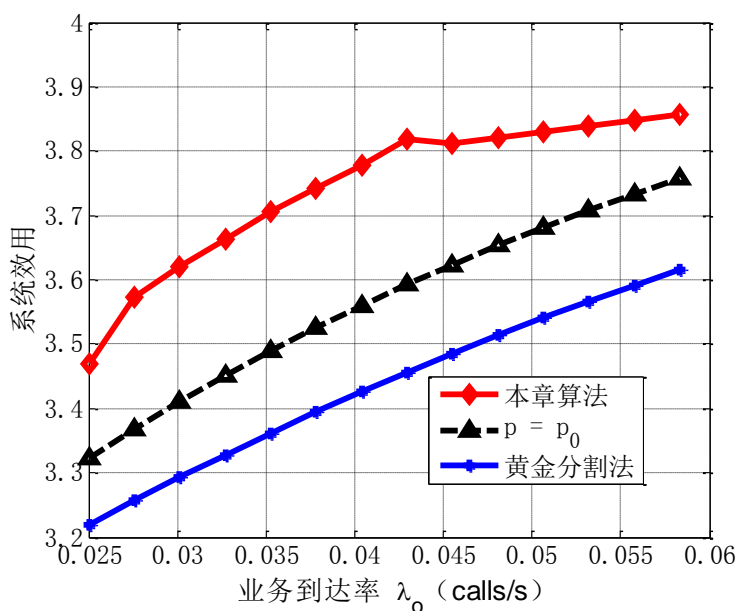


图 5.12 v=10m/s 时异构网络系统效用与重叠区域业务到达率之间的关系

图 5.13~图 5.14 给出了当满足最佳比例因子向量时, 在不同速度情况下随着重叠区域业务到达率 λ_0 增大异构网络系统吞吐量随之变化的情况。其中图 5.11 为 $v=5\text{m/s}$ 的情况, 而图 5.12 为 $v=10\text{m/s}$ 的情况。系统吞吐量在公式 (5.21) 中给出。从图中可以看出, 系统吞吐量的变化情况与系统效用的变化情况基本一致。因为不管 $v=5\text{m/s}$ 还是 $v=10\text{m/s}$, 满足最佳比例因子向量的系统吞吐量均优于比例因子 $\vec{p}_0 = \left[\frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \right]$ 的情况, 更优于异构网络重叠区域单网络接入算法, 这说明重叠区域多网络选择算法可以有效提高无线资源的利用率, 而更高的网络吞吐量也是异构网络优化的目标。本方法在满足系统效用最大化的情况下也实现了系统吞吐量的最大化。数据表明, 相比于单网络连接的情况, 多网络连接方法在 $v=5\text{m/s}$ 时的网络吞吐量提升 1.7% 到 8.0%, 而在 $v=10\text{m/s}$ 时, 网络性能有了 7.2% 到 10.7% 的提升。而与 \vec{p}_0 时相比, 两组数据分别为: 3.5% 到 8.6% 和 8.2% 到 12.0%。图中显示, 随着重叠区域业务到达率的增加, 三种算法的系统吞吐量均随之增大, 说明业务量的增大导致网络平均用户数的增多, 从而促进系统吞吐量的增长。而不同的是, 由于 $\vec{p}_0 = \left[\frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \right]$ 的情况, 比例因子恒定, 随着业务量增加, 系统吞吐量保持近似线性的增加, 单网络选择算法效用变化与之相似。而本章的多网络接入算法为保证最大化系统效用导致, 恒定的信道数量使得网络平均用户数目增长放缓, 从而导致系统吞吐量的增长趋于平缓, 与系统效用情况类似。

