

申请上海交通大学硕士学位论文

移动无线网络信道在线测试与应用

论文作者 马永森

学 号 1100329074

指导教师 龙承念 教授

专 业 控制科学与工程

答辩日期 2013 年 2 月 20 日

Submitted in total fulfilment of the requirements for the degree of Master
in Control Science and Engineering

Online Channel Measurement and Application in Mobile Wireless Networks

YONGSEN MA

Supervisor

Prof. CHENGNIAN LONG

DEPARTMENT OF AUTOMATION
SCHOOL OF ELECTRONIC, INFORMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY
SHANGHAI, P.R.CHINA

February 20th, 2013

上海交通大学 学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：_____

日期：_____年____月____日

上海交通大学 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本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和汇编本学位论文。

保 密，在_____年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名: _____

指导教师签名: _____

日期: ____ 年 ____ 月 ____ 日

日期: ____ 年 ____ 月 ____ 日

移动无线网络信道在线测试与应用

摘 要

近年来，无线网络尤其是移动网络发展迅速，一方面造成业务流量和用户需求的增加，另一方面带来频谱利用率的下降，因此如何通过有效的资源分配实现系统可靠性与网络传输性能的平衡成为移动网络的关键问题。传统的频谱资源分配一般采用理论上的无线传播或链路质量模型，但是这些模型由于忽略了多径效应和移动性等因素，在实际应用过程中通常难以实现有效的资源调度与分配。实际应用中一般利用实测数据对当前网络状态进行评估，同时实现无线资源的动态分配，如功率控制、速率适配及接入控制等，因此实时准确的通信质量测试对于移动网络的可靠稳定运行至关重要。移动无线网络通信质量最重要的两项指标为信道状态与链路质量，分别表征了其物理层与链路层的通信质量信息，同时也是网络运行与优化的重要参数，因此两者的准确高效的测量能实现移动网络可靠性与传输性能的有效平衡。对于移动无线网络通信质量测试而言，主要问题是如何在不同的网络场景与系统需求下，实现测试精度与开销之间的有效平衡。

首先，由于 **GSM-R** 网络对安全性具有严格要求，现有测试方法均采用高频采样，成本较高且仅适用于离线测试，无法应用于在线测试及资源调度。对于高速移动网络 **GSM-R** 而言，在满足测量精度的前提下应尽量降低其测试开销，实现对 **GSM-R** 网络的在线实时测试，保证整个高铁系统的稳定可靠运行。而 **GSM-R** 网络具有移动终端高速移动性和无线传播环境复杂性的特点，从而对其通信质量测试形成巨大挑战。传统的信号强度测试算法无法直接应用于 **GSM-R** 网络测试中，这就要求 **GSM-R** 网络信号强度测试算法必须具有实时高效的特点，以适应高速铁路的特殊要求，即在高速移动条件下满足信道状态测试精度并降低测试开销。

其次，对于 **802.11n** 网络而言，除了移动性及无线传播环境的影响外，**MIMO-OFDM** 技术进一步增加了链路质量测试与建模的复杂度。**MIMO-OFDM** 技术一方面显著地提升了网络性能，另一方面给 **802.11n** 网络链路质量测试与

建模带来新的问题：获得所有配置下的链路质量模型需要进行更多的探测与采样，同时 MIMO-OFDM 配置造成链路质量模型的过渡窗口效应，从而严重降低链路质量预测精度。因此如何针对 802.11n 网络的移动性与多配置性，设计动态的链路质量测试与建模算法，以准确刻画 MIMO-OFDM 配置的链路质量，从而根据当前网络状态进一步提升其网络性能，即在 MIMO-OFDM 多配置情况下实现不同配置链路质量模型的在线实时测试与建模。

本文主要针对高速移动网络和无线局域网络中的信道估计与链路测试问题，对移动网络的通信质量测试进行详细分析，针对高速移动特性及 MIMO-OFDM 多配置特性分别提出信道状态动态测试算法及链路质量在线测试与建模框架，通过当前网络状态实时调整测试参数，在满足测试精度的前提下降低测试开销，最后通过算法设计、系统实现与实验测试对移动网络通信质量测试算法进行性能评估。

关键词：移动无线网络，通信质量测试，GSM-R，802.11n，MIMO-OFDM，信道状态估计，链路质量建模

Online Channel Measurement and Application in Mobile Wireless Networks

ABSTRACT

The mobile wireless networks have experienced rapid development in recent years, and the growth is expected to continue unabated. For different types of mobile networks, a basic consideration is the accurate channel state estimation and link quality measurement to get efficient trade-off between reliability and data rate. Therefore, accurate channel measurement and prediction is becoming increasingly important in mobile wireless networks, and it is crucial to lower the estimation overhead to address the issues of mobility and multi-configuration so that real-time measurement can be implemented to ensure the reliability or data rate.

For GSM-R networks deployed for communications between train and railway regulation control centers in high-speed railway, it requires real-time measurement to ensure the reliability of the system [1]. For the channel state estimation in mobile networks, Lee's method [2] is widely used but it is analyzed in Rayleigh fading channels. Other methods that deal with Rician channels have high overhead which can not applied in GSM-R networks. Here comes the problem that how to make accurate channel measurement with lower overhead. At the same time, it is necessary to make dynamic measurement due to the complexity of the radio propagation environments and the varied terrains along the high-speed railway route.

On the other hand, the continued success of mobile 802.11n depends on their ability to efficiently configure different PHY/MAC enhancements. This is challenging in that multi-configuration in mobile 802.11n not only requires far more samples to acquire sufficient information for all possible channel settings, but also introduces significant complications in channel modeling. Furthermore, channels are more vulnerable to environmental variability and terminal mobility in mobile 802.11n. Furthermore, re-

cent studies show that Received Signal Strength (RSS) is a weak indicator for 802.11n channel quality due to the large transition window with respect to Packet Delivery Ratio (PDR), and there exists a fundamental and inevitable tradeoff between the accuracy and overhead in channel measurement and prediction. This is further complicated by the distinctive features in mobile 802.11n networks, specifically, multiple PHY/MAC settings and spatial-temporal variation channels. So the problem is how to get accurate prediction of packet delivery according to the current network state.

This paper first proposes the online channel estimation algorithm which takes advantage of the sampling signals and Rician fading parameters of last estimation to improve estimation accuracy and reduce measurement overhead. The determination of proper length of statistical interval and required number of averaging samples are adaptive to different propagation environments. As for mobile 802.11n networks, this paper incorporates a novel design by exploiting both packet-level and physical-level metrics, along with the diversity property of multi-configuration simultaneously to overcome channel capturing problem in the existing PDR-RSS models. This on-line framework also strikes a balance between the measurement overhead and accuracy. We further develop a rate adaption algorithm to advocate the advantage of on-line PDR-RSS modeling framework. Through the real world implementation on our testbed, the proposed measurement methods and rate adaption algorithm are evaluated. The experimental results show that the online measurement algorithm significantly reduces the measurement overhead with guaranteed accuracy, and the network performance including packet delivery and throughput are also improved.

KEY WORDS: Mobile wireless network, performance measurement, GSM-R, 802.11n, MIMO-OFDM, local mean power estimation, packet delivery modeling

目 录

摘要	i
ABSTRACT	iii
目录	v
插图索引	vii
表格索引	ix
主要符号对照表	xi
第一章 绪论	1
1.1 研究背景与研究意义	1
1.1.1 高速移动网络	1
1.1.2 无线局域网络	2
1.2 研究现状	5
1.2.1 物理层信道状态估计	5
1.2.2 链路层链路质量测试	6
1.3 研究内容与主要贡献	7
1.4 论文结构	8
1.5 本章小结	8
第二章 信道状态采样与估计	9
2.1 问题描述	9
2.1.1 现有工作	9
2.1.2 存在问题	11

2.2	无线传播模型	11
2.2.1	阴影衰落	13
2.2.2	多径衰落	14
2.3	信道状态动态估计	15
2.3.1	信道参数估计	15
2.3.2	统计区间长度	16
2.3.3	采样点数	18
2.4	系统实现	19
2.4.1	硬件平台	19
2.4.2	软件开发	21
2.4.3	算法实现	24
2.4.4	基本功能	24
2.5	性能评估	28
2.6	本章小结	31
第三章	链路质量测试与建模	33
3.1	问题描述	33
3.1.1	现有工作	33
3.1.2	存在问题	34
3.2	链路质量动态测试	36
3.2.1	信号传输模型	36
3.2.2	传统测试方法	37
3.2.3	动态滑动平均	40
3.3	链路质量在线建模	44
3.3.1	模型初始化	46
3.3.2	模型在线更新	49
3.4	系统实现	51
3.4.1	实验平台	51
3.4.2	测试方法	51

3.4.3 速率控制	52
3.5 性能评估	54
3.5.1 传输成功率	54
3.5.2 吞吐量	56
3.6 本章小结	60
总结与展望	61
附录 A 接收信号强度本地均值估计	63
A.1 统计区间长度	63
A.2 采样点数目	64
参考文献	67
致谢	75
攻读学位期间发表的学术论文目录	77
攻读学位期间参与的项目	79

插图索引

1–1 GSM-R 网络业务模型	2
1–2 GSM-R 网络基本结构	3
2–1 接收信号强度测试过程	9
2–2 移动无线网络时变特性	10
2–3 移动无线网络位置差异性	12
2–4 GSM-R 网络无线传播环境	12
2–5 GSM-R 网络移动台与基站间距离	13
2–6 在线动态测试框架	15
2–7 统计区间长度	17
2–8 采样点数	19
2–9 GSM-R 网络空中接口测试系统	20
2–10 GSM-R 网络空中接口测试系统硬件组成	21
2–11 GSM-R 网络空中接口测试系统启动界面	22
2–12 GSM-R 网络空中接口测试系统软件界面	22
2–13 信道状态估计算法与实现	26
2–14 GSM-R 网络空中接口测试系统软件结构	27
2–15 GSM-R 网络空中接口测试系统数据处理	27
2–16 GSM-R 网络空中接口测试系统	28
2–17 信道状态测试结果	29
2–18 接收信号强度与信号衰落	30
3–1 静态链路质量 -信道状态模型	33
3–2 链路质量测试误差	35
3–3 PDR-RSS 模型过渡窗口	36

3-4 静态加权平均	37
3-5 静态网络测试精度	39
3-6 测试精度 ($\alpha = 0 \sim 0.5$)	39
3-7 动态滑动平均	40
3-8 数据包接收成功概率	42
3-9 移动网络测试精度	43
3-10 动态滑动平均测试精度	44
3-11 动态 PDR-RSS 模型框架	45
3-12 链路质量模型, HT=HT20/HT40, MCS=8-14, GI=LGI	46
3-13 链路质量模型, HT=HT20/HT40, MCS=8-14, GI=SGI	47
3-14 链路质量模型, HT=HT20/HT40, MCS=15, GI=LGI/SGI	48
3-15 PDR-RSS 初始模型	49
3-16 802.11n 网络测试系统	51
3-17 链路质量测试算法	53
3-18 传输成功率测试精度	55
3-19 传输成功率测试开销	55
3-20 吞吐量及传输成功率	57
3-21 吞吐量累积分布函数	58
3-22 吞吐量及平均接收信号强度关系	59

表格索引

1–1 802.11 网络基本参数	3
1–2 802.11n 网络 MCS 索引	4
2–1 RxLev 映射关系	23
2–2 信道状态估计结果总结	29
3–1 加权算法测试误差	43
3–2 滑动算法测试误差	43

主要符号对照表

GSM	Global System for Mobile communications	全球移动通信系统
GSM-R	GSM for Railways	铁路移动通信系统
ITU	International Telecommunication Union	国际电信联盟
WLAN	Wireless Local Area Networks	无线局域网络
Wi-Fi	Wireless Fidelity	无线保真
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	多天线系统
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
RSS	Received Signal Strength	接收信号强度
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	信号与干扰加噪声比
CSI	Channel State Information	信道状态信息
PDR	Packet Delivery Ratio	数据包传输成功率
QoS	Quality of Service	服务质量
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
GIS	Geographic Information System	地理信息系统
BS	Base Station	基站
MS	Mobile Station	移动台
AP	Access Point	接入点
EWMA	Exponentially Weighted Moving Average	指数加权移动平均
DWSA	Dynamic Weighted Sliding Average	动态加权滑动平均
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制与编码策略
MAC	Medium Access Control	媒介访问控制
SDM	Spatial Division Multiplexing	空分复用
MSDU	MAC Service Data Units	服务数据单元
MPDU	MAC Protocol Data Units	协议数据单元

A-MSDU	Aggregation of MSDU	聚合服务数据单元
A-MPDU	Aggregation of MSDU	聚合协议数据单元
STBC	Space Time Block Coding	空时编码
GI	Guard Interval	保护时隙
LGI	Long Guard Interval	长保护时隙
SGI	Short Guard Interval	短保护时隙
ACK	Acknowledgement	应答
MLE	Maximum Likelihood Estimation	最大似然估计
MMSE	Minimum Mean Square Error	最小均方误差
XML	eXtensible Markup Language	可扩展标记语言

第一章 绪论

移动无线网络中的一个基本问题是如何在系统可靠性与网络传输性能之间进行有效平衡，对于高速移动网络而言，首先要保证其系统可靠性以实现信息的可靠传输；而无线局域网络则更关注网络的传输性能，包括网络吞吐量及覆盖范围等。其中信道状态和链路质量作为无线网络可靠性与传输性能的衡量指标，同时也是网络运行与优化的重要参数，因此两者的准确高效的测量对于移动网络中可靠性与传输性能的有效平衡至关重要。本文主要针对高速移动网络和无线局域网络中的信道估计与链路测试问题，对移动网络的通信质量测试进行详细分析，并通过算法设计、系统实现与实验测试对移动网络通信质量测试算法进行性能评估。

1.1 研究背景与研究意义

无线网络业务需求呈持续增加趋势，同时造成无线频谱资源的过度拥挤。尤其对于移动无线网络而言，其亟需解决的问题是：如何在保证网络可靠性的基础上，尽量提高其传输性能及频谱利用效率？信道状态与链路质量既是衡量无线网络性能的重要指标，同时在网络决策过程中发挥重要作用，因此关键问题是如何准确高效地对信道状态与链路质量进行实时测量，从而实现可靠性与传输性能的有效平衡。

1.1.1 高速移动网络

在高速铁路的快速发展的过程中，列车的安全稳定运行至关重要，要实现高铁的安全稳定高速运行，必须实时地对整个高铁系统进行安全监测。其中列控系统保证高铁系统的可靠运行，GSM-R 无线网络则是列控系统中的关键环节，同时又是系统中最脆弱的部分。GSM-R 网络是专门应用于铁路环境中的综合数字调度移动通信网络，如图 1-1 所示，GSM-R 网络承载了高速铁路的列车运行状态数据传输、列车控制数据传输、区间移动公务通信、应急指挥通信等业务，因此对 GSM-R 网络进行实时监测具有重要意义。

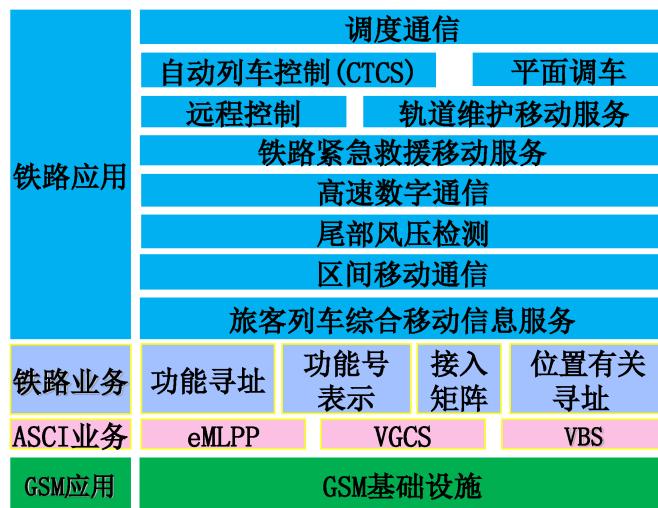


图 1-1 GSM-R 网络业务模型

Fig 1-1 Service model of GSM-R networks

目前我国的 GSM-R 数字移动通信系统由七个子系统构成：网络交换子系统 (SSS)、基站子系统 (BSS)、操作维护子系统 (OSS)、通用分组无线业务子系统 (GPRS)、智能网子系统 (IN)、固定接入交换子系统 (FAS) 和终端子系统，如图 1-2 所示。GSM-R 系统的各个功能单元通过不同的接口进行连接，使各组成单元在物理上和逻辑上遵守特定的协议。GSM-R 系统测试的主要应用到的接口有空中接口、Abis 接口、A 接口、PRI 接口等，其中空中接口是移动台与基站之间的通信接口，用于移动台与 GSM-R 系统固定部分之间的通信，其物理连接通过无线链路实现，它的特点是完全标准化。

在 GSM-R 网络的通信过程中，大部分的信令都是和移动台相关，从图 1-2 中可以看出，虽然移动台只和基站之间存在接口，但发往基站和从基站发往移动台的信令消息中还包括了移动台与 GSM-R 网络中其他设备之间的通信信息，即要在无线接口上传输各种不同的协议。同时，由于空中接口为无线链接，其可靠性是 GSM-R 网络能够正常运行的基础，因此需要对 GSM-R 的空中接口进行实时监测 [1]。

1.1.2 无线局域网络

近年来，无线业务的流量和带宽需求不断提高，使得基于 802.11n 的无线局域网络 (Wireless Local Area Networks, WLANs) 经历了快速的发展，同时由