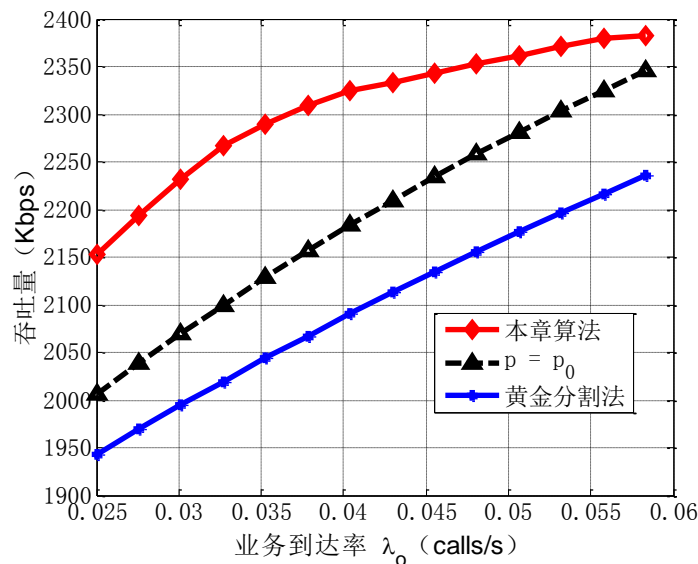


图 5.13 $v=5\text{m/s}$ 时异构网络吞吐量与重叠区域业务到达率之间的关系

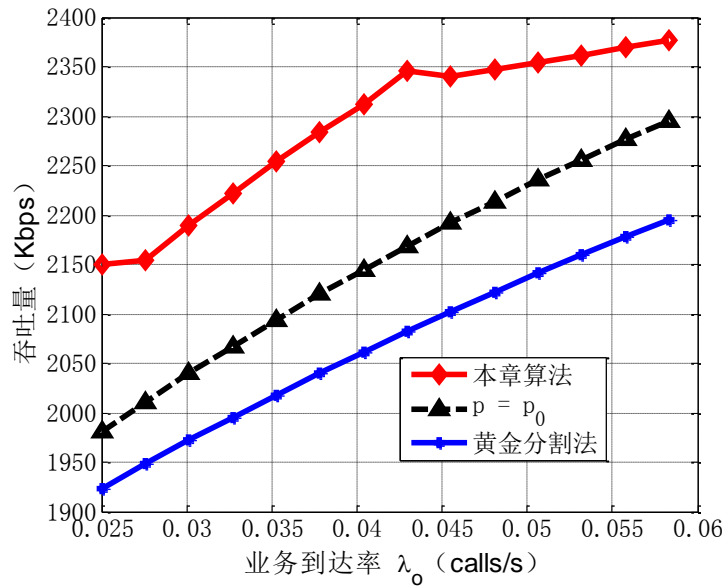


图 5.14 $v=10\text{m/s}$ 时异构网络吞吐量与重叠区域业务到达率之间的关系

图 5.15~图 5.16 给出了两个异构网络不同速度时网络接入率即网络非阻塞率随着重叠区域业务到达率 λ_0 增大异构网络系统吞吐量随之变化的情况。其中图 5.15 为 $v=5\text{m/s}$ 时系统网络接入率，图 5.16 为 $v=10\text{m/s}$ 时的情况。从图 5.15 中可以看出，三种算法的系统网络接入率随着 λ_0 增大慢慢减小，即网络阻塞率慢慢增大，这是因为随着业务量的增大，网络中的用户数慢慢增大，从而导致网络阻塞率的增加、网络接入率的降低。从图中还可以看出，虽然较之比例因子 $\bar{\mathbf{p}}_0 = \left[\frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \right]$ 与单网络选择的情况，本章优化算法的系统网络接入率在两种速度下均较低，这是因为更多的终端选择了多网络，这从图 5.10 中的结果可以看出。从图中还可以看出，本章优化算法较之 $\bar{\mathbf{p}}_0$ 时劣势随着 λ_0 增大而减小。 $v=5\text{m/s}$ 时，当 λ_0 为 0.5calls/s 时，两种算法的网络接入率基本相同，当 λ_0 大于 0.55calls/s 时，本章优化算法的网络接入率开始优于 $\bar{\mathbf{p}}_0$ 的。从图 5.8~图 5.10 比例因子的情况来看，当 λ_0 为 0.5calls/s 时，多网络选择的比例已经较低，从而可以让更多用户接入到无线网络中，提高了网络接入率，这说明网络接入率的变化符合理论分析。

10m/s 时系统网络接入率与 5m/s 时相似。从图 5.6 中可以看出，三种算法的 WiMAX 网络接入率随着 λ_0 增大慢慢减小，即网络阻塞率慢慢增大，相似地，随着业务量的增大，网络中的用户数慢慢增大，从而导致网络阻塞率的增加、网络接入率的降低。此外，虽然较之比例因子 $\bar{\mathbf{p}}_0 = \left[\frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \right]$ 与单网络选择的情况，本章优化算法的系统网络接入率在两种速度下

均较低。除此之外，本章优化算法较之 \bar{p}_0 时劣势随着 λ_0 增大而减小。从图 5.8~图 5.10 比例因子的情况来看，当 λ_0 较大时，单网络选择比例增大而多网络选择的比例已经较低，但用户数的增大使得网络接入率依然在增大，这说明网络接入率的实际变化情况。