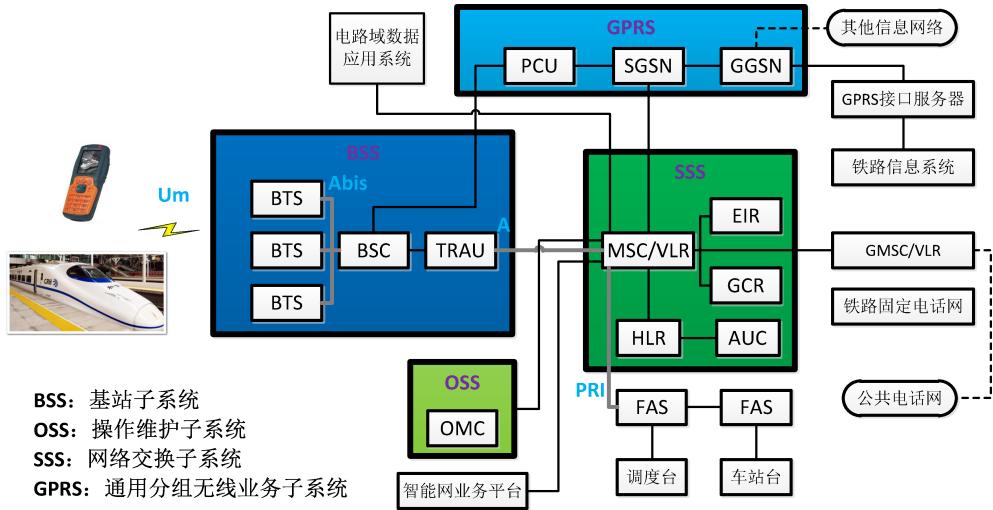


图 1-2 GSM-R 网络基本结构

Fig 1-2 Architecture of GSM-R networks

于智能手机等移动终端的迅猛发展，802.11n 网络将会得到进一步的发展 [5]。802.11n 网络一方面能够有效提升网络性能，同时也使得链路质量的测试与建模更为复杂。

802.11n 网络的显著特点是采用了 MIMO-OFDM 及其相关技术，从而有效地提升网络的传输性能。在物理层方面，多天线技术有效提升网络吞吐量及覆盖范围，同时提高系统的稳定性，以及信道绑定技术等，更好地解决载波侦听、隐藏/暴露终端等问题；在链路层方面，802.11n 网络采用帧聚合技术即多个帧共用一个 MAC 头部，同时降低 ACK 发送频率及发送/接收开销，提高传输效率，同时采用 400ns 的短保护间隔，以降低时间开销，并提高链路层吞吐量。

表 1-1 802.11 网络基本参数

Table 1-1 Features and settings of 802.11 networks

	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
调制方式	OFDM	DSSS/CCK	OFDM DSSS/CCK	SDM/OFDM
频率	5GHz	2.4GHz	2.4GHz	2.4/5GHz
信道带宽	20MHz	25MHz	25MHz	20/40MHz
传输速率	6-54Mbps	5.5/11Mbps	1-54Mbps	6-600Mbps

首先 802.11n 网络显著提升了无线局域网络的传输性能、覆盖范围及其兼容性。在传输速率方面，802.11n 可以将无线局域网的传输速率由目前 802.11a 及 802.11g 提供的 54Mbps，提高到 300Mbps 甚至高达 600Mbps。得益于将多天线（Multiple Input Multiple Output, MIMO）与正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）技术相结合而应用的 MIMO-OFDM 技术，提高了无线传输质量，也使传输速率得到极大提升，如表 1-1 所示；在覆盖范围方面，802.11n 采用智能天线技术，通过多组独立天线组成的天线阵列，可以动态调整波束，保证让用户接收到稳定的信号，并可以减少其它信号的干扰。因此其覆盖范围可以扩大到数十平方公里，同时使无线局域网的移动性得到极大提高；在兼容性方面，802.11n 采用了一种软件无线电技术，它是一个完全可编程的硬件平台，使得不同系统的基站和终端都可以通过这一平台的不同软件实现互通和兼容，这使得 WLAN 的兼容性得到极大改善。这意味着 WLAN 不仅能实现 802.11n 网络的前后兼容，而且可以实现 WLAN 与无线广域网络的结合，比如 3G 及 LTE 网络。

表 1-2 802.11n 网络 MCS 索引

Table 1-2 MCS index of 802.11n

MCS	Modulation	Code Rate	Rate (Mbps)	Sensitivity (dBm)	
				Typical	Max
0	BPSK	1/2	6.5	-94	-85
1	QPSK	1/2	13.0	-92	-82
2	QPSK	3/4	19.5	-90	-80
3	16 QAM	1/2	26.0	-87	-77
4	16 QAM	3/4	39.0	-84	-73
5	64 QAM	2/3	52.0	-79	-69
6	64 QAM	3/4	58.5	-78	-68
7	64 QAM	5/6	65.0	-76	-67

另一方面，802.11n 网络链路质量的测试与建模更为复杂，如表 1-2 所示。第一，802.11n 网络的多种配置提高了链路质量测试的复杂度，需要对所有可能的物理层与链路层配置进行采样测试，同时使得链路质量的建模变得复杂；第二，802.11n 网络的链路质量与信道状态（Packet Delivery Ratio - Received Signal Strength, PDR-RSS）模型呈现过渡窗口，而并非传统无线网络中的近似

线性关系；第三，移动网络的信道状态与链路质量更容易受到无线传播环境及通信终端的移动性的影响，从而影响到链路质量测试与建模的精度。

1.2 研究现状

对于高速移动网络 **GSM-R** 与无线局域网络 **802.11n** 通信质量测试而言，其目标都是实现系统可靠性与网络传输性能的有效平衡，但是两者的侧重点不同，前者主要保证网络的可靠运行，而后者主要实现传输性能的提升。无线网络通信质量通常由信道状态与链路质量进行衡量，而信道状态是链路质量的基础，因此对于 **GSM-R** 网络而言，其关键是如何在高速移动情况下实现信道状态的可靠估计，同时在保证测试精度的前提下尽量降低测试开销，进而完成上层的链路质量测试以保证系统可靠性；而对于移动 **802.11n** 网络，由于其移动性与多配置的特性，主要难点是如何实现实时的链路质量测试与建模，从而实现不同网络状态下网络的有效配置，以提高网络传输性能。

1.2.1 物理层信道状态估计

无线传播测量与信道状态估计在移动网络中发挥重要作用，并广泛应用于其它上层应用中，例如无线覆盖评估、信道接入、功率控制及小区切换等 [3][6][7][8]。文献 [9] [10] 给出了无线网络中无线传播模型及其测试方法，文献 [11] 以国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）相关规定为基础提出点到面无线传输服务的无线预测模型。文献 [12] 和 [13] 分别基于最小均方差和 Levenberg-Marquardet 方法提出改进 Okumura-Hata 传播模型。以上的无线传播模型与测试方法主要集中于路径损耗与阴影衰落，当考虑到移动无线网络中的多径衰落时，主要问题是如何对接收信号强度进行估计，以准确反映网络当前的链路质量。

针对这一问题，William C. Y. Lee 在 1985 年提出移动网络信号强度采样算法 [2]，该算法分析了瑞利衰落情况下接受信号强度本地均值的估计问题，并给出合适的统计区间与采样点数的参数设置。Mark D. Austin 在其蜂窝网络的切换算法中对莱斯衰落条件下的采样算法进行了推导 [3]，得到统计区间与采样点数的近似解，但是该算法过程复杂且计算量较大。David de la Vega 在 2009 年提出通用 Lee 氏采样算法 [4]，在不需要知道多径衰落具体分布的条件下，利用实测采样信号进行估计，得到实际网络环境所需要的统计区间与采样点数。

由于高速铁路无线环境的复杂性及其对安全性的特殊要求，以上的本地均值估计算法难以在较低的测试开销条件下实现可靠的测试精度，不符合高铁环境实时测试的要求，因此无法直接应用于 GSM-R 网络中。

由于高速铁路沿线地形复杂多变，一条线路通常会经过山地、平原、隧道和高架等地形，从而造成 GSM-R 网络无线传播环境的复杂性。同时高速铁路无线传播环境大多较为平坦，同时为了尽量保证 GSM-R 网络的可靠性，基站位置通常距离高铁线路很近，而且小区半径一般设置为 3-6km，从而造成移动终端与基站之间一般存在直射路径 (Line of Sight, LOS)，因此 GSM-R 网络的无线传播应该刻画为莱斯衰落。对于莱斯衰落信道的参数估计已有大量相关工作，包括基于学习训练机制 [14]、最大似然估计 (Maximum Likelihood, ML) [15] 以及期望最大化算法 (Expectation Maximization, EM) [16]。因此 GSM-R 网络的信道状态估计问题实为莱斯衰落信道下本地均值估计，如何通过莱斯衰落参数估计，确定信道状态测试的采样参数。

1.2.2 链路层链路质量测试

无线网络中基于实测数据的 PDR-RSS 模型存在大量研究，多数早期的工作主要针对静态无线网络中的离线 PDR-RSS 模型 [17] [18]，同时实测 PDR-RSS 模型广泛应用于其他上层应用中，包括容量分析 [19] 和速率控制 [20] [21] 等。文献 [22] 通过实验与仿真的结合，提出移动无线网络的可重复测量方法，文献 [23] 同样提出针对移动网络的频谱测量方法，但是只对 RSS 进行测量而忽略链路质量。以上的移动无线网络测量方法都基于传统 802.11a/b/g 网络，而无法直接应用于 802.11n 网络中。由于 802.11n 网络采用 MIMO-OFDM 技术，导致 PDR-RSS 模型存在过渡窗口，从而增加了链路质量测试与建模的复杂度。近期许多工作针对 802.11n 网络的实验特性进行了详细分析 [24] [25]，其中文献 [24] 利用 802.11n 网络的 MIMO-OFDM 特性提出基于信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 的链路质量预测模型；文献 [25] 针对信道绑定技术，分析了信道带宽对无线局域网络性能的影响。以上针对 802.11n 网络的工作并未针对移动性进行分析，同时主要针对物理层而忽略链路层的影响。

信道状态与链路质量及其模型广泛应用于速率控制算法中 [26] [27] [28] [29]，许多算法应用于 Linux 平台无线驱动中，例如采用 Minstrel 算法 [30] 的 *mac80211* 及 Atheros [31] 的 *ath9k* 无线驱动，但是以上的算法都采用固定指数

加权平均 (Exponential Weighted Moving Average, EWMA) 进行链路质量测试，仅适用于静态 802.11 网络。针对移动无线网络的速率控制算法主要针对 RSS 测量 [20] [21]，并利用静态 PDR-RSS 模型进行链路质量预测，但是其预测精度容易受 802.11n 网络的 MIMO-OFDM 配置的影响。许多上层应用考虑到在线 PDR 测试算法，比如入侵信号检测 [32] 与拥塞控制 [33] 等，但是并不考虑链路质量建模与速率控制问题。以上速率控制算法主要利用静态 PDR-RSS 模型 [19] [17] [18]，同时只利用单一指标，即链路层 PDR 或物理层 RSS，进行链路质量预测与速率控制 [21] [28]。

1.3 研究内容与主要贡献

本文主要针对移动无线网络的时间与空间特性，分别提出信道状态与链路质量的动态测试算法，以降低测试开销并提高测试精度，进而有效提升网络的传输性能。本文的主要创新点与贡献为：

1. 信道状态采样与估计

- (a) 根据高速移动网络无线传播环境的特点，根据当前网络状态进行动态采样，同时完成衰落参数估计与采样频率计算；
- (b) 在保证测试精度的前提下降低测试开销，在高速移动条件下降低信道采样对数据传输的不利影响。

2. 链路质量测试与建模

- (a) 通过动态滑动平均算法对传输成功率进行实时测量，根据网络状态实现链路质量测试精度与开销的有效平衡；
- (b) 设计并实现链路质量在线建模框架，同时利用物理层与链路层指标实现移动 MIMO-OFDM 网络的速率适配。

针对以上的信道状态与链路质量的动态测试算法，本文分别完成测试系统的软硬件平台搭建，最后通过实验对测试算法进行测试、对比与评估。首先搭建 GSM-R 网络空中接口监测系统，并自主开发在线测试软件平台，于京沪高速铁路进行实验测试；同时开发无线局域网络通信质量测试软件，并对测试算法及速率适配算法进行验证、对比与评估。

1.4 论文结构

本文首先对移动无线网络及其通信质量测试进行简要介绍，包括移动无线网络基本结构、通信质量测试研究现状以及本文的研究内容与主要贡献，第二章对物理层信道状态采样与估计进行深入探讨，针对 **GSM-R** 网络的无线传播环境及高速移动性，提出 **GSM-R** 网络信道状态在线测试算法，并通过系统搭建、软件开发及实验测试对该算法进行评估对比。第三章主要介绍链路层链路质量测试与建模，针对移动 **MIMO-OFDM** 系统的多配置的特点，提出传输成功率动态测试算法及在线建模框架，并据此设计速率适配算法，最终通过软件开发与实验测试对提出的算法进行评估。最后对全文进行总结与展望。

1.5 本章小结

本章主要介绍了移动网络通信质量测试，针对移动网络中可靠性与传输性能的有效平衡，提出信道状态与链路质量测试问题。首先对于高速移动网络 **GSM-R** 而言，首要问题是保证系统的可靠性，因此需要对无线接口进行实时监测，但由于移动终端的高速移动性及传播环境的复杂性，对信道状态估计的精度与开销带来极大挑战。其次在无线局域网络中，**MIMO-OFDM** 技术能够有效地提升网络的传输性能，但同时其多配置的特性给链路质量测试与建模带来新的问题，而通信终端的移动性又进一步降低了链路质量测试的精度。因此本文针对移动网络中信道状态及链路质量测试问题，提出动态测试算法以根据当前网络状态调整测试参数，从而保证网络的可靠运行及传输性能。本文的章节安排如下，第二章主要介绍信道状态采样与估计，针对 **GSM-R** 网络的高速移动性与传播环境复杂性，提出接收信号强度动态测试算法，在保证一定测试精度的条件下降低测试开销，并通过系统设计与实现对该算法进行评估。第三章介绍链路质量测试与建模，主要解决移动 802.11n 网络中 **MIMO-OFDM** 配置及移动性对链路质量测试与建模带来的问题，提出在线测试与建模框架，在保证系统可靠性的前提下尽量提高系统吞吐量，最后通过系统实现与实验测试对其测试及传输性能进行评估。

第二章 信道状态采样与估计

安全始终是高速铁路发展过程中的首要目标，而 **GSM-R** 网络则是保证高铁系统安全性的重要环节，因此有必要对 **GSM-R** 网络进行在线实时测试，在确保 **GSM-R** 网络正常通信的基础之上，保证整个高铁系统的稳定运行。但是由于高铁系统具有较为特殊的无线传播环境，传统的信号强度测试算法无法直接应用于 **GSM-R** 网络测试中，例如高铁线路周围地形复杂多变以及列车处于高速运行状态，这就要求 **GSM-R** 网络信号强度测试算法必须具有实时高效的特点，以适应高速铁路的特殊要求。

2.1 问题描述

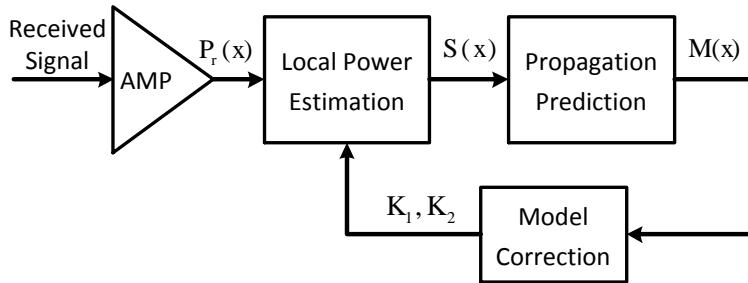


图 2-1 接收信号强度测试过程

Fig 2-1 Basic Procedures of Radio Propagation Measurement

无线网络接收信号强度测试过程如图 2-1 所示，测试系统通过包络检测得到接收信号强度，然后通过信号动态采样算法，得到当前阴影衰落与多径衰落信息，一方面用来对网络通信状态进行评估，另一方面作为网络越区切换的判断依据。同时根据采样数据进行无线传播预测，对网络的覆盖情况进行评估，最后对估计算法与预测模型进行参数修正。

2.1.1 现有工作

移动无线网络信号强度测试的一个基本问题是本地均值的可靠估计，即如何确定合适的采样参数以准确地获取当前信号强度，同时在测试精度与开销之

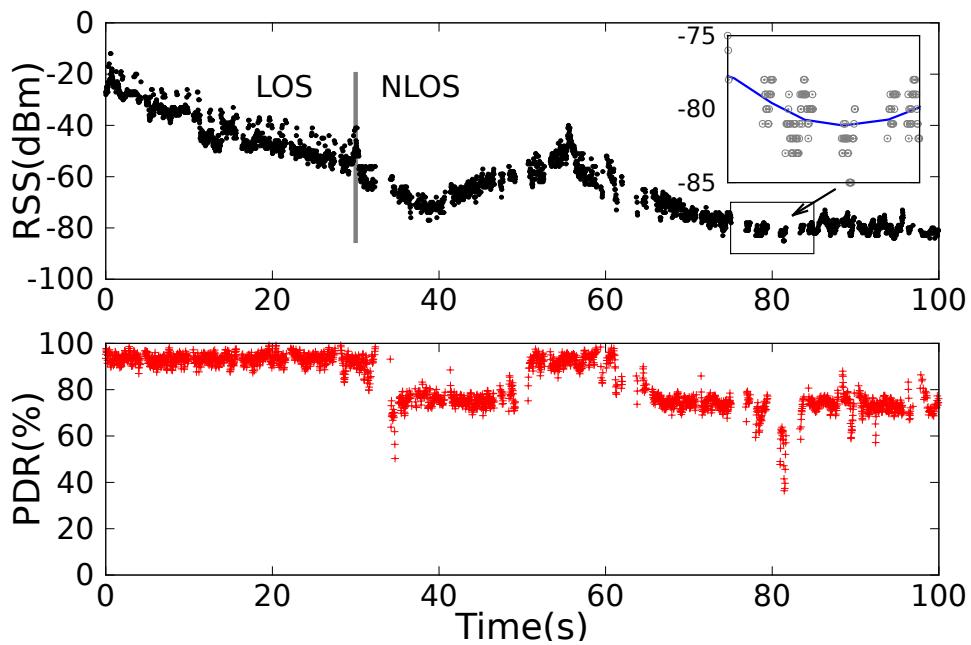


图 2-2 移动无线网络时变特性

Fig 2-2 Time varying of RSS in mobile wireless networks

间实现合理平衡。移动无线网络接收信号强度通过特定统计区间内一定数量的采样点数的算术平均获得，因此采样频率决定了信号强度的测试精度与开销，因此需要根据无线传播环境的变化对信号的采样频率进行实时调整，对于 GSM-R 网络而言合理的采样精度与开销的平衡尤为重要。

如图 2-2 所示，移动无线网络接收信号强度具有明显的时变特性，其中包括大尺度衰落和小尺度衰落，如果信号采样的统计区间过长或采样频率过低，系统将无法对小尺度衰落作出合理评估，从而难以保证可靠的数据传输；相反，如果统计区间过短或采样频率过高，大尺度衰落和小尺度衰落难以有效区分，从而导致网络状态的不稳定，例如接收信号强度在切换门限附近波动造成的乒乓切换效应。

William C. Y. Lee 在 1985 年最先提出移动网络信号强度采样算法，即 Lee 氏采样算法 [2]，该算法以移动网络无线传播传播模型为基础，在无线传播环境服从瑞利衰落的假设条件下，推导出信号强度的本地均值测量中的统计区间长度与采样点数。Mark D. Austin 在其蜂窝网络的切换算法中对莱斯衰落条件下的采样算法进行了推导 [3]，得到统计区间与采样点数的近似解，但是该算

法过程复杂且计算量较大。David de la Vega 在 2009 年提出通用 Lee 氏采样算法 [4]，在不需要知道多径衰落具体分布的条件下，利用实测采样信号进行估计，得到实际网络环境所需要的统计区间与采样点数。由于高速铁路无线环境的复杂性及其对安全性的特殊要求，以上的本地均值估计算法难以在较低的测试开销条件下实现可靠的测试精度，不符合高铁环境实时测试的要求，因此无法直接应用于 GSM-R 网络中。

2.1.2 存在问题

- **高速移动特性：**GSM-R 网络处于高速运行状态，相同情况下需要对接收信号强度进行更为频繁的采样，对于 900MHz 的通信频率，Lee 氏采样算法的采样间隔为 36cm，工程应用时一般选择 4cm，在 300km/h 的运行速度下需要采样时间间隔达到 432/48ms，而如此高的采样频率应用到在线测试时会严重影响到网络的正常通信。因此需要利用信道状态的时空相关性降低测试开销，同时满足高速移动条件下的测试精度。
- **无线传播环境：**GSM-R 网络一般存在直射路径，因此应当采用莱斯信道对 GSM-R 网络的无线传播环境进行刻画。现有工作主要针对瑞利衰落信道，直接应用与 GSM-R 网络中时无法获得应有的测试精度。同时瑞利衰落情况下给出的采样参数为固定值，不能适应高速铁路复杂的无线传播环境。因此需要对莱斯衰落信道下的信道状态采样与估计进行分析，以适应高速铁路的无线传播环境。

2.2 无线传播模型

由于高速铁路沿线地形复杂多变，一条线路通常会经过山地、平原、隧道和高架等地形，如图 2-4 所示，从而造成 GSM-R 网络无线传播环境的复杂性。同时图 2-4 中可以看出，高速铁路无线传播环境大多较为平坦，同时为了尽量保证 GSM-R 网络的可靠性，基站位置通常距离高铁线路很近，而且小区半径一般设置为 3-6km，从而造成移动终端与基站之间一般存在直射 LOS 路径，因此 GSM-R 网络的无线传播应该刻画为莱斯衰落。

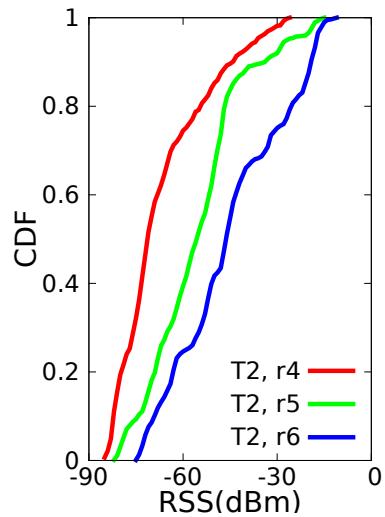


图 2-3 移动无线网络位置差异性

Fig 2-3 Location differences of RSS in mobile wireless networks



(a) 高架



(b) 隧道



(c) 山区



(d) 平原

图 2-4 GSM-R 网络无线传播环境

Fig 2-4 Radio Propagation Environments and terrains of GSM-R Networks

在 GSM-R 网络空中接口的无线通信中，接收信号强度可以视为阴影衰落与多径衰落的叠加，如式 (2-1) 所示，

$$p_r^2(x) = s(x)h(x) \quad (2-1)$$

其中 $s(x)$ 为阴影衰落，服从高斯过程； $h(x)$ 为多径衰落，服从复高斯过程； x 可以视为移动台与基站之间距离，利用列车运行速度公式可以转化为时间变量。如图 2-5 所示，GSM-R 网络中移动台与基站间距离 d 在 10m 左右，因此 $\Delta x = \sqrt{d^2 + v_{train}^2 \cdot \Delta t^2}$ 可以简化为 $\Delta x = v_{train} \cdot \Delta t$ 。同时式 (2-1) 可以表示为对数域形式，如式 (2-2) 所示，

$$P_r(x) = S(x) + H(x) \quad (2-2)$$

其中 $P_r(x)$ 、 $S(x)$ 、 $H(x)$ 分别为接收功率与信号衰落在对数域的表示，即 $P_r(x) := 10 \log(p_r^2(x))$ ， $S(x) := 10 \log(s(x))$ ， $H(x) := 10 \log(h(x))$ 。

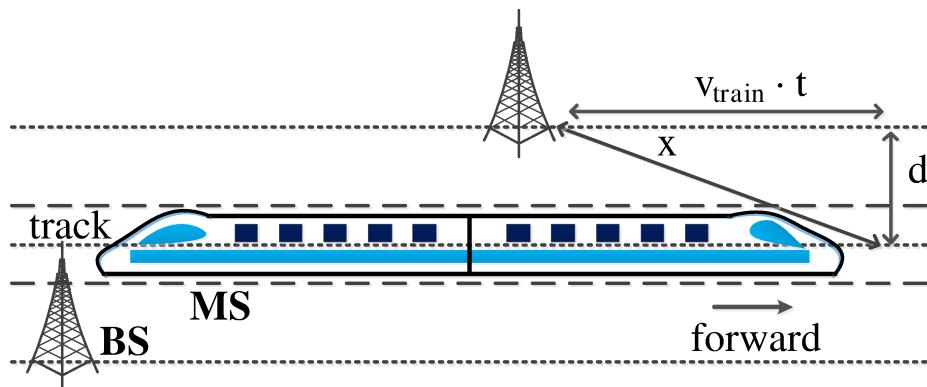


图 2-5 GSM-R 网络移动台与基站间距离

Fig 2-5 The distance between MS and BS in GSM-R networks

2.2.1 阴影衰落

阴影衰落可用如式 (2-3) 所示的高斯过程表示

$$s(x) \sim N(m(x), \sigma_s^2) \quad (2-3)$$

其中均值 $m(x)$ 主要受路径损耗影响，方差 σ_s^2 受地形因素影响。文献 [10] 综合基站发射功率、移动台接收灵敏度以及无线传播环境的影响，给出 $m(x)$ 的基

本模型并被广泛应用，表示为式 (2-4)

$$M(x) = K_1 + K_2 \log(x) \quad (2-4)$$

其中 $M(x) := 20 \log(m(x))$ 为 $m(x)$ 的对数形式， K_1 主要与基站发射功率、天线增益及线路损耗有关， K_2 为地形因子并随着无线传播环境的不同而变化 [34] [13]。 $S(x)$ 的空间相关性，即其自相关函数，主要与地形因素有关，表示为式 (2-5) [35]。

$$R_s(x) = \sigma_s^2 \exp\left(-\frac{\Delta x}{x_0}\right) \quad (2-5)$$

其中 σ_s 为 $S(x)$ 的方差，通常在 4 到 12dB 间取值； x_0 为相关距离，根据传播环境的不同一般为 10m 到 500m [36]； Δx 为相对距离，可以通过移动台运行速度即采样时间间隔获得，即 $\Delta x = v_{train} \cdot \Delta t$ 。在阴影衰落模型中，地形因子 K_2 、阴影衰落方差 σ_s 及自相关距离 x_0 都与无线传播环境有关，同时影响到上层应用的参数设置，例如小区切换算法中的切换门限值的选择。

2.2.2 多径衰落

多径衰落是由于信号的衍射和散射而导致的接收信号强度的瞬时波动，所以移动终端的接收信号强度是来自不同方向信号的叠加。由于信号的相位是随机的，因此可以描述为本地均值与噪声信号的总和。由于 GSM-R 网络的小区半径通常较短，同时无线传播环境一般是平坦的地形，因此多路径衰落包含一个可视 LOS 信号，此时多径衰落可以刻画为莱斯衰落，表示为可视 LOS 信号与非直射 NLOS 信号的叠加，如式 (2-6) 所示，

$$h(x) = \underbrace{\frac{1}{\sqrt{1+K}} \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M a_m e^{j(\frac{2\pi}{\lambda} \cos(\theta_m x) + \phi_m)}}_{\text{NLOS Components}} + \underbrace{\sqrt{\frac{K}{1+K}} e^{j(\frac{2\pi}{\lambda} \cos(\theta_0 x + \phi_0))}}_{\text{LOS Component}} \quad (2-6)$$

其中 M 散射信号数量， λ 为信号波长， $\theta_m (m = 0, 1, \dots, M)$ 代表不同信号与接收移动终端间夹角， $\phi_m (m = 0, 1, \dots, M)$ 为每路信号的相位。在莱斯衰落中，直射路径与非直射路径信号强度分别表示为 ν^2 和 $2\sigma^2$ ，则 K 表示直射路径信号与其他路径信号的比值，即 $K = \nu^2 / 2\sigma^2$ ，此时接收信号幅值服从参数为 ν^2 和 σ^2 的莱斯分布，其概率分布函数 (Probability Distribution Function, PDF) 表示为

$$f(y; \sigma, \nu) = \frac{y}{\sigma^2} e^{-\frac{y^2+\nu^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{y\nu}{\sigma^2}\right) \quad (2-7)$$

其中 $I_0(\cdot)$ 零阶第一类修正贝塞尔函数。当不存在直射路径信号，即 $K = 0$ 时，莱斯衰落退化为瑞利衰落，此时接收信号幅值的概率分布函数简化为

$$h(x) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M a_m e^{j(\frac{2\pi}{\lambda} \cos(\theta_m x) + \phi_m)} \quad (2-8)$$

$$f(y; \sigma) = \frac{y}{\sigma^2} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \quad (2-9)$$

2.3 信道状态动态估计

由于 GSM-R 网络负责为高速铁路提供无线通信，因此需要在线实时测试以保证通信网络与高铁系统的安全可靠运行，本文提出接收信号强度在线动态测试算法，以提高信道状态测试的精度并降低其开销。

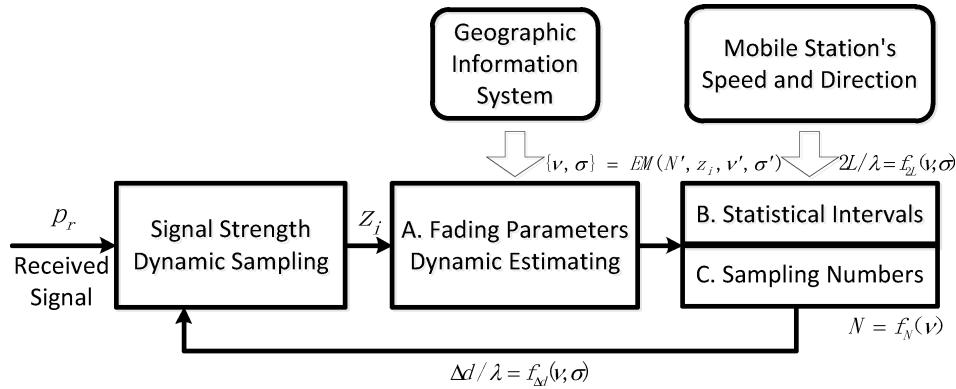


图 2-6 在线动态测试框架

Fig 2-6 On-line and Dynamic Estimation of Rician Fading Channels

动态测试算法的工作过程如图 2-6 所示，首先对信号进行动态采样，得到一组当前时刻的信号强度值，然后经过衰落参数动态估计，得到当前无线传播环境的莱斯衰落参数，然后经过计算得到统计区间与采样点数，同时以此为基础开始下一次信号采样。

2.3.1 信道参数估计

对于莱斯衰落信道的参数估计已有大量相关工作，包括基于学习训练机制 [14]、最大似然估计 [15] 以及期望最大化算法 [16]。由于 EM 算法通过迭代方

式进行参数估计，本文采用 EM 算法进行莱斯参数估计，以充分利用历史信息提高测试精度并降低测试开销。EM 算法中莱斯衰落因子 ν^2 和 σ^2 通过其上一时刻估计值与当前采样信号计算获得，如式 (2-10) 所示

$$\nu_{k+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_1\left(\frac{\nu_k z_i}{\sigma_k^2}\right)}{I_0\left(\frac{\nu_k z_i}{\sigma_k^2}\right)} z_i \quad (2-10a)$$

$$\sigma_{k+1}^2 = \max \left[\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N z_i^2 - \frac{\nu_k^2}{2}, 0 \right] \quad (2-10b)$$

其中 $I_1(\cdot)$ 一阶第一类修正贝塞尔函数， N 为采样信号数码， ν_k 和 σ_k 为上一时刻估计结果，其初始值为

$$\nu_0 = \left(2 \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2 \right)^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^4 \right)^{1/4} \quad (2-11a)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2 - \nu_0 \right) \quad (2-11b)$$

基于以上的莱斯衰落参数估计，接收信号强度测试的采样频率可以计算得到，表示为信号波长 λ 与衰落参数 ν 和 σ 的函数。采样频率 Δd 通过统计区间长度 $2L$ 与采样点数目 N 的比值计算而来。

2.3.2 统计区间长度

对于第 2.2 节的无线传播模型，接收信号强度的本地均值通过对采样信号 $p_r(x)$ 在统计区间 $2L$ 内进行积分平均获得，即

$$\hat{s} = \frac{1}{2L} \int_{y-L}^{y+L} p_r^2(x) dx = \frac{s}{2L} \int_{y-L}^{y+L} h(x) dx \quad (2-12)$$

如果能够选取合适的统计区间长度 $2L$ ，则估计值 \hat{s} 将逼近其实际值 s ，即 $\hat{s} \rightarrow s$ ，此时小尺度衰落的均值表示为

$$\frac{1}{2L} \int_{y-L}^{y+L} h(x) dx \rightarrow 1 \quad (2-13)$$

由式 (2-12) 可知, 估计值 \hat{s} 相对于真实值 s 的误差可以由 \hat{s} 的方差衡量, 如式 (2-14) 所示

$$\sigma_{\hat{s}}^2 = \frac{1}{L} \int_0^{2L} \left(1 - \frac{\tau}{2L}\right) R_{p_r^2}(\tau) d\tau \quad (2-14)$$

其中 $R_{p_r^2}(\tau) = E[p_r^2(x)p_r^2(x + \tau)] - E[p_r^2(x)]E[p_r^2(x + \tau)]$ 为包络信号 $p_r(x)$ 的自相关函数。则估计值 \hat{s} 的均一化误差可以表示为

$$P_e := 10 \log_{10} \left(\frac{\hat{s} + \sigma_{\hat{s}}}{\hat{s} - \sigma_{\hat{s}}} \right) \quad (2-15)$$