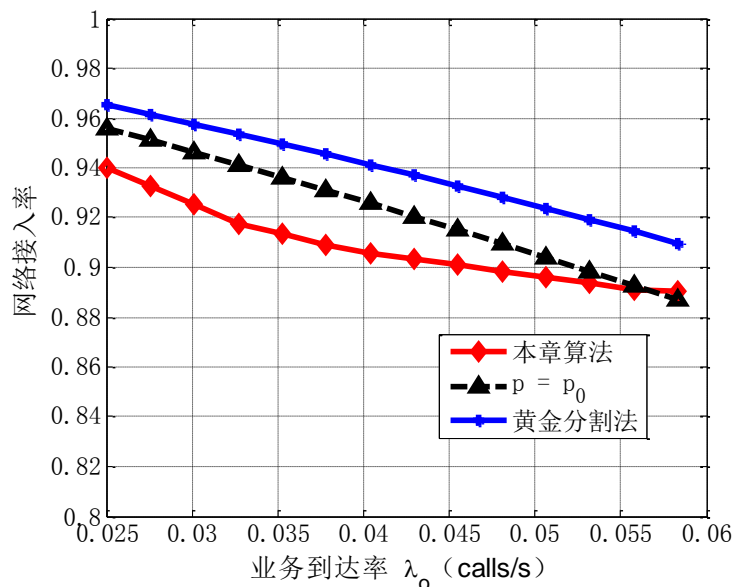


图 5.15 $v=5\text{m/s}$ 时系统网络接入率与重叠区域业务到达率之间的关系

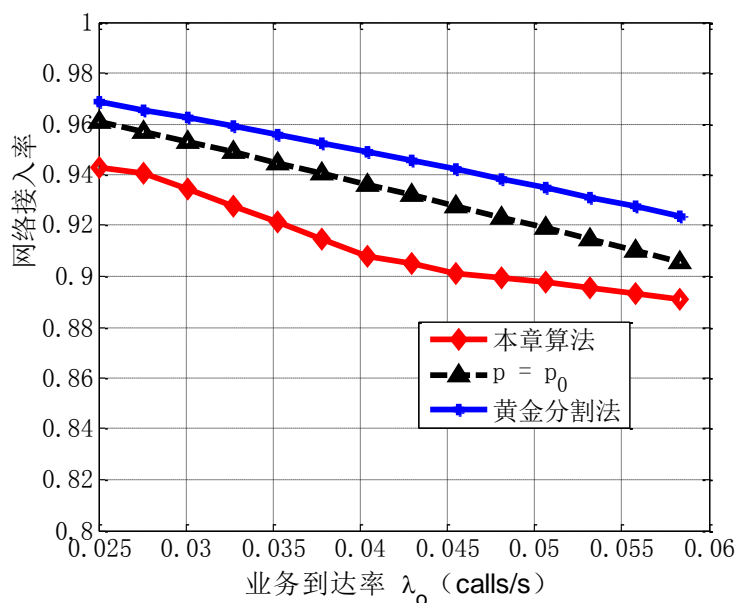


图 5.16 $v=10\text{m/s}$ 时系统网络接入率与重叠区域业务到达率之间的关系

综上所述，本章提出的基于生灭过程的异构网络多网络接入算法的效用优化方法可以最大化系统效用、提供更佳的系统吞吐量以及令人满意的网络接入率，大大提升了无线资源管理的效率。同时需要指出，本章算法的异构网络场景较为单一和简单；虽然本方法设置的效用函数为多目标问题，这可以很好满足用户的服务质量，但是网络阻塞率情况有待进一步的

提高，算法的求解方法也有待进一步的简化和创新，这些问题在以后的研究中将逐一展开。

5.5 本章小结

本章提出了一种基于连续时间马尔科夫过程——生灭过程的异构网络多网络接入算法的效用优化方法，借助多宿终端同时接入多个网络从而进一步提升异构网络选择算法的系统性能。该方法采用生灭过程来分析异构网络的系统性能，充分支持用户的移动特性，并通过切换率来反映用户的移动性，最终获取异构网络系统的联合效用表达式。该方法通过合理分配异构网络重叠区域接入不同类型和多种网络的用户比例来最大化系统联合效用，最后通过次梯度法来求解该优化问题。仿真结果表明，该方法能够有效提升异构网络系统的联合效用以及吞吐量，充分提高用户的服务质量，使得无线资源的分配使用更加合理。

第六章 总结与展望

6.1 本文总结

无线与移动通信发展日新月异，不同的通信网络在带宽、传输速率、时延、安全性、抖动、能耗、市场定位等方面竞争与差别共存，因此多种无线通信技术共存的局面将长期存在。不同无线通信技术在很多区域相互重叠覆盖，组成一种新的无线网络的混合模型，这就是异构无线网络。在异构无线多接入环境下，需要充分整合网络资源可以为用户实现无缝连接，实现异构无线网络的融合。

在多种异构无线网络重叠覆盖的区域内，对于初始到达的用户或者不断移动的用户来说，在任何时间任何地点，选择合适的异构无线接入网络始终保持最佳连接状态可以充分满足自身需求并获得更优质的无线通信服务。最佳连接状态包含许多重要的问题，比如网络发现，网络选择，切换执行等。而在这些问题当中，网络选择即无线接入机制作为实现最佳网络连接和异构无线网络融合的关键因素，本文进行了重点讨论与探讨。

本文在研究基础理论与以往研究成果的基础上，提出了几种实现异构网络最佳接入的方案，主要工作可以归纳为以下几个方面。

- (1) 基于单个网络指标的异构网络接入选择方法已经无法满足用户的需求，因此，多种网络因素需要被考虑进来。多属性决策算法作为统筹多种因素的决策方法在异构网络选择时广为使用。本文在多属性决策算法的基础上提出了一种基于群组决策的多属性异构无线网络选择算法。该算法利用四种不同的多属性权重确定方法求解权重向量，并基于群组决策理论，对四种权重向量进行组合从而获取一个综合权重向量。满足相容性要求的权重向量将结合多属性决策简单排序法执行网络选择工作。最后，分别针对四种不同的业务类型对算法性能进行仿真和分析。
- (2) 移动终端技术的不断发展，使得同时连接多个网络成为可能。多网络接入在调度和使用无线网络资源方面更加高效，逐渐更为异构网络研究新的热点。本文基于多网络同时连接提出了一种异构无线网络选择算法。该算法基于移动终端，对移动终端网络多接入模块进行统筹规划。通过判断接收信号强度，为处于异构无线网络覆盖区域的移动终端确定可接入网络集合。充分考虑单网络接入与多网络同时接入的情况，结合可接入网络集合，进一步确定目标网络集集合。目标网络集集合中的每一个元素代表了

网络连接的一种方案。通过为每个目标网络集计算吞吐量、接入代价、功能损耗与网络负载等参数构建网络属性集合，结合权重向量，形成多属性决策问题。最后，采用灰色关联分析算法解决此问题。仿真结果表明，与单网络和其他多属性多网络接入算法相比，本文所提出的多网络同时连接算法可以明显提升网络性能，针对不用权重向量，为用户提供满意的服务质量。

- (3) 网络选择不仅要考虑用户，还应该从系统和网络角度出发，实现无线资源的有效利用。网络系统根据自身资源与目标对无线资源合理分配与调度，用户则结合可用资源与业务需求选择性接入无线网络。构建效用方程优化网络性能是兼顾用户与网络，实现无线资源合理分配的一种方法。本文基于这个理论提出了一种基于生灭过程的异构网络多接入的优化方法。该方法采用生灭过程来分析异构网络的系统性能，充分支持用户的移动性，从而获取异构网络系统的联合效用表达式。该方法通过合理分配异构网络重叠区域内接入不同类型和多种网络的用户比例来最大化系统联合效用，采用次梯度方法对优化问题进行求解。最后通过 Matlab 仿真说明该方法在提升异构网络系统的联合效用以及吞吐量，合理分配无线资源方面的作用。

6.2 未来研究工作

本文对异构无线网络选择算法的研究还不够全面与多样，关于其他学科的知识还需要进一步地研究与探讨。其次，网络选择算法的研究没有分层次设计，异构网络融合架构需要进一步细化，从而增加算法的实用性。本文未来的研究方向主要包括：