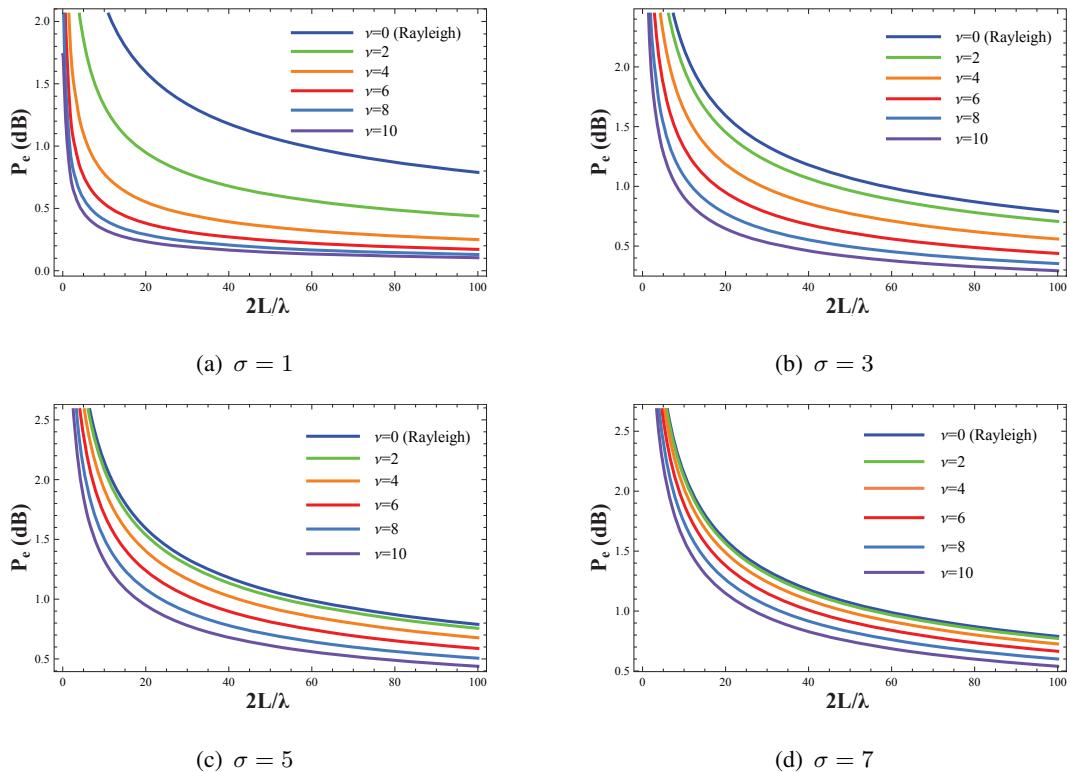


图 2-7 统计区间长度

Fig 2-7 Proper Length of Statistical Intervals

将式 (2-12) 和式 (2-14) 带入式 (2-15) 中, 并按照附录A.1求解积分方

程，归一化误差 P_e 可以表示为

$$P_e = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{2\sigma^2 + \nu^2}{2\sigma^2} n + \sqrt{2(1+n) \int_0^n g\left(\frac{\nu^2}{2\sigma^2}; \rho\right) d\rho}}{\frac{2\sigma^2 + \nu^2}{2\sigma^2} n - \sqrt{2(1+n) \int_0^n g\left(\frac{\nu^2}{2\sigma^2}; \rho\right) d\rho}} \right) \quad (2-16)$$

其中 ν 和 σ 为莱斯衰落信道参数。令归一化误差等于 1，即 $P_e = 1dB$ ，则可以得到合适的统计区间长度 $2L$ 与信号波长 λ 及衰落参数 ν^2 和 σ^2 的关系式，即 $2L = f_{2L}(\lambda; \nu, \sigma)$ 或 $2L/\lambda = f_{2L/\lambda}(\nu, \sigma)$ ，如图 2-7 所示。

2.3.3 采样点数

除了选择合适的统计区间长度外，还需要确定采样点数目，以有效降低多径衰落对信号估计的影响。采样得到的接收信号功率可以通过衰落参数计算得到，结合式 (2-10) 有 $r^2 = 2\sigma^2 + \nu^2 \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2$ ，则 r^2 的估计值及其方差为

$$\bar{r}^2 = E[r^2] = \frac{1}{N} E \left[\sum_{i=1}^N z_i^2 \right] \quad (2-17a)$$

$$\sigma_{\bar{r}^2} = D[r^2] = \frac{1}{N^2} D \left[\sum_{i=1}^N z_i^2 \right] \quad (2-17b)$$

与统计区间长度的归一化误差类似，采样点数目的归一化误差为

$$Q_e = 10 \log_{10} \left(\frac{\bar{r}^2 + \sigma_{\bar{r}^2}}{\bar{r}^2} \right) \quad (2-18)$$

根据附录 A.2 中的计算与推导， Q_e 可以表示为

$$Q_e = 10 \log_{10} \left(\frac{2N + \nu^2 + 2\sqrt{N + \nu^2}}{2N + \nu^2} \right) \quad (2-19)$$

其中 ν 和 σ 为莱斯衰落参数，通过如式 (2-10) 中 EM 算法计算得到。显然采样点数目只与莱斯衰落参数 ν 有关，即 $N = f_N(\nu)$ ，如图 2-8 所示。

接收信号强度采样频率 Δd 由 $2L/N$ 计算获得，即 $\Delta d = f_{2L}(\lambda; \nu, \sigma)/f_N(\nu) = f_{\Delta d}(\lambda; \nu, \sigma)$ 。由于信号波长 λ 在通信过程中一般保持不变，因此 Δd 与莱斯衰落参数 ν 和 σ 密切相关。

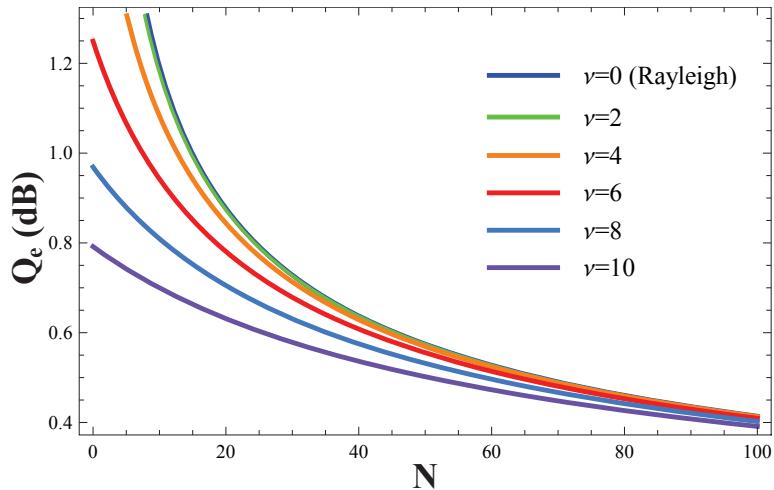


图 2-8 采样点数
Fig 2-8 Required Number of Averaging Samples

2.4 系统实现

GSM-R 网络通信质量测试系统主要完成物理指标的实时测量，同时对网络链路质量进行统计与分析，包括实时测试与离线分析。GSM-R 网络空中接口测试系统实现对 GSM-R 网络通信质量的在线实时与离线综合测试，如图 2-9 所示。在线测试实现对 GSM-R 网络通信质量的实时监测，同时在网络出现故障时给出预警信息；离线测试对 GSM-R 网络性能进行统计与分析，给出网络的综合性能评估，并提出参数调整建议。同时测试指标包含网络物理层、链路层与业务层各项指标，实现对 GSM-R 网络通信质量的全面测试，保证高铁系统的安全稳定高速运行。

本章首先引入 GSM-R 网络空中接口测试系统的基本结构，包括硬件平台与软件开发，然后分析动态测试算法的设计与实现，最后对系统的基本功能进行简单介绍。

2.4.1 硬件平台

GSM-R 网络测试系统由无线收发模块、通信协议处理模块、数据分析处理模块构成，如图 2-10 所示，其中无线收发模块完成 GSM-R 网络通信信号采集，通信协议处理模块主要对采集到的网络信令进行解析，数据分析处理模块负责对网络各项性能指标进行统计与分析。

测试系统中心处理器模块为美国 RTD 公司的 CME137686LX-W cpuModulesTM，通信协议处理模块与射频收发模块选择德国 Triorail 公司的 GSM-R 网络收发模块 TRM:3a，外加 RTD 公司的 GSM-R 网络收发模块外围开发板 COM16155RER-1，上述模块通过 PC/104 与 RTD 的电源模块 VPWR104HR-L50W 相连接，从而实现 GSM-R 网络信息收发功能。

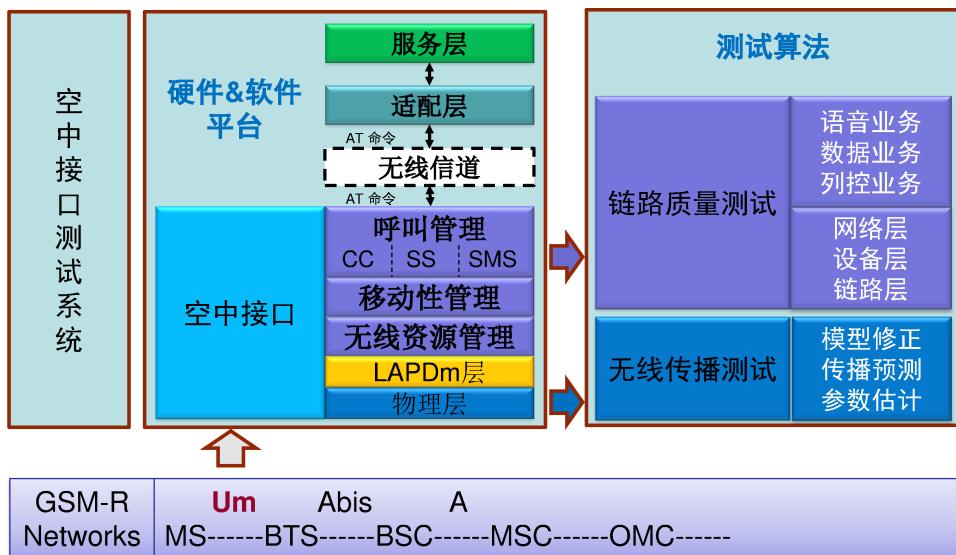


图 2-9 GSM-R 网络空中接口测试系统

Fig 2-9 Um interface monitoring system for GSM-R networks

GSM-R 网络空中接口测试系统的硬件平台由 PC/104 总线实现模块间通信，主要由以下三部分组成：

- **处理器模块** 处理器模块采用 RTD 公司符合军工标准的 CME137686LX-W 模块，该模块采用 500MHz AMDTM Geode LX 处理器，具有 128kB L1 缓存和 128kB L2 缓存，采用 333MHz DDR-SDRAM 控制器支持最高 2.7GBytes/s 的存储带宽，包括 4 个 USB 2.0 接口，2 个 SATA II 接口，3 个串口、千兆以太网口、8GB 板贴固态硬盘和 8 个 GPIO，在有效完成数据处理的同时，满足高速铁路复杂的无线传播环境。
- **无线通信模块** COM16155ER 模块板载 Cinterion 4 频段 GSM/GPRS 模块 MC55i 和 Fastrax IT500 高精度 GPS 模块，在实际测试过程中，将 GSM 模块替换为德国 Triorail 公司的 GSM-R 收发模块 TRM:3a。COM16155ER

板载两个 ISA 总线接口的 UART，分别连接到 GSM-R 模块和 GPS 模块，主机模块通过 UART 和相关接口对 GSM-R 模块和 GPS 模块进行操作。

- **电源模块** 电源模块采用 RTD 的电源模块 VPWR104HR-L50W，输入电压 20-28VDC，输出电压 -12V 到 +19V，工作温度 -40 到 +85C°，能够满足高速铁路的特殊环境要求。

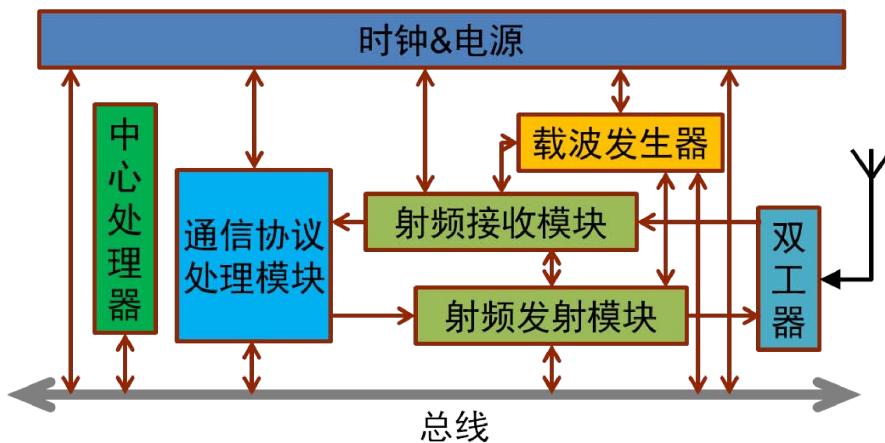


图 2-10 GSM-R 网络空中接口测试系统硬件组成

Fig 2-10 Hardware components of Um interface monitoring system for GSM-R networks

上述各模块符合工业级标准，性能稳定并能够工作在各种恶劣环境，同时 PC/104 作为工业级总线能够保证系统的实时性与可靠性。

2.4.2 软件开发

GSM-R 网络空中接口测试软件平台的开发基于 Visual Studio 2008 开发环境，开发语言为 C#，软件运行平台为 Windows XP、Windows Mobile 或 Windows CE 操作系统，运行环境 Microsoft .NET Compact Framework 2.0 或者以上版本，测试系统的启动和运行界面如图 2-11 和图 2-12 所示。

该软件平台通过 AT 命令实现与 GSM-R 通信模块间的数据交换，主要实现以下信息的测试与分析：

1. 无线信号强度 (RxLev)：接收到信号电平强度的统计参数，作为功率控制和切换过程的依据，以 dBm 为单位，接收信号电平被映射到 0~63 之间的某个 RxLev 值，如表 2-1 所示。



图 2-11 GSM-R 网络空中接口测试系统启动界面

Fig 2-11 Software starting of Um interface monitoring system for GSM-R networks

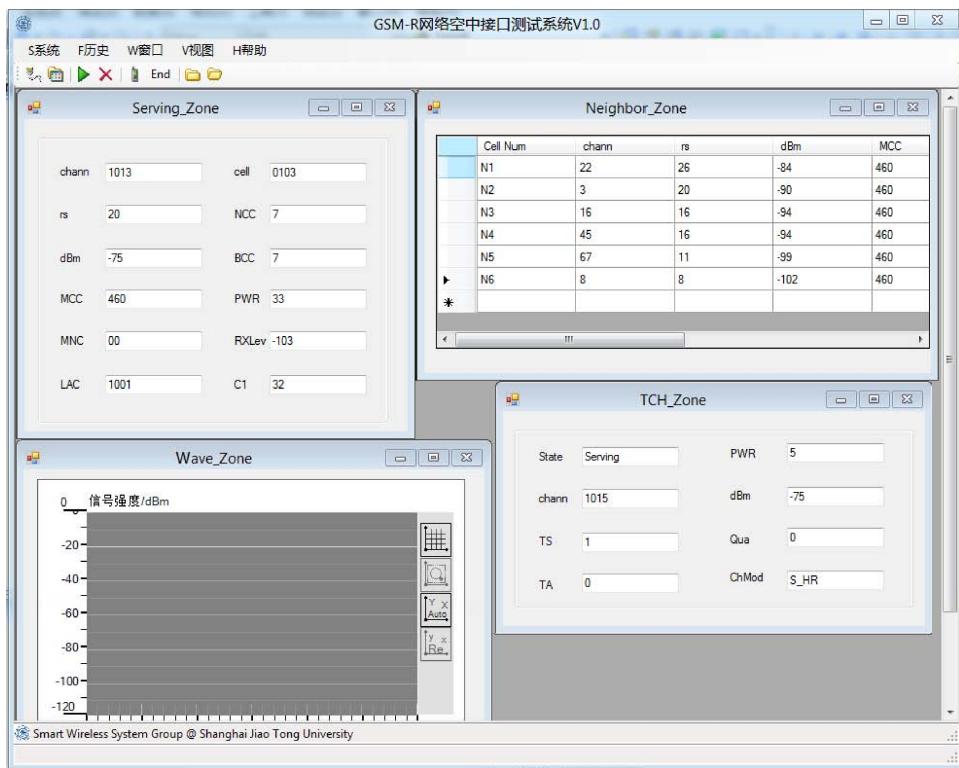


图 2-12 GSM-R 网络空中接口测试系统软件界面

Fig 2-12 Software interface of Um interface monitoring system for GSM-R networks

表 2-1 RxLev 映射关系

Table 2-1 Mapping relation of RxLev

0	$RX < -110 \text{ dBm}$
1	$-110 \leq RX < -109 \text{ dBm}$
2	$-109 \leq RX < -108 \text{ dBm}$
3	$-108 \leq RX < -107 \text{ dBm}$
—	—
62	$-49 \leq RX < -48 \text{ dBm}$
63	$RX > -48 \text{ dBm}$
≤ 17	信号强度不满足室外覆盖要求
≤ 27	信号强度不满足室内覆盖要求

2. 绝对无线频率信道数 (ARFCN): 跳频序列的载频号，描述测量数据中的无线载波的变化，阐述了空中接口上下行无线链路。
3. 接收信号强度指示 (RSSI): 接收信号强度水平，在这里表示的是在广播控制信道上的接收信号强度水平。
4. 接收信号强度 (dBm): 接收信号强度，以 dBm 为单位，分为广播控制信道和业务信道两种情况。
5. 小区重选系数 (C1&C2): C1 是小区选择时的判断标注，C2 是可选参数，仅用于小区重选，若 C2 未被广播，则使用 C1 做重选参数。
6. 时间提前量 (TA): 补偿电波传输延迟，以提高信道编解码效率。由基站根据测量报告确定，然后发送给手机，当移动台接近基站时减小时间提前量；而当移动台远离小区中心时加大时间提前量。
7. 信道类型 (ChMod): 业务信道的传输模式。业务信道承载话音或用户数据，全速率业务信道载有总速率为 22.8kbit/s 的信息。
8. 功率等级 (PWR): 分为接入信道最大功率和当前业务信道的功率。
9. 基站识别码 (BSIC): 由基站色码和网络色码组成，用于采用相同载频号码且位置相邻的不同基站的识别。其中网络色码识别相邻国家不同网络，基站色码识别相同载频的相邻基站。