- (1) 本文在第三章中提出的基于四种权重向量的多属性网络选择算法，为了凸显网络权重的作用，网络排序算法选择了最基础的简单加权法。为了进一步探讨网络权重确定与排序算法的关系以及两者对总体性能的影响，需要进一步使用或设计其他网络排序算法。其次，网络选择一般还会引起网络切换问题，在考虑多种因素时，需要进一步探讨网络切换的好处与代价，综合评定网络选择的作用。
- (2) 本文在第四章中提出的基于多网络同时连接的网络选择算法，通过构建多属性决策问题，采用灰色关联分析获取目标网络集。然而，该算法考虑因素较少，也没能根据具体的业务类型设计权重向量的确定方法，从而进一步探讨具体业务类型条件下的网络性能。因此，针对不同业务类型与不同网络排序方法，进一步的讨论有待展开。
- (3) 本文在第五章提出了优化系统效用的多网络选择方法，该方法实现了系统吞吐量的最大化，然而，网络接入率方面的性能有待进一步地提高。同时，多网络连接带来的能

耗、代价等问题没能给予考虑。除此之外，在构建系统效用方程的过程中，文章假设同一网络下的网络信道带宽相同，该思路只能从整体入手，在兼顾用户方面有待进一步地完善。

参考文献

- [1] Andrews, J.G., Buzzi, S., Wan Choi, Hanly, S.V., Lozano, A., Soong, A.C.K., Zhang, J.C.. What Will 5G Be[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6):1065-1082.
- [2] Institute of Electrical and Electronics Engineers. URL <http://www.ieee.org>.
- [3] Wireless MAN Group. URL <http://WirelessMAN.org>.
- [4] 贺锋, 异构无线网络中切换技术研究[D], 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [5] E.Gustafsson, A. Jonsson, Always best connected[J], IEEE wireless Communication, 2003.1, 10 (1) : 49-55.
- [6] 施政. 异构网络中无线资源管理技术的研究[D]. 江苏: 南京邮电大学, 2013.
- [7] 贺昕, 李斌. 异构无线网络切换技术[M]. 北京邮电大学出版社, 2008.
- [8] ERONEN P, HILLER T, ZORN G. Diameter extensible authentication protocol(EAP) application[S]. IETF RFC 4072, 2005.
- [9] FORSBERG D, OHBA Y, PATIL B. Protocol for Carrying Authentication for Network Access(PANA)[S]. IETF RFC 4058, 2005.
- [10] 李军. 异构无线网络融合理论与技术实现[M]. 电子工业出版社, 2008.
- [11] Leijia Wu, PKumbesan Sandrasegaran. A Survey on Common Radio Resource Mangement[C], Proceedings of The 2nd International Conference of Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications. Aug.2007.
- [12] Ding Z, Xu Y. A novel joint radio resource management with radio resource reallocation in the composite 3G scenario[J]. Information Technology Journal 2011,10(6):1228-1233.
- [13] Magnusson P, Lundsjo J, Saches J. Radio resource management distribution in a beyond 3G multi-radio access architecture[C], Global Telecommunications Conference, 2004.
- [14] Ian Fuat Akyildiz, Jiang Xie, A survey of Mobiltiy Management in next-generation all-IP-based Wireless Systems[J], IEEE Wireless Communication, 2004:16-28.
- [15] 张红润, 张亚凡, 邓红敏. 传感器原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [16] F. Tansu and M. Salamah, On the vertical handoff decision for wireless overlay networks[C], 7th IEEE Int. Symposium on Computer Networks, 2006.
- [17] S. Kunarak and R. Suleesathira, Vertical Handoff Decision and Network Merit for Integrated Wireless and Mobile Networks[C], Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference(ATNAC), 2011.
- [18] D. E. Charilas, A. D. Panagopoulos, Multiaccess Radio Network Environments[J], Vehicular Technology Magazine, IEEE, 2010.12.5(4).
- [19] K Pahlavan, P Krishnamurthy, A Hatami, et al. Handoff in hybrid mobile data networks[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(2):34-37.
- [20] E Sevens Navarro, V Wong. Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks[C]. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference(VTC-Spring), 2006,2:947-951.
- [21] Liu X, Ling-Ge J, Chen H. A Novel Fuzzy Logic Vertical Handoff Algorithm with Aid of Differential Prediction and Pre-Decision Method[C]. IEEE International Conference on Communications, 2007:5665-5670.
- [22] Syuhada M Z A, Mahamod I, Firuz. Performance Evaluation of Vertical Handoff in Fourth Generation(4G) Networks Model[C]. NCTT-MCP 2008. 6th National Conference on Photonics, 2008:392-398.
- [23] Jabban, A., Nasser, Y., Helard, . SINA Based Network Selection Strategy in Integrated Heterogeneous Networks[C]. 19th International Conference on Telecommunications(ICT), 2012:1-6.

- [24] 杨保安, 张科静. 多目标决策分析理论、方法与应用研究[M]. 上海: 东华大学出版社, 2008.
- [25] Sasaki. Evaluation of communication system selection applying AHP algorithm in heterogeneous wireless networks[C]. Computing, Communications and Applications Conference(ComComAp), 2012, pp:334-338.
- [26] Li Wei, Shang Yumin, Ji Yanjiao. Analysis of Multiple Objective Decision Methods Based on Entropy Weight[C]. IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, 2008.
- [27] 王康. 异构网络垂直切换决策机制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.
- [28] 孙卓. 异构无线网络中的接入选择机制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010: 6-20.
- [29] Dan Niu. Studies on TOPSIS arithmetic with DEATEL weights scheme[C]. Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer(MEC), 2013, pp:2396-2400.
- [30] Zhao Song. A GRA-based network selection mechanism in heterogeneous wireless networks[C]. International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010, pp:215-218.
- [31] Farooq Bari. Application of ELECTRE to Network Selection in A Heterogeneous Wireless Network Environment[C]. Proceedings of WCN, 2007.
- [32] 王楠. 基于模糊神经网络的异构网络垂直切换算法研究[D], 吉林大学, 2012.
- [33] Peng Yang, Yong Sun, etc.al. A Novel Fuzzy Logic Based Vertical Handoff Decision Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks[C], 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications(WPMC), 2013:1-5.
- [34] Zhang Weihui. Handover Decision Using Fuzzy MADM in heterogeneous Networks[C]. IEEE WCNC, 2004.
- [35] Charilas D E, Markaki O I. Application of fuzzy AHP and ELECTRE to network selection[C]. Mobile Lightweight Wireless Systems, 2009(13):63-73.
- [36] P. K. K. Pahlavan. Handoff in hybrid mobile data networks[J]. IEEE Pers. Commun, 2010(7):34-47.
- [37] 李航宇, 刘伟, 郭伟. 联合模糊逻辑和神经网络的网络选择算法[J]. 计算机仿真, 2013. 30 (2) .
- [38] 夏玮玮, 沈连丰. 一种基于模糊神经网络的异构网络选择算法[J]. 东南大学学报, 2010. 40 (7) .
- [39] Lusheng Wang ,Geng-Sheng Kuo. Mathematical Modeling for Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks[J]. IEEE Communications Survey&Tutorials, 2013, 15(1):271-292.
- [40] 郎改平, 徐玉滨, 马琳. 基于非合作博弈论的异构网络选择算法[J]. 华南理工大学学报, 2014. 42 (5) .
- [41] Yueying Zhang. A QoE-Aware Method for Energy Efficient Network Selection[C]. International Symposium on Communications and Information Technologies(ISCIT), 2012.
- [42] K. Zhu, D. Niyato, P. Wang, Network selection in heterogeneous wireless networks: evolution with incomplete information[C], Proc. IEEE Wireless Commun. And Netw. Conf(WCNC), 2002:1-6.
- [43] J. Antoniou, A. Pitsillides. 4G converged environment: modeling network selection as a game[C], Proc. IST Mobile and Wireless Commun. Summit, 2007:1-5.
- [44] Chen Q B, Zhou W G, Chai R. Game-theoretic approach for pricing strategy and network selection in heterogeneous wireless networks[J]. IET Communications, 2011. 5(5):676-682.
- [45] Quni, A. Energy and Throughput optimization for relay based heterogeneous networks[C], Wireless Days (WD), 2013 IFIP, 2013:1-6.
- [46] Jian Li. Dynamic resource optimization with congestion control in heterogeneous cloud radio access network[C]. Globecom Workshops(GC Wkshps), 2014:906-911.
- [47] 范文浩, 刘元安, 吴帆. 异构无线网络中多模终端多接入选择机制研究[J] . 通信学报, 2012. 33(7): 183-190.
- [48] 张丽娜, 朱琦. 异构网络中多网络并行传输的网络选择算法[J]. 信号处理, 2014.
- [49] Lina Zhang. Multi-Access Selection Algorithm Based on Joint Utility Optimization for the Fusion of Heterogeneous Wireless Networks[J]. IEICE Transactions on Communications, 2014, E97-B(1): 2269-2277.