10. 小区编号 (Cell ID) 与信道编号 (chann): 小区编号是区分与同一个基站控制器相连的不同基站收发台, 信道编号为广播控制信道载频号。

2.4.3 算法实现

GSM-R 网络接收信号强度在线测试的伪代码如算法 1 所示, 主要基于第 2.3 章的推导与计算。首先通过 EM 算法进行莱斯衰落参数估计, 实现莱斯衰落因子 ν_0 和 σ_0 的初始化, 此时的信号采样参数采用瑞利衰落时的参数设置, 即统计区间 $2L = 40\lambda$, 采样点数 $N = 36$ 。然后在每一轮采样周期基于上一轮估计结果和当前采样信息, 对衰落因子 ν_k 和 σ_k 进行实时更新, 同时确定下一轮采样参数 $2L$ 和 N 。最后通过统计区间长度和采样点数计算得到采样间隔 $\Delta d = 2L/N$, 并开始新一轮的信号采样与参数估计。

GSM-R 网络信道动态测试为上层应用提供准确的网络状态信息, 如图 2-13 所示, 测试系统首先通过 GSM-R 收发模块, 获得接收信号强度的原始信息; 然后由动态采样算法进行数据处理与参数估计, 并提供当前网络状态信息, 包括物理层信道状态与链路质量信息; 同时系统根据历史信息对网络状态进行预测, 在信号强度持续下降时给出预警信息; 最后动态测试算法将所有原始数据及网络状态信息提供给软件界面及数据库, 用于显示当前网络状态信息, 或进行网络性能的分析与评估, 包括切换性能分析与网络优化。

2.4.4 基本功能

GSM-R 网络空中接口测试系统的基本功能如图 2-14 所示, 主要完成网络通信质量的测试、处理、预测、显示与预警。

测试系统在硬件配置完成后, 测试软件首先对 GSM-R 网络空中接口传输的信息进行解析, 得到网络当前时刻与位置的通信质量信息, 并根据 GSM-R 网络当前小区信息得到网络当前广播控制信道、语音业务信道和数据域业务信道质量信息, 并给出小区切换和信道切换的分布图, 同时绘制当前服务小区广播控制信道的接收信号强度和邻居小区广播控制信道接收信号质量的曲线轨迹, 利用当前测试数据与历史数据, 结合预测模型对网络的无线传播进行预测, 在当前网络通信质量低于系统要求时给出警告信息, 结合地理信息和基站信息, 给出测试报告并对 GSM-R 网络性能进行整体评估。

算法 1 莱斯衰落信道在线采样与估计

输入： $v_{train}, r_i, \nu_k, \sigma_k$ 输出： $\nu_{k+1}, \sigma_{k+1}, 2L, N, \Delta d$

```

1: // 1. 衰落参数  $\nu$  和  $\sigma$  初始化
2: if begin-flag==true then
3:    $\Delta d \leftarrow \text{Lee}(2L_0, N_0; \lambda);$ 
4:    $\{\nu_{last}, \sigma_{last}\} \leftarrow \text{EM}(\Delta d, N_0; r_i);$  // 式 (2-11)
5:    $\{\nu_{now}, \sigma_{now}\} \leftarrow \text{EM}(\Delta d, N_0; r_i; \nu_{last}, \sigma_{last});$  // 式 (2-10)
6:   while ( $\nu_{now} - \nu_{last} > \nu_{thr}$ ) & ( $\sigma_{now} - \sigma_{last} > \sigma_{thr}$ ) do
7:      $\{\nu_{next}, \sigma_{next}\} \leftarrow \text{EM}(\Delta d, N_0; r_i; \nu_{now}, \sigma_{now});$  // 式 (2-10)
8:      $\{\nu_{last}, \sigma_{last}\} \leftarrow \{\nu_{now}, \sigma_{now}\};$ 
9:      $\{\nu_{now}, \sigma_{now}\} \leftarrow \{\nu_{next}, \sigma_{next}\};$ 
10:   end while
11:    $2L_{now} \leftarrow f_{2L}(\lambda; \nu_{now}, \sigma_{now});$  // 式 (2-16)
12:    $N_{now} \leftarrow f_N(\nu_{now});$  // 式 (2-19)
13: end if
14: // 2.  $\nu$  和  $\sigma$  实时估计, 计算采样参数  $2L$ 、 $N$  和  $\Delta d$ .
15: if operating-flag==true then
16:   for  $i = 0; i < N_{now}; i++$  do
17:      $\{\nu_{next}, \sigma_{next}\} \leftarrow \text{EM}(\Delta d, N_0; r_i; \nu_{now}, \sigma_{now});$  // 式 (2-10)
18:      $2L_{next} \leftarrow f_{2L}(\lambda; \nu_{now}, \sigma_{now});$  // 式 (2-16)
19:      $N_{next} \leftarrow f_N(\nu_{now});$  // 式 (2-19)
20:      $\Delta d_{next} = f_{2L}(\lambda; \nu_{now}, \sigma_{now}) / f_N(\nu_{now});$ 
21:      $\{\nu_{last}, \sigma_{last}; 2L_{last}, N_{last}\} \leftarrow \{\nu_{now}, \sigma_{now}; 2L_{now}, N_{now}\};$ 
22:      $\{\nu_{now}, \sigma_{now}; 2L_{now}, N_{now}\} \leftarrow \{\nu_{next}, \sigma_{next}; 2L_{next}, N_{next}\};$ 
23:     if  $i == N_{last}$  then
24:       i=0;
25:     end if
26:   end for
27: end if

```

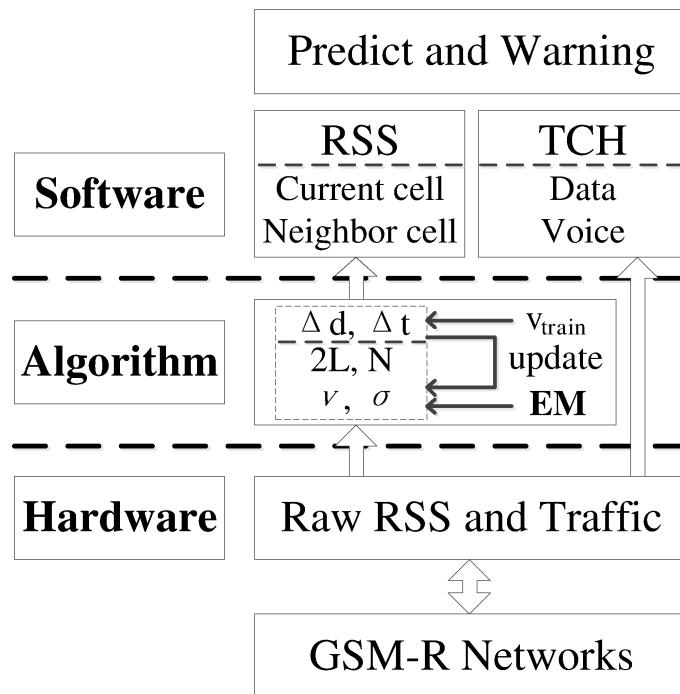


图 2-13 信道状态估计算法与实现

Fig 2-13 Estimation framework and algorithm implementation

- 当前小区信息：显示移动台当前所在小区基本信息，包括小区编号、信道编号、接收信号强度、基站识别码、功率等级和小区重选系数等信息。
- 邻居小区信息：显示接收信号强度最好的三个到六个邻居小区的信息，包括信道编号、接收信号强度、基站识别码和小区重选系数等。
- 业务信道信息：显示当前业务信道基本信息，包括信道编号、时隙分配、时间提前量、功率大小、接收信号强度、接收信号质量和信道模式等。
- 曲线绘制：实时记录当前小区及邻居小区的接收信号强度信息，并能够调取历史数据和数据库中的数据，进行场景重现。
- 历史数据：导入或导出历史数据，实现对任意时刻的通信情况进行分析，为 GSM-R 网络的优化提供数据支持。

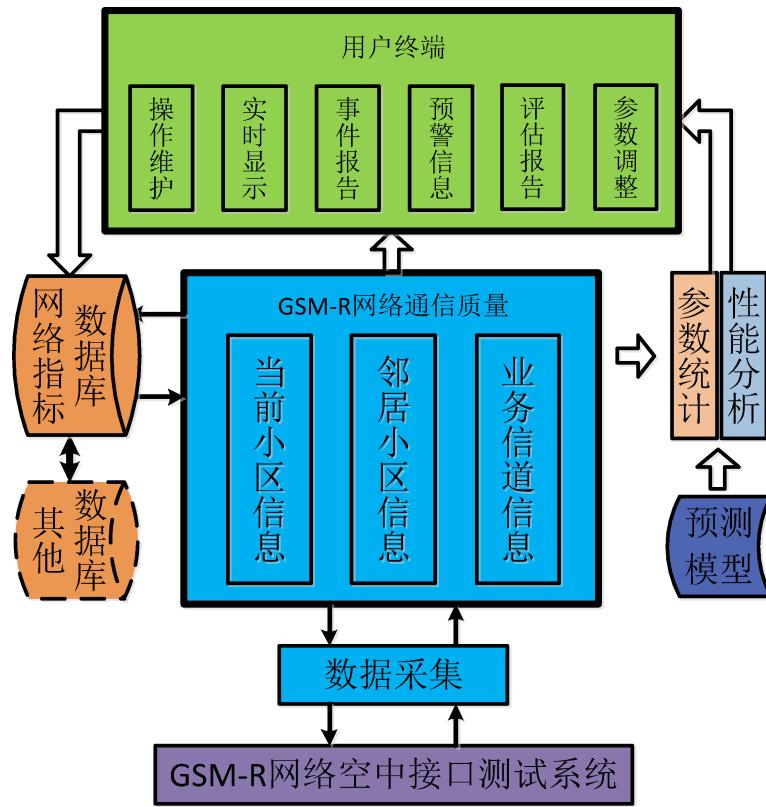


图 2-14 GSM-R 网络空中接口测试系统软件结构

Fig 2-14 Software architecture of Um interface monitoring system for GSM-R networks

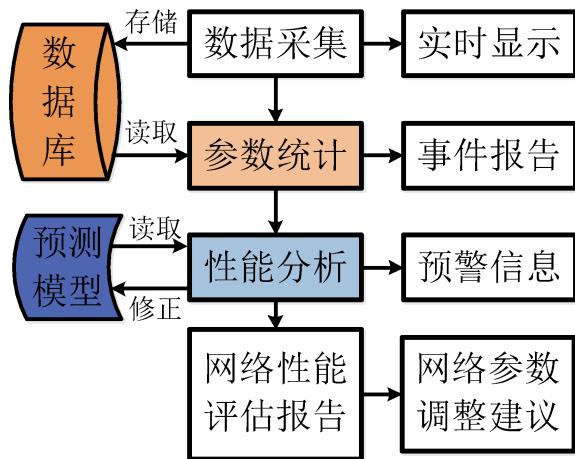


图 2-15 GSM-R 网络空中接口测试系统数据处理

Fig 2-15 Data processing of Um interface monitoring system for GSM-R networks

2.5 性能评估

本节主要介绍动态测试算法的实验分析与性能评估，通过 GSM-R 网络空中接口测试系统，由高速列车上的移动终端在京沪高速铁路沿线进行接收信号强度信息采集，如图 2-16 所示。



图 2-16 GSM-R 网络空中接口测试系统

Fig 2-16 Um Interface Monitoring System for GSM-R Networks

实验测试结果以 XML 格式进行存储与处理，如图 2-17 所示为京沪高铁 GSM-R 网络接收信号强度信息。动态估计算法的测试结果如表 2-2 所示，包括不同无线传播环境下的莱斯衰落参数与采样参数，其中无线传播类型由莱斯衰落参数 K 表示：当 $K = 0$ 时表示没有直射路径信号，此时莱斯衰落退化为瑞利衰落；当 K 逐步增加表示无线传播环境逐渐平坦。

从表 2-2 中的数据可以看出，在莱斯因子 $K = 0$ 时，统计区间为 $2L = 40\lambda$ ，采样间隔为 $\Delta d = 0.5\lambda$ ；随着莱斯因子 K 的增大，无线传播环境逐渐平坦，导致直射路径功率比例增加，统计区间与采样间隔逐渐降低；当 $\nu \geq 8$ 时所需的采样点数 $N \leq 10$ ，即在不同统计区间内只需做 $N \leq 10$ 次采样，便可以保证本地均值的准确性，同时在 K 值逐渐增大过程中，统计区间相应增大，且不需要做频繁的数据采集，采样间隔在 1m 左右。

对于运行于 900MHz 的 GSM-R 网络而言，Lee 氏采样算法的采样间隔为 36cm，工程应用中采用每隔 4cm 的采样方式，在相同的测试精度的前提下，即保证归一化误差为 1dB，动态采样算法能够实现测试误差的显著降低，从而在完成通信性能测试的同时保证网络的正常通信。

<i>d</i>	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	ID	▼ chann	▼ rs	▼ dBi	▼ MCC	▼ HCC	▼ ECC	▼ C1	▼ C2	▼ chann2	▼ rs3	▼ dBi4	▼ MCC5	▼ HCC6	▼ ECC7	▼ C18	▼ C29	▼ chann10	▼ rs11	▼ dBw12
2	2011-9-25 14:35:06	2	11	-99	460	0	2	0	0	3	8	-102	460	0	2	-3	-3	23	7	-103
3	2011-9-25 14:35:07	2	9	-101	460	0	2	-2	-2	3	8	-102	460	0	2	-3	-3	23	7	-103
4	2011-9-25 14:35:08	2	9	-101	460	0	2	-2	-2	3	8	-102	460	0	2	-3	-3	23	8	-102
5	2011-9-25 14:35:09	2	8	-102	460	0	2	-3	-3	3	8	-102	460	0	2	-3	-3	23	8	-102
6	2011-9-25 14:35:10	3	9	-101	460	0	2	-2	-2	23	8	-102	460	0	0	-1	-1	2	7	-103
7	2011-9-25 14:35:11	23	9	-101	460	0	0	0	0	3	9	-101	460	0	2	-2	-2	2	6	-104
8	2011-9-25 14:35:12	23	10	-100	460	0	0	1	1	3	7	-103	460	0	2	-4	-4	2	7	-103
9	2011-9-25 14:35:30	23	10	-100	460	0	0	1	1	29	8	-102	460	0	0	-7	-7	2	8	-102
10	2011-9-25 14:35:31	23	11	-99	460	0	0	2	2	3	9	-101	460	0	2	-2	-2	29	8	-102
11	2011-9-25 14:35:32	23	11	-99	460	0	0	2	2	2	9	-101	460	0	2	-2	-2	29	8	-102
12	2011-9-25 14:35:33	23	10	-100	460	0	0	1	1	2	8	-102	460	0	2	-3	-3	548	8	-102
13	2011-9-25 14:35:34	23	10	-100	460	0	0	1	1	2	8	-102	460	0	2	-3	-3	548	8	-102
14	2011-9-25 14:35:35	2	10	-100	460	0	2	-1	-1	23	10	-100	460	0	0	1	1	29	7	-103
15	2011-9-25 14:35:43	29	8	-102	460	0	0	-7	-7	23	6	-104	460	0	0	-3	-3	548	5	-105
16	2011-9-25 14:35:44	548	7	-103	460	0	5	-4	2	29	6	-104	460	0	0	-9	-9	23	5	-105
17	2011-9-25 14:36:03	2	8	-102	460	0	2	-3	-3	23	7	-103	460	0	0	-2	-2	29	7	-103
18	2011-9-25 14:36:04	2	10	-100	460	0	2	-1	-1	23	7	-103	460	0	0	-2	-2	29	7	-103
19	2011-9-25 14:36:05	2	12	-98	460	0	2	1	1	29	8	-102	460	0	0	-7	-7	23	7	-103
20	2011-9-25 14:36:07	2	14	-96	460	0	2	3	3	23	9	-101	460	0	0	0	0	29	8	-102
21	2011-9-25 14:36:08	2	15	-95	460	0	2	4	4	23	10	-100	460	0	0	1	1	29	9	-101
22	2011-9-25 14:36:09	2	15	-95	460	0	2	4	4	29	11	-99	460	0	0	-4	-4	23	10	-100
23	2011-9-25 14:36:10	2	16	-94	460	0	2	5	5	23	12	-98	460	0	0	3	3	29	12	-98
24	2011-9-25 14:36:11	2	17	-93	460	0	2	6	6	23	13	-97	460	0	0	4	4	29	12	-98
25	2011-9-25 14:36:12	2	17	-93	460	0	2	6	6	29	15	-95	460	0	0	0	0	23	13	-97
26	2011-9-25 14:36:13	2	17	-93	460	0	2	6	6	29	15	-95	460	0	0	0	0	23	12	-98
27	2011-9-25 14:36:14	2	17	-93	460	0	2	6	6	29	15	-95	460	0	0	0	0	23	12	-98
28	2011-9-25 14:36:15	2	17	-93	460	0	2	6	6	29	15	-95	460	0	0	0	0	23	12	-98
29	2011-9-25 14:36:16	2	17	-93	460	0	2	6	6	29	15	-95	460	0	0	0	0	23	12	-98
30	2011-9-25 14:36:17	2	17	-93	460	0	2	6	6	29	16	-94	460	0	0	1	1	23	12	-98
31	2011-9-25 14:36:18	2	17	-93	460	0	2	6	6	29	16	-94	460	0	0	1	1	23	11	-99
32	2011-9-25 14:36:19	2	17	-93	460	0	2	6	6	29	16	-94	460	0	0	1	1	23	11	-99

图 2-17 信道状态测试结果

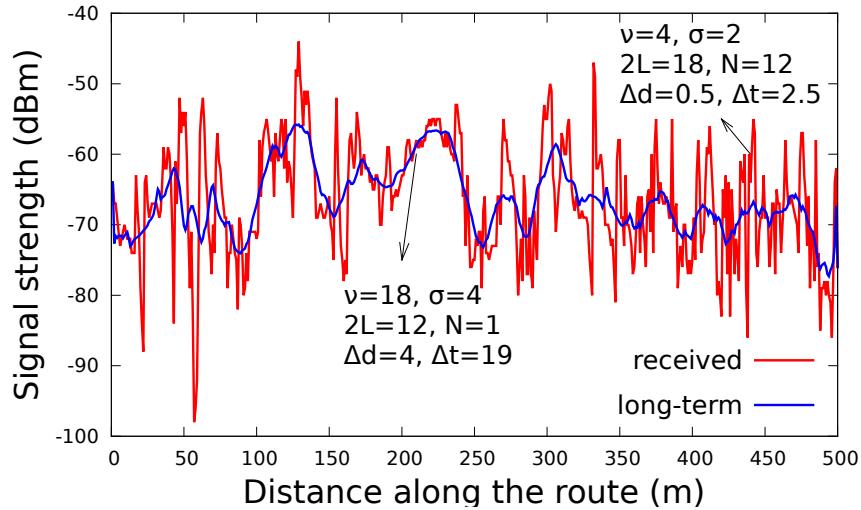
Fig 2-17 Measurement Results

表 2-2 信道状态估计结果总结

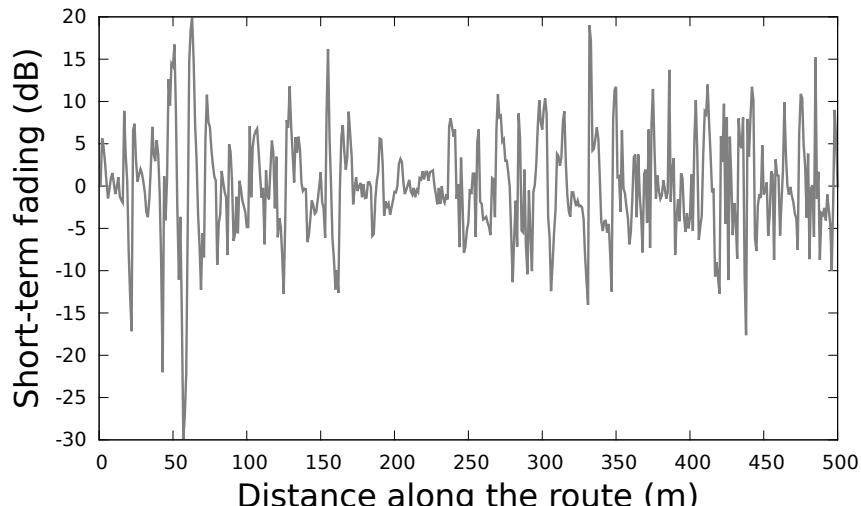
Table 2-2 Summary of Experiment Results of Channel State Estimation

Terrain	<i>K</i> (dB)	ν	σ	$2L/\lambda$	<i>N</i>	$\Delta d/\lambda$	Δd (m)	v_{train} (km/h)		
								200	250	300
								Δt (ms)		
NLOS*	0	-	-	40	36	1.1	0.367	2.20	1.76	1.47
Dense	0	0	1	55	15	3.7	1.222	7.33	5.86	4.89
	2	4	2	18	12	1.5	0.500	3.00	2.40	2.00
	4	5.6	2	9	9	1.0	0.333	2.00	1.60	1.33
	6	6	3	20	7	2.9	0.967	5.80	4.64	3.87
	8	12	3	8	1	8.0	2.667	16.00	12.80	10.67
Open	10	18	4	12	1	12.0	4.000	24.00	19.20	16.00

* 在瑞利衰落信道情况下，通过 Lee 氏采样算法的计算结果



(a) 接收信号强度与大尺度衰落



(b) 小尺度衰落

图 2-18 接收信号强度与信号衰落

Fig 2-18 Received signal strength and signal fading

通过动态测试算法获得的接收信号强度信息如图 2-18 所示，大尺度和小尺度衰落经过动态测试算法能够有效区分，从而能够进行分别分析与处理。大尺度衰落通过最大似然估计或最小均方差估计，实现无线传播预测或模型修正；小尺度衰落对于无线网络的切换算法、功率控制及频谱分配等具有重要影响，例如切换算法中切换门限的选择与设置。

2.6 本章小结

本章讨论了在莱斯衰落环境下，**GSM-R** 网络接收信号强度的动态采样算法，解决高速移动性及传播环境复杂性对信道采样的不利影响。该算法通过采样数据结合衰落参数历史值，对当前衰落参数进行估计，确定不同衰落参数条件下的统计区间与采样点数。在城区、山地、丘陵等密集区域，由于多径衰落现象加重，且直射路径功率所占比例较低，需要进行较为频繁的采样与统计，确保统计区间 $2L \leq 20m$ ，采样间隔 $\Delta d \leq 0.3m$ ；在平原、高架桥等开阔区域，移动台接收功率较大，且一般存在较大比例的直射路径功率，在同样的统计区间内只需做较少的采样，保证统计区间 $2L \leq 50m$ ，采样间隔 $\Delta d \leq 1.5m$ ，便可以满足本地均值的准确性要求。对应列车运行速度在 $300km/h$ 时，采样时间间隔为 $2.0ms$ 到 $18.0ms$ 时，才能够保证测量数据的可靠性。在实际工程应用中的**GSM-R** 网络无线覆盖测量，一般采用采样间隔 $\Delta d = 4cm$ 、统计区间 $10m \leq 2L \leq 100m$ 的方法，参照本章关于莱斯衰落信道下采样算法的推导，可以在高铁线路中的开阔区域适当提高采样间隔，从而在确保数据可靠性的同时降低测量开销；另一方面针对**GPS** 测距触发方式的测量方法，利用高速铁路列车运行速度相对固定的特点，结合列车运行速度、当前采样数据及衰落参数历史数据，采用时间触发的方式进行采样间隔与统计区间的确定。

第三章 链路质量测试与建模

本章针对移动 802.11n 网络中链路质量测试与建模，首先给出目前移动 802.11n 网络链路质量测试存在的主要问题，包括移动网络的链路质量测试以及 MIMO-OFDM 系统多配置所带来的 PDR-RSS 模型过渡窗口问题；然后针对移动网络链路质量的时空变化特性，提出动态滑动平均算法，以提高链路质量测试精度并降低测试开销；同时针对 MIMO-OFDM 系统 PDR-RSS 模型的过渡窗口问题，提出在线 PDR-RSS 建模框架，以提高 MIMO-OFDM 配置选择效率；最后给出算法设计及系统实现，并对以上算法进行性能评估。

3.1 问题描述

无线网络的一个基本问题是系统的可靠性与传输性能的合理平衡，其中信道状态和链路质量既是衡量网络性能的重要指标，又是系统决策的关键状态变量，因此信道状态和链路质量的测试与建模无线系统性能具有重要影响。

3.1.1 现有工作

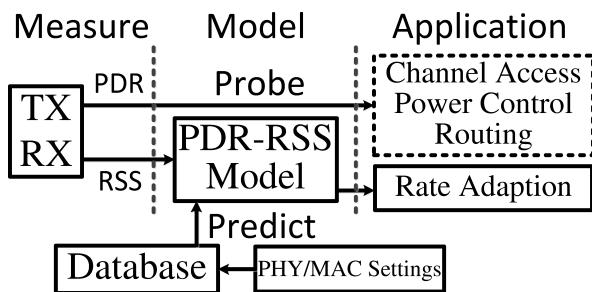


图 3-1 静态链路质量 - 信道状态模型

Fig 3-1 General static PDR-RSS modeling framework

传统无线网络的上层应用，包括速率适配、功率控制及路由策略等，都不可避免地需要底层的网络状态信息，比如物理层信道状态或链路层链路质量。图 3-1 所示为基于静态 PDR-RSS 模型的应用框架，本文中以速率控制为例进

行详细介绍。从图中可以看出，基于静态 PDR-RSS 模型的速率控制算法主要分为两类：第一类通过探测数据包对链路层链路质量进行实时测试，直接根据当前链路质量进行速率选择；第二类利用静态 PDR-RSS 模型，根据当前物理层信道信息对网络状态进行预测，并作出相应配置选择。

以上的静态 PDR-RSS 框架无法直接应用于移动 MIMO-OFDM 系统中：第一，由于移动无线网络在运行过程中外界环境与网络状态复杂多变，从而降低链路质量的测试精度；第二，由于 802.11n 系统采用了多种物理层和链路层配置，从而增加了链路质量的测试开销；第三，MIMO-OFDM 的多配置特性增加了 PDR-RSS 模型的复杂性¹。所以移动 802.11n 网络的移动性和多配置性降低了链路质量的测试与预测精度，进一步影响网络的整体性能。

3.1.2 存在问题

本节通过大量实验数据说明以上静态框架应用于移动 802.11n 网络中存在的问题，从而引入移动 MIMO-OFDM 系统中链路质量测试与建模过程中存在的关键问题。静态 PDR-RSS 框架的主要特点包括：

- 固定参数设定的 PDR 测试算法
- 静态 PDR-RSS 模型与数据库
- 单一测量与判决指标（PDR 或 RSS）输入

静态 PDR-RSS 框架的以上特点无法满足移动性带来的网络状态的时空变化，以及多配置带来的 PDR-RSS 模型的过渡窗口问题。

- **移动网络时空特性：**移动网络的时空变化特性对 PDR 的测量精度与开销具有重要影响。无线网络中广泛应用指数加权平均算法进行链路质量测试 [43] [30] [31]，一般其参数设置为固定值，比如采样周期一般设置为 50ms 或 100ms，而加权因子一般设置为 0.25 或 0.125。但是网络状态的时空变化会降低 EWMA 算法的测试精度，尤其当网络运行与较高数据传输速率时。图 3-2 所示的实验结果说明了网络状态变化对 PDR 测试的影响，当被测 PDR 发生瞬时变化时，采样周期固定为 50ms 或 100ms 的

¹多种配置需要分别进行建模，同时 MIMO-OFDM 系统的 PDR-RSS 模型具有过渡窗口效应

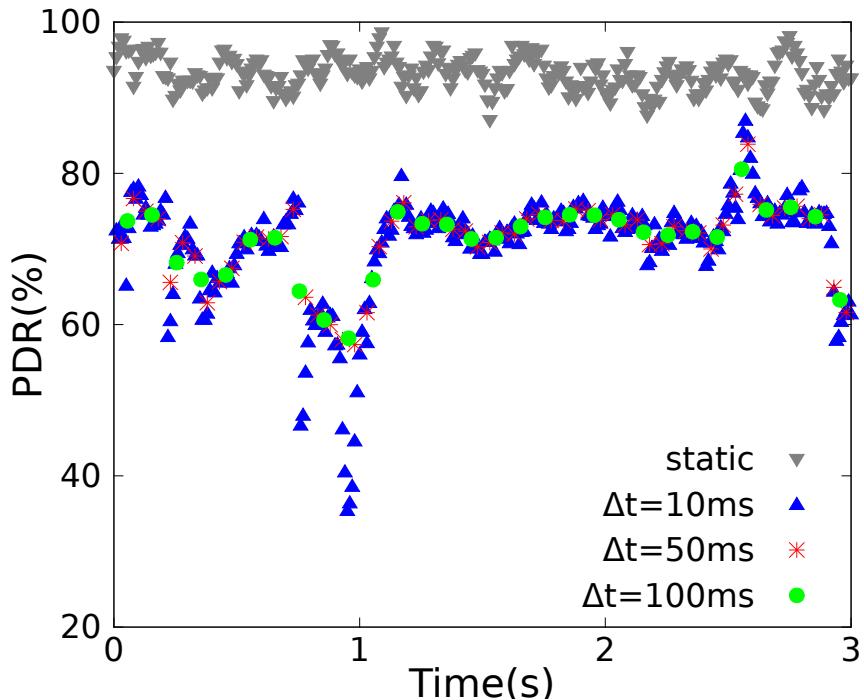


图 3-2 链路质量测试误差

Fig 3-2 PDR overestimation as sudden decline

EWMA 算法无法获得准确的 PDR 信息，甚至出现 20% 的测试误差。因此有必要对 PDR 测试算法进行改进，以提高移动网络中链路质量测试精度。现有的针对移动网络链路质量测试方法的工作主要针对 RSS 的测试 [20] [21]。

- **MIMO-OFDM 系统过渡窗口：** MIMO-OFDM 系统的多种配置增加了链路质量测试与预测的复杂度。由于 802.11n 网络采用了多种物理层和链路层技术，同时网络运行时需要在多种配置间进行切换，从而增加了链路质量测试的复杂度，MIMO-OFDM 系统中 PDR-RSS 模型的过渡窗口进一步增加了 802.11n 网络中 PDR-RSS 建模的复杂度 [24]。如图 3-3 所示，802.11n 网络的 PDR-RSS 模型存在 3-15dB 的过渡窗口长度，对于静态建模框架约有 34% 的被选配置落入过渡窗口，甚至有 8% 的配置位于过渡窗口左侧²。因此有必要针对 MIMO-OFDM 系统的多配置特性，设计有效的 PDR-RSS 建模方法与配置选择策略。

² 落入过渡窗口表示 $PDR < P_{thr} = 90\%$ ，位于过渡窗口左侧表示 $PDR < P_{thr} = 10\%$

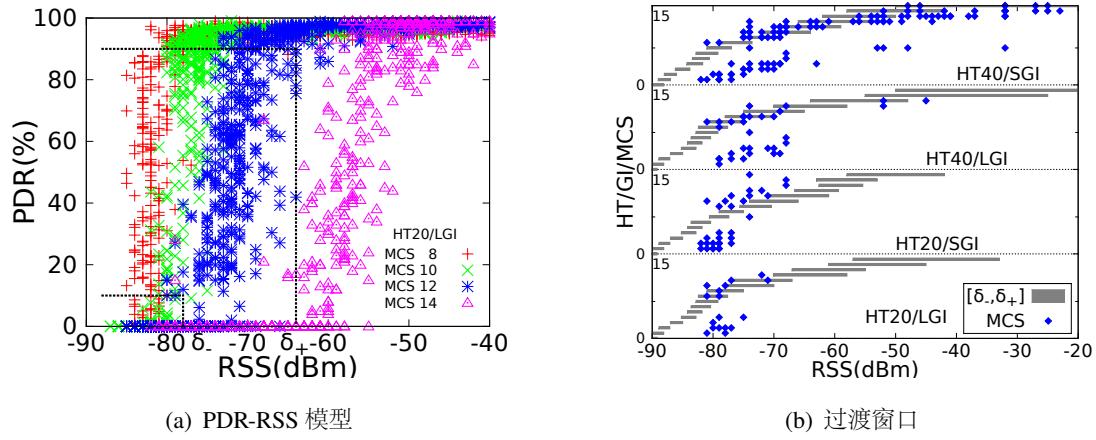


图 3-3 PDR-RSS 模型过渡窗口

Fig 3-3 Transition windows of PDR-RSS model as high data rates

802.11n 网络的物理层和链路层配置一方面显著提升网络性能，但是同时使得链路质量测试与建模更为复杂。移动终端造成网络状态的时空变化特性，从而对链路质量测试的精度与开销提出更高要求。本文提出在线建模框架以有效解决以上问题，其内容主要包括：(1) 动态链路质量测试算法；(2) 在线 PDR-RSS 建模与实时更新机制；(3) 高效准确的多配置选择策略。

3.2 链路质量动态测试

3.2.1 信号传输模型

为了对不同的链路质量测试方法进行刻画，并对不同测试方法进行分析，首先引入数据包传输模型。发送数据包的接收状态可以认为是离散随机过程 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ ，而每一个数据包的接收状态为 0 或 1，即 $x_i = \{0, 1\}$ ， $i(i = 1, 2, 3\dots)$ ，其中 $x_i = 1$ 表示第 i 个数据包成功接收。第 i 个数据包成功接收的概率 $\mathbf{P}(x_i = 1) = p_i$ 可以由标准的信噪比模型来刻画，如下式所示：

$$p_i = \mathbf{P}(SINR_i(t) > \delta) = \mathbf{P}\left(\frac{R_i(t)}{I_i(t) + n} > \delta\right) \quad (3-1)$$

其中 $SINR_i(t)$ 为第 i 个接收数据包在 t 时刻的信噪比， δ 为信噪比门限值， $R_i(t)$ 为接收数据包在时刻 t 的接收信号强度， $I_i(t)$ 为除传输信号外其他信号 $R_j(t)$ 造成的接收端信号干扰， n 为热噪声且一般为恒定值。同时 p_i 可以由实