- [50] Lilja, K.K., Laakso K., Palomki J. Using the Delphi method[C]. Proceedings of PICMET '11 Technology Management in the Energy Smart World (PICMET), 2011:1-10.
- [51] Kavas A. Comparative analysis of WLAN, WiMAX and UMTS technologies[C]. Proceedings of the Progress in Electromagnetics Research Symposium(PIERS'07), 2007:140-144.
- [52] Martinez-Morales J D. Performance comparison between MADM algorithms for vertical handoff in 4G networks[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Electrical Engineering. Computing Science and Automatic Control (CCE' 10), 2010: 309-314.
- [53] 王坤, 宋海洲, 华侨大学数学系. 三种客观权重赋权法的比较分析[J]. 技术经济与管理研究, 2003(6): 1-2.
- [54] D. Diakoulaki, G. Mavrotas, L. Papayannakis. Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method[J]. Computer Ops Res 22, 1995:763-770.
- [55] Satty, T.L. The Analytic Hierarchy Process[J]. McGraw Hill Inc. NY, 1980.
- [56] 王莲芬. 中国人民大学信息学院. 相容性与群组决策[J]. 系统工程理论与实践, 2000. 2(2): 2-10.
- [57] 张鹏, 黄开枝, 贺晓琚. 卫红权. 基于组合权重的异构无线网络选择算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(10): 3-5.
- [58] Wang Yafang. Notice of Retraction Network access selection algorithm based on the Analytic Hierarehy Process and Gray Relation Analysis[C]. The 4th International Conference on New Trends in Information Science and Service Science(NISS), 2010: 503-506.
- [59] Jianqing Fu, Jiyi Wu, Jianlin Zhang, etal. A novel AHP and GRA based handover decision mechanism in heterogeneous wireless networks[C]. Proceedings of the First International Conference on Information Computing and Applications, 2010: 213-220.
- [60] Wenhao Fan. Power constrained optimal traffic allocation for multi-access utilization of multi-mode terminals[C]. Proceedings of IC-NIDC 2012.
- [61] Tolli, A. Performance evaluation of common radio resource management(CRRM)[C]. IEEE International Conference on Communications, 2002(5) : 3429-3433.
- [62] SARKAR T K, JI Z, KIM K. A survey of various propagation models for mobile communications[J]. IEEE Antennas Propagation Magazine, 2003.45: 51-82.
- [63] Yueying Zhang, Hang Long, Fei Liu, etal. A QoE-Aware Method for Energy Efficient Network selection[C]. 2012 International Symposium on Communications and Information Technologies(ISCIT), Gold Coast, QLD. 2012:850-854.
- [64] AggelikiSgora, Dimitrios D. Vergados, PeriklisChatzimisios. An Access Network Selection Algorithm for Heterogeneous Wireless Environment[C]. IEEE Symposium on Computers and Communications(ISCC), 2010:890-892.
- [65] Hasib A, Fapojuwo A O. Anaylsis of common radio resource management scheme for end-to-end QoS support in multiservice heterogeneous wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4):2426-2439.
- [66] Xiaoli Ai, Wennan Zhou, Bing Xie, eal. Network Selection Issue in Heterogeneous Wireless Environment[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC), Sydney, NSW, 2010:1-6.
- [67] SuKyoung Lee, KotikalapudiSriramKyungsoo Kim, JongHyup Lee, etal. Vertical Handoff Decision Algorithm Providing Optimized Performance in Heterogeneous Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008.05. 58(2):865-881.
- [68] YANG K, GONDAL I, QIU B. Context aware vertical soft handoff algorithm for heterogeneous wireless networks[A]. IEEE VTC-2008 FALL[C]. 2008:1-5
- [69] Jorperez P R, Sallen O. Loose and tight interworking between vertical and horizontal handovers in multi-RAT scenarios[C]. IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2006:579-582.

- [70] 施政, 朱琦. 异构网络中基于角度模型的垂直切换率分析[J]. 信号处理, 2012. 28(7): 1029-1036.
- [71] 刘次华. 随机过程及其应用第三版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013. 05: 98-103.
- [72] 魏慧敏. 半正定二次型及半正定矩阵性质的推广[J]. 赤峰学院学报, 2012. 08. 28(8).
- [73] 解可新, 韩健, 林友联. 最优化方法[M]. 天津: 天津大学出版社, 2013. 01: 28-40.
- [74] W. Yu, R. Lui. Dual methods for nonconvex spectrum optimization of multicarrier systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(7):1310-1322.