测模型表示，即

$$p_i = \hat{p}(R_i(t)) \quad (3-2)$$

其中 $\hat{p}(R_i(t))$ 为基于实测数据的传输成功率，表示为接收信号强度的函数。

3.2.2 传统测试方法

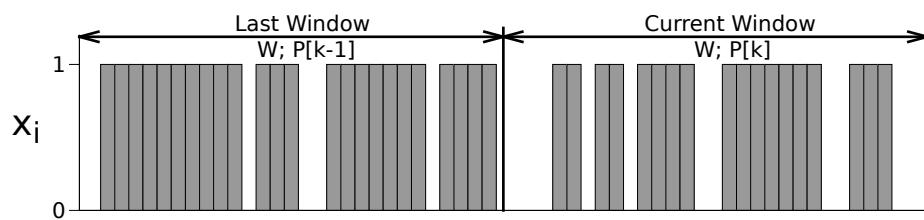


图 3-4 静态加权平均

Fig 3-4 EWMA with fixed W and α

对于静态无线网络中的传输成功率测试，在统计区间内的数据包的接收状态可以认为常数，且 x_i 为独立同分布的随机变量，即 $P(x_i = 1) = p_i = p$ ，此时 X 可以刻画为伯努利过程，即 $X \sim B(p)$ 。一般采用固定窗口长度进行平均，如图 3-4 所示，第 k 次测试的传输成功率为

$$PDR_f[k] = \frac{1}{W} \sum_{i=kW+1}^{(k+1)W} x_i \quad (3-3)$$

其中 W 为平均窗口长度。此时的测试误差可以表示为测试传输成功率与接收成功概率的差，因此测试误差的期望与方差分别为：

$$\mathbf{E}[\Delta PDR_f] = \mathbf{E}\left[\frac{1}{W} \sum_{i=1}^W x_i - p\right] = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W \mathbf{E}[x_i] - p = 0 \quad (3-4)$$

$$\mathbf{D}[\Delta PDR_f] = \mathbf{D}\left[\frac{1}{W} \sum_{i=1}^W x_i - p\right] = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W \mathbf{D}[x_i] = p(1-p) \quad (3-5)$$

其中 $\bar{p}[k]$ 与 $\bar{p}'[k]$ 分别为 $P[k]$ 与 $P'[k]$ 的估计值，可以由式 (3-4) 获得，即

$$\mathbf{E}[P[\cdot]] = \frac{1}{N} \sum \mathbf{E}[x_i] = \frac{1}{N} \sum p_i = \bar{p}[\cdot] \quad (3-6)$$

其中 N 为窗口长度, $\bar{p}[\cdot]$ 为该统计区间内 p_i 的算术平均值, p_n 当前时刻发送数据包的接收概率并作为传输成功率的真实值。从式 (3-6) 可以看出测试误差与 p_i 的变化情况密切相关, 而 p_i 在静态无线网络与移动无线网络中呈现不同的特性。同时平均窗口长度 W 对于测试误差具有很大影响, 例如当 p_i 在短时间尺度内出现剧烈变化时, 过大的窗口长度会丢失传输成功率的细节信息。

在实际系统中一般采用指数加权平均, 即 EWMA 算法, 例如在 Atheros's Linux 系统的无线驱动中, 包括针对 802.11a/b/g 网络的 Madwifi [44] 以及用于 802.11n 网络的 ath9k [43], 以提高测试精度并降低测试开销。在 EWMA 中测试传输成功率表示为当前测试结果与历史结果的加权平均, 即

$$PDR_w[k] = \alpha PDR_f[k-1] + (1 - \alpha) PDR_f[k] \quad (3-7)$$

其中 α 为加权因子。此时 EWMA 的测试误差为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[\Delta PDR_w] &= \mathbf{E}[\alpha PDR_f + (1 - \alpha) PDR_f - p] \\ &= \alpha \mathbf{E}[PDR_f] + (1 - \alpha) \mathbf{E}[PDR_f] - p \\ &= \alpha p + (1 - \alpha)p - p \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3-8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D}[\Delta PDR_w] &= \mathbf{D}[\alpha PDR_f + (1 - \alpha) PDR_f - p] \\ &= \alpha^2 \mathbf{D}[PDR_f] + (1 - \alpha)^2 \mathbf{D}[PDR_f] \\ &= [\alpha^2 + (1 - \alpha)^2] p(1 - p) \end{aligned} \quad (3-9)$$

从以上的分析可以看出, 在静态无线网络传输成功率测试中, 固定窗口与加权算法都可以获得无偏估计, 而加权算法在不增加测试开销的前提下具有更低的均方差, 由式 (3-9) 可以得出当 $\alpha = 0.5$ 时, 理论上可以得到最小均方差 $\mathbf{D}[PDR_w]$ 。对于如图 3-8 中给定的接收成功概率 $p \sim N(0.8, 0.01)$, 相对于固定窗口测试方法, 加权算法可以获得更准确的测试结果。如图 3-6 所示, 固定窗口算法测试结果为 80.23%, 而 $\alpha = 0.5$ 时的加权算法测试结果为 80.06%, 可以看到两者的测试误差都很小, 且固定窗口算法的均方差为 0.0268, 而加权算法在 $\alpha = 0.5$ 时的均方差为 0.0034。

但是在实际测试中, 加权因子 α 一般在 0.1 到 0.4 之间取值, 主要原因是 p_i 并不保持不变, 而在移动无线网络中这种情况更为明显, 因此当固定加权算

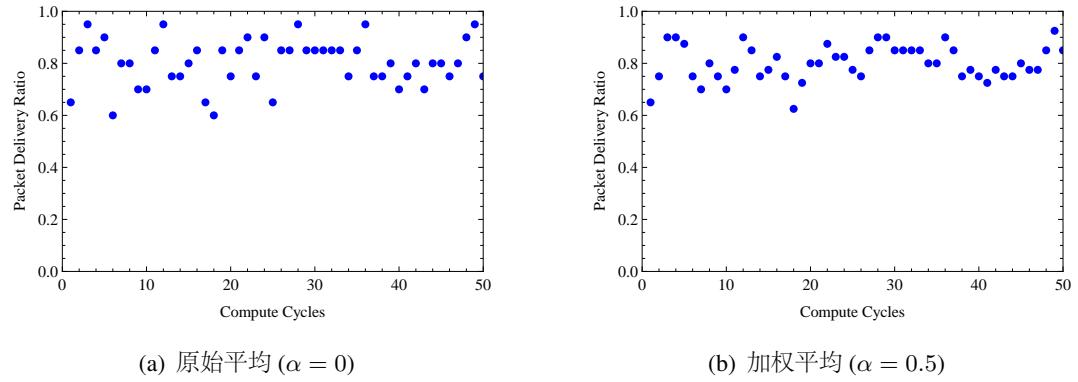


图 3-5 静态网络测试精度

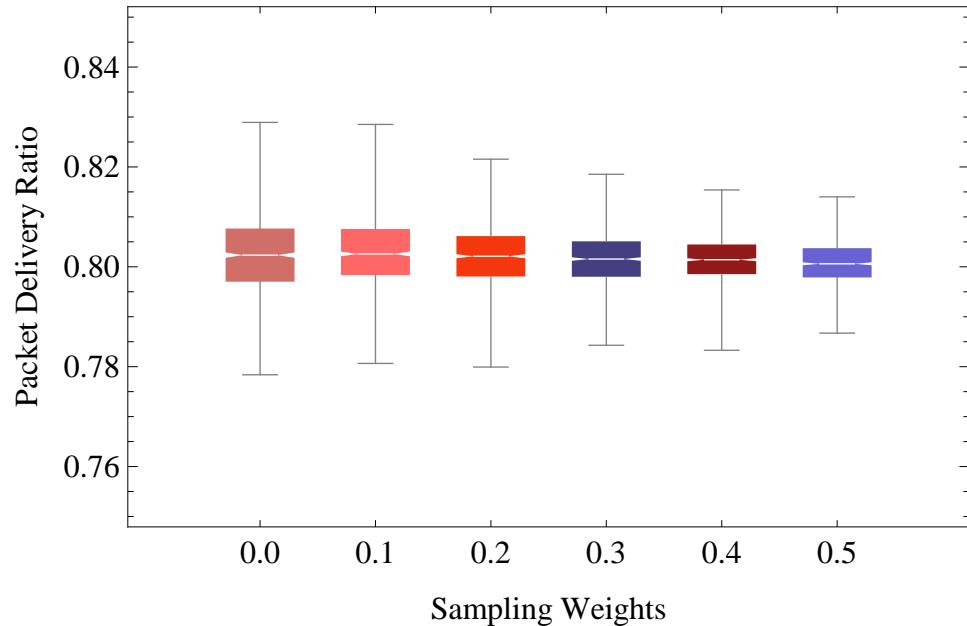
Fig 3-5 Measurement Window Length in Static Wireless Networks ($W = 20, p = 0.8$)图 3-6 测试精度 ($\alpha = 0 \sim 0.5$)

Fig 3-6 Measurement Accuracy for Weighted Averaging

法应用在移动无线网络测试中时，无法保证传输成功率的测试精度，从而影响网络性能，主要有以下原因：

- 平均窗口长度以时间计量并为固定值，一般设置为 50ms 或 100ms，难以对 802.11n 网络的多种配置进行有效测试；
- 合适的加权因子难以选择，理论上 α 应设置在 0.1 到 0.3 之间 [45]，在实际中一般选择固定值 0.125 [43] 或 0.25 [30]。

以上两点造成加权算法无法对测试精度与测试开销进行有效地控制，因此有必要针对移动 802.11n 网络的时空多变及多配置特性，提出有效地传输成功率测试算法，以适应链路质量的变化并有效调整测试精度与开销。

3.2.3 动态滑动平均

对于移动无线网络传输成功率的测试而言，需要考虑测试精度与开销的权衡与折中问题。一方面其测量周期需要尽量短，以适应移动终端接收信号强度的突变并提高测试精度；另一方面在网络状态稳定或传输速率较低时，需要降低采样频率以减小对网络可用资源的影响并降低测试开销。

由于无线网络无线传播环境的复杂性，尤其对于移动网络与移动终端而言，造成接收信号强度和干扰的在传输成功率测量过程中的时空变化特性，使得数据包接收成功概率 p_i 在短时间尺度内变化；同时由于 802.11n 网络采用了 MIMO-OFDM 技术，造成其物理层与链路层的多配置特性，从而造成链路质量测试复杂性的升高及有效性的降低。因此有必要对原有加权算法进行改进，以适应移动网络的时空特性，并适应 MIMO-OFDM 系统的多配置特性。

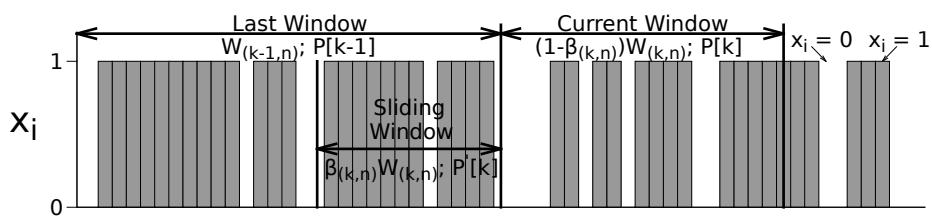


图 3-7 动态滑动平均

Fig 3-7 DSWA with dynamic W and β

针对以上问题，本文提出基于动态滑动窗口平均的传输成功率测试算法，如图 3-7 所示，当前测试窗口与上一测试窗口间存在重叠区域，即滑动窗口。在 DSWA 中 PDR 的测量值为

$$\hat{P}_s[k] = \beta P'[k] + (1 - \beta)P[k] \quad (3-10)$$

其中 T 和 W 分别为滑动窗口和当前平均窗口长度， $\beta = \frac{T}{W}$ 滑动窗口与当前窗口比率，定义为滑动因子， $P'[k]$ 和 $P[k]$ 分别代表滑动窗口和当前窗口的 PDR 测量值。DSWA 中 W 和 β 的设置对于传输成功率的测试精度和误差有着重要影响，第 k 次测量周期的窗口长度 $\bar{W}_{(k,n)}$ 与滑动因子 $\bar{\beta}_{(k,n)}$ 分别定义为

$$\bar{W}_{(k,n)} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \gamma_i \eta_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (3-11)$$

$$\bar{\beta}_{(k,n)} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (3-12)$$

其中 ω_i 为加权因子，本文中定义为

$$\omega_i = \frac{1}{2^{\lfloor \frac{n-i}{2} \rfloor}}, \quad 1 \leq i \leq n, \quad (3-13)$$

γ_i 为中间变量，代表当前 PDR 的变化情况，表示为

$$\gamma_i = 1 + P[k-n+i] - P[k-n+i-1], \quad 1 \leq i \leq n, \quad (3-14)$$

其中 η 为之前 n 个测量周期的窗口长度，即 $\eta_i = W_{(k-n+i,n)}$ 。在实际应用中，加权长度设置为 $n = 8$ ，加权因子设置为 $\omega_i = \{1/8, 1/8, 1/4, 1/4, 1/2, 1/2, 1, 1\}$ ，以充分利用历史数据并尽量提高当前信息的比例，从而可以根据网络当前状态兼顾测试的灵敏性与稳定性，同时 $1/2$ 幂次方的设置也使得程序的运算与执行更为高效。与 EWMA 不同的是，DSWA 并非通过时间驱动，因此其测试周期与传输速率无关，同时 DSWA 通过滑动窗口强调当前网络状态，由于 ω_i 和 γ_i 的设置与 PDR 的相对变化有关，DSWA 可以通过 W 和 β 的调整与当前网络状态相匹配。

通过图 3-7 及式 (3-10) 可以得到

$$\mathbf{E}[P[\cdot]] = \frac{1}{N} \sum \mathbf{E}[x_i] = \frac{1}{N} \sum p_i = \bar{p}[\cdot] \quad (3-15)$$

$$\mathbf{D}[P[\cdot]] = \frac{1}{N^2} \sum \mathbf{D}[x_i] = \frac{1}{N^2} \sum p_i(1 - p_i) = \frac{1}{N} \bar{q}[\cdot] \quad (3-16)$$

其中 N 为采样数目, $\bar{p}[\cdot]$ 和 $\bar{q}[\cdot]$ 分别为 p_i 和 $p_i(1 - p_i)$ 的算数平均值, 从而 DSWA 的测量误差可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[\Delta PDR_s[k + 1]] &= \mathbf{E}[\beta P'[k] + (1 - \beta)P[k + 1] - p_n] \\ &= \beta \mathbf{E}[P'[k]] + (1 - \beta) \mathbf{E}[P[k + 1]] - p_n \\ &= \beta \bar{p}'[k] + (1 - \beta) \bar{p}[k + 1] - p_n \end{aligned} \quad (3-17)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D}[\Delta PDR_s[k + 1]] &= \mathbf{D}[\beta P'[k] + (1 - \beta)P[k + 1] - p_n] \\ &= \beta^2 \mathbf{D}[P'[k]] + (1 - \beta)^2 \mathbf{D}[P[k + 1]] \\ &= \frac{\beta \bar{q}'[k] + (1 - \beta) \bar{q}[k + 1]}{W} \end{aligned} \quad (3-18)$$

其中 $\bar{p}[k + 1]$ 和 $\bar{q}[k + 1]$ 分别为 p_i 和 $p_i(1 - p_i)$ 在第 $(k + 1)$ 测量周期的平均值, $\bar{p}'[k]$ 和 $\bar{q}'[k]$ 为滑动窗口部分估计值, $p_n = p_{(k+1)W-kT}$ 为第 $((k + 1)W - kT)$ 个数据包的接收成功概率。

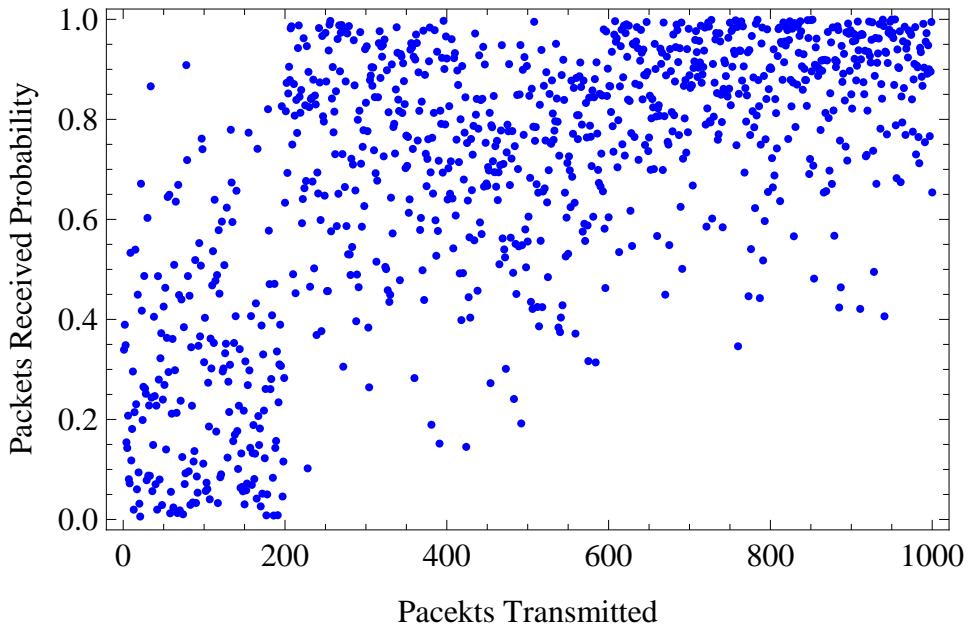


图 3-8 数据包接收成功概率
Fig 3-8 Packets Received Probability

从式(3-17)和式(3-18)可以看出, DSWA的测量误差同样与 p_i 的变化情况有关, 总体上相对于EWMA在移动网络条件下具有更高的精度与测试开销。如图3-9所示, 当 p_i 同样设置为图3-8中情形时, DSWA以同样的窗口长度能够实现更频繁的采样, 同时具有更高的测量精度, 相对于EWMMA的0.19到0.32的测量误差, DSWA在 $\beta=0.3$ 时能够将测量误差降低为0.001。