附录 1 程序清单

第三章 基于群组决策的异构无线网络选择算法（文件夹“第三章”）

get_weight_AHP.m: AHP 法获取主观权重

get_weight_EW.m: EW 法获取客观权重

get_weight_g1.m: G-1 法获取主观权重

get_weight_o.m: CRITIC 法获取客观权重

get_ngdn_weight.m: 获取综合权重向量

main_per_ana_n.m: 对不同业务类型进行仿真分析

plot_main_per_1nnne.m: 画不同业务类型性能参数仿真图

第四章 基于多网络连接的异构网络选择算法（文件夹“第四章”）

distance.m: 计算坐标距离函数

fortest.m: 用户移动测试函数

genereate_users.m: 按照泊松分布产生移动用户

gra_main.m: 采用 GRA 算法进行网络排序时不同权重向量下性能仿真的主函数

testplot3_1.m: 画异构网络重叠区域内业务到达率与系统吞吐量、各自网络的阻塞概率等性能参数的关系曲线的主函数

第五章 基于生灭过程的异构网络多网络接入的优化算法（文件夹“第五章”）

huangjin 文件夹的 main.m 为网络选择单网络接入时采用黄金分割法计算优化算法最佳解的求解函数

BOUNDS 文件夹的 pb_limit.m 画网络阻塞率与阻塞率上下限关系图

steady_distribution.m: 计算稳态分布的函数

get_max_md1: 采用次梯度方法求解最佳解的主函数

main.m: 计算网络重叠区域内业务到达率与接入到 UMTS/WiMAX 网络的用户到达比例、系统吞吐量、每个网络的阻塞情况以及接入比例平均分配时各个性能参数的主函数

附录 2 攻读硕士学位期间撰写的论文

- (1) Zhang Shuo, Zhu Qi. The birth and death process enhanced optimization algorithm for multi-access selection in heterogeneous wireless networks[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2016, 32(2):461-481, SCI 源
- (2) Zhang Shuo, Zhu Qi. Heterogeneous wireless network selection algorithm based on group decision[J]. Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, June 2014, 21(3): 1-9, EI: 20143017965668

附录 3 攻读硕士学位期间申请的专利

- (1) 朱琦, 张硕, 基于四种权值向量的异构网络选择方法, 专利号: ZL 201310192317.5, 2016.3.10 授权

附录 4 攻读硕士学位期间参加的科研项目

- (1) 国家自然科学基金，面向 5G 的超密集异构网络能效优化理论与方法研究（61571234）；
- (2) 国家重点基础研究发展计划（973 计划），智能协同移动服务模型（2013CB329005）。

致谢

在南邮走过青春最重要的七年，如今，是要说再见的时刻了。提笔艰难，真的是因为舍不得。一方面，告别近二十年的学习生涯，离开校园，找寻自己在社会当中的新角色；另一方面，于校园于人言离别，难免伤春悲秋，有些再见，若再难相见，便请珍重万千。

言谢太多，也要一一说来。首先诚心感谢我的研究生导师——南京邮电大学博士生导师朱琦老师。朱琦老师是一位治学十分严谨的导师，对待学生，温暖入春；对待工作，一丝不苟。三年的言传身教，让每一个朱门子弟有了应对工作的细致与信心。从2012年秋天顺利保研进入朱门，朱琦老师便对我关爱有加，对个人学业发展规划，也是得到了朱老师的鼓励和支持。如今，毕业将近，对朱老师，感激满满。研究生三年，正是因为朱琦老师抓工作抓在前头的策略以及在课题与学术上的提点与支持，让我得以顺利发表学术论文并得以完成毕业大论文的写作。在此，再一次向朱琦老师由衷感谢！

我短暂的学术生涯不能说收获满满，但也是取得了一定的进展。这一路，师兄师姐的帮助让我受益匪浅。感谢费春生师兄和施政师兄带我进入课题研究状态，感谢陈芳师姐、张丽娜师姐在学术、仿真等方面对我的无私帮助，感谢付雅茹师姐一路以来对我的提点与关怀，让我更有信心与勇气走好以后的职业生涯。实验室里面共同奋斗的小伙伴，五位一年为期的宿舍舍友，感谢各位在学术、生活中给我的鼓励与帮助，让我在南邮的生活感动满满。同时，感谢，通信学院的各位老师，以及我在本科生涯和研究生涯教授我课程的各个学院的老师们，是你们让我在通信领域从无知到了解，从了解到热爱。还有感谢南京邮电大学，感谢提供良好的学习与生活环境与学术交流的平台，让我可以拥有难得的机遇以及不一样的人生！

最后，感谢我的家人二十几年来对我的关心与爱护，教诲与培养！我会继续努力，好好工作，愿生活如我所愿，也如你们所愿。我爱你们每一位，再次，祝愿所有人健康、开心、幸福！