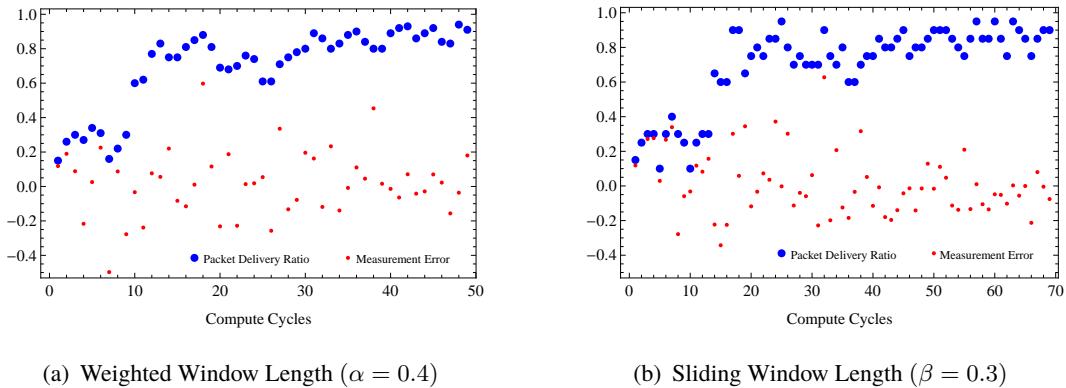


图3-9 移动网络测试精度

Fig 3-9 Measurement Window Length in Mobile Wireless Networks ($W = 20$)

表3-1 加权算法测试误差

Table 3-1 Measurement Error of Weighted Window Length

α	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$E[\Delta PDF_w]$	0.026	0.032	0.019	0.020	0.029
$D[\Delta PDF_w]$	0.035	0.032	0.032	0.036	0.040

表3-2 滑动算法测试误差

Table 3-2 Measurement Error of Sliding Window Length

β	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$E[\Delta PDF_s]$	0.040	0.003	0.001	0.010	0.015	0.013	0.008	0.021	0.007
$D[\Delta PDF_s]$	0.036	0.037	0.038	0.029	0.039	0.038	0.029	0.038	0.036

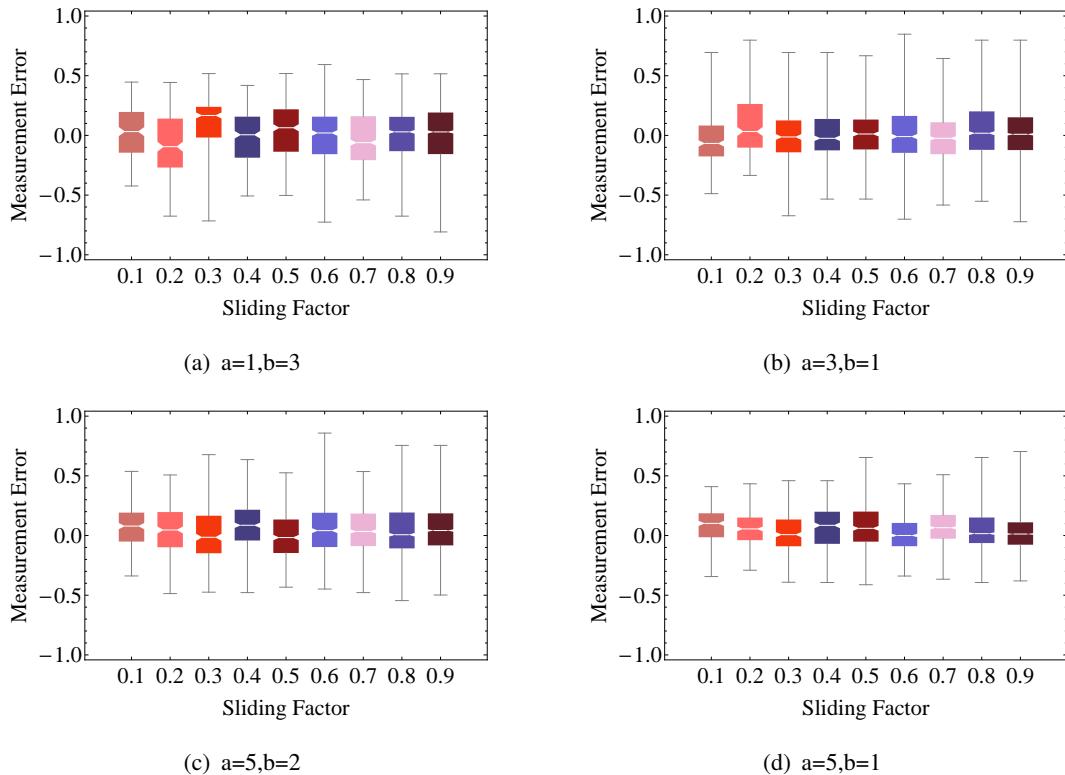


图 3-10 动态滑动平均测试精度

Fig 3-10 Measurement Errors of Sliding Window Length Method

3.3 链路质量在线建模

除了进行准确的 PDR 测量之外，还需要对链路层指标与物理层指标进行建模，即基于实测数据的 PDR-RSS 模型，并进行在线更新以提供准确的网络状态信息，从而为频谱分配及速率适配提供可靠输入。本文提出在线 PDR-RSS 建模框架，通过同时利用物理层及链路层信息，提高移动 MIMO-OFDM 网络信息的可靠传输与的速率的有效配置。在线 PDR-RSS 建模框架如图 3-11 所示，该框架主要由三部分构成：

- **PDR-RSS 数据库**：PDR 与 RSS 在不同 MIMO-OFDM 配置下的原始数据
- **PDR-RSS 模型**：不同 MIMO-OFDM 配置下 PDR-RSS 模型过渡窗口上限
- **HT-GI-MCS 索引**：MIMO-OFDM 配置选择序列

该框架主要由以下三步进行初始化与在线更新：

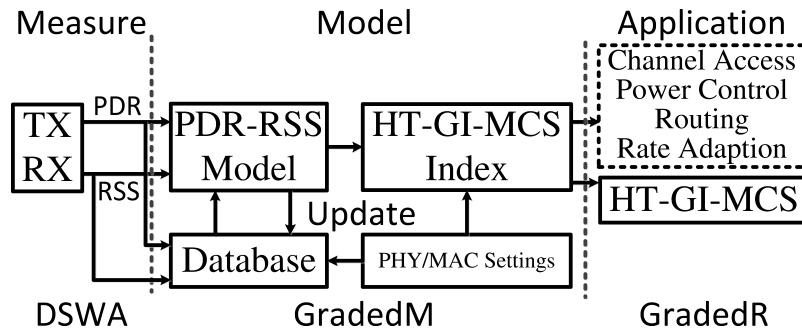


图 3-11 动态 PDR-RSS 模型框架
Fig 3-11 Dynamic PDR-RSS modeling framework

1. 通过离线实验采集不同 MIMO-OFDM 配置下 PDR 及 RSS 的原始数据，建立 PDR-RSS 初始模型；
2. 通过在线实测 PDR 及 RSS 数据对不同 MIMO-OFDM 配置下的 PDR-RSS 模型进行在线更新；
3. 通过当前 PDR 及 RSS 相对于不同 MIMO-OFDM 配置下 PDR-RSS 模型过渡窗口上限的差值，形成 MIMO-OFDM 配置选择序列。

通过以上的在线 PDR-RSS 建模过程，该建模框架相对于传统的静态 PDR-RSS 模型框架（图 3-1）具有明显的优点。第一，在线 PDR-RSS 建模框架中数据库与 PDR-RSS 模型同时具有两个输入变量，而不是单独利用 PDR 或 RSS；第二，在线框架中 PDR-RSS 模型和数据库同时进行在线更新，而不是只对 PDR 进行更新，或利用静态 PDR-RSS 模型而只对 RSS 进行更新；第三，在线框架根据当前 PDR 和 RSS 信息与模型，实时更新能够实现可靠通信的 MIMO-OFDM 配置序列，并对其进行可获得性能进行排序，而不是随机探测某一配置。因此在线 PDR-RSS 建模框架针对静态 PDR-RSS 框架在信道状态和链路质量信息方面，提供了系统化的解决方案，在保证移动 MIMO-OFDM 网络可靠通信的前提下³，提供最优的 MIMO-OFDM 配置选择序列。

³在系统运行过程中保证 $PDR > P_{thr} = 90\%$ 且 $RSS > \delta_+ = GradedT(HT, GI, MCS)$

3.3.1 模型初始化

802.11n 标准采用多种物理层及链路层技术，实现更高的吞吐量和更广的覆盖范围。在物理层，802.11n 网络利用 MIMO 技术实现空间复用与分集，同时利用 OFDM 调制方式以降低信号干扰并提升频谱利用效率，802.11n 网络利用信道绑定技术可以将相邻两个 20MHz 的信道作为一个 40MHz 信道使用，从而有效提升网络吞吐量；在链路层，802.11n 网络使用短保护间隔（Short Guard Interval, SGI）及帧聚合技术，以降低通信开销并提高传输效率。802.11n 网络通过以上的物理层与链路层技术，一方面能够有效提升网络性能，另一方面提高了信道状态估计和链路质量测试的复杂度，对于不同的 MIMO-OFDM 配置，PDR-RSS 模型具有不同特点。

为了实现 802.11n 网络的在线 PDR-RSS 建模框架，本文首先通过大量实验数据对 PDR-RSS 模型进行刻画，以及该模型与物理层和链路层配置的关系，主要包括信道带宽 HT、调制与编码策略 MCS 和保护间隔长度 GI。其中信道带宽分为 $HT=\{HT20, HT40\}$ ，保护间隔长度类型分为 $GI=\{LGI, SGI\}$ ，MCS 与 MIMO 配置有关，对于 3×3 的 MIMO 系统而言， $MCS=\{0, 1, 2, \dots, 23\}$ 。除了网络配置之外，还需要对网络的不同位置与路线进行刻画，对 802.11n 网络的 PDR-RSS 模型的刻画至少需要 500 次重复实验，以完整包括网络的不同配置与网络状态，以下为通过这些实验数据对 802.11n 网络的 PDR-RSS 模型的总结。

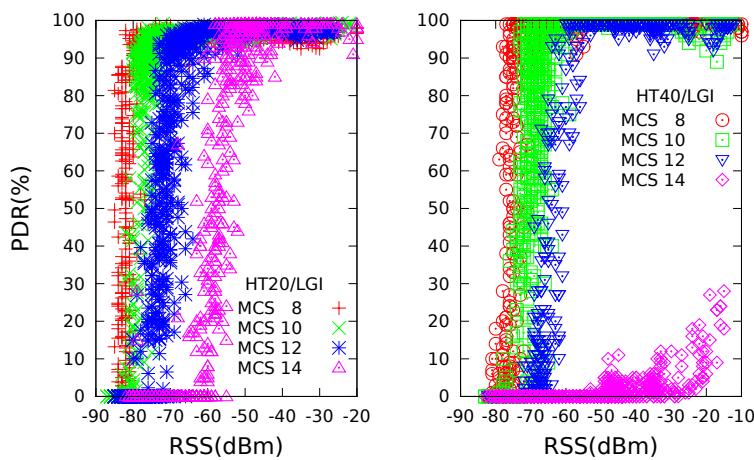


图 3-12 链路质量模型， $HT=HT20/HT40$ ， $MCS=8-14$ ， $GI=LGI$

Fig 3-12 PDR-RSS model of $HT=HT20/HT40$, $MCS=8-14$, $GI=LGI$

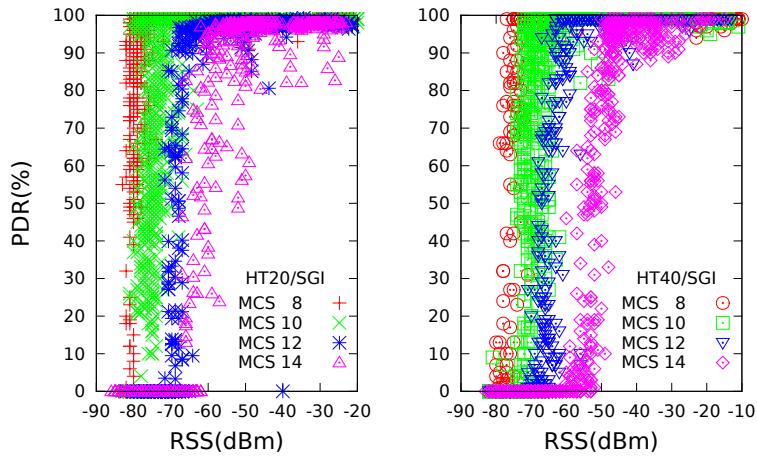


图 3-13 链路质量模型, HT=HT20/HT40, MCS=8-14, GI=SGI

Fig 3-13 PDR-RSS model of HT=HT20/HT40, MCS=8-14, GI=SGI

- 1. 信道带宽：**802.11n 网络中定义了 HT20 与 HT40 两种信道带宽，其中 HT40 信道能够实现单位信号流高达 150Mbps 的传输速率，当链路质量能够得到有效保证时，可以获得 20MHz 信道传输速率的两倍以上。但是另一方面 HT40 信道更容易受到信号干扰的影响，从图 3-12 可以看出，在不同的调制与编码策略及保护间隔情形下，HT40 信道的接收灵敏度明显高于 HT20 信道。同时可以看出 HT40 与 HT20 信道的过渡窗口长度基本相同，当 MCS 从 8 增加到 14，HT20/HT40 信道的过渡窗口长度从 3dB 变化为 10dB。另一方面在适中的数据传输速率范围内，HT40 信道能够在相同的传输速率基础上提供更广的覆盖范围。
- 2. 调制编码：**不同的调制与编码策略对于 802.11n 网络的 PDR-RSS 模型具有很大影响，图 3-12 与图 3-13 刻画了在 HT=HT20/HT40 和 GI=LGI/SGI 下 PDR-RSS 模型与 MCS 的关系。第一，接收灵敏度随着 MCS 的上升而增大，当 MCS 从 8 增加到 14 时，HT20/SGI 与 HT40/SGI 的接收灵敏度分别在 (-80dBm, -50dBm) 和 (-80dBm, -40dBm) 范围内递增；第二，过渡窗口长度 ρ 同样随着 MCS 的上升而增大，尤其当传输速率高于 115Mbps 时，从图 3-13 中可以看出，当 MCS=12 时 ρ 甚至达到 15dB，而过长的过渡窗口长度会严重降低网络的有效吞吐量。
- 3. 保护间隔：**802.11n 网络采用短保护间隔以进一步提升网络性能，理论上

GI=SGI 可以获得 11% 的传输速率的提升 [46]。当传输速率较低时，SGI 与 LGI 的传输成功率和吞吐量没有很大分别，如图 3-12 和图 3-13 所示。但是当传输速率较高时，SGI 可以明显提高网络性能，尤其对于 HT40 信道而言，如图 3-14 所示，对于 HT=HT40 且 MCS=15 时，LGI 的 PDR 总是低于 40%，而对于 HT20 与 HT40 信道，SGI 的 PDR 分别可以得到 10%-40% 和 20%-60% 提升。

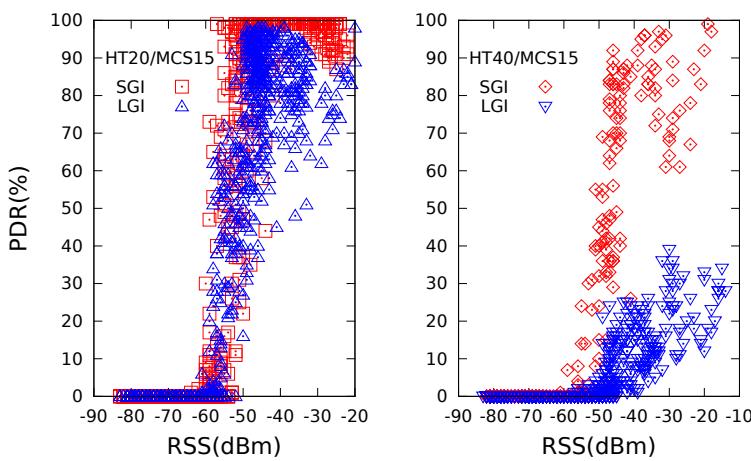


图 3-14 链路质量模型，HT=HT20/HT40，MCS=15，GI=LGI/SGI

Fig 3-14 PDR-RSS model of HT=HT20/HT40, MCS=15, GI=LGI/SGI

通过以上的 PDR-RSS 模型初始化与性质刻画，可以得到 PDR-RSS 的初始模型，即在不同 MIMO-OFDM 配置下 PDR-RSS 过渡窗口参数。在系统实现时定义为结构体 **GradedT**，该结构体的初始参数可以通过复杂度为 $O(N \cdot w \cdot g \cdot r)$ 的实验得到，其中 N 为测试通信节点数目， w 为某特定中心频率下的信道带宽类型， g 为保护间隔类型， r 为调制与编码策略数目。对于具有 3×3 MIMO 配置的 802.11n 系统， $w = 4$ 代表在中心频率 2.4GHz 及 5GHz 下分别具有 HT20 与 HT40 两种信道类型， $g = 2$ 表示 LGI 和 SGI 两种保护间隔类型， $r = 24$ 对应于 0-23 的调制与编码索引。

该 PDR-RSS 初始模型在系统运行时进行在线更新， 2×2 MIMO 系统的 **GradedT** 如图 3-15 所示，**GradedT** 将 HT/GI/MCS 选择序列划分为三个区域，如果某一配置刚好位于灰色分界线的右边，则意味着该配置在当前网络状态下可以保证信号的可靠传输⁴，因此在当前 RSS 条件下所有位于灰色分界线右边

⁴即在此配置下当前 RSS 可以保证 $PDR > P_{thrh} = 90\%$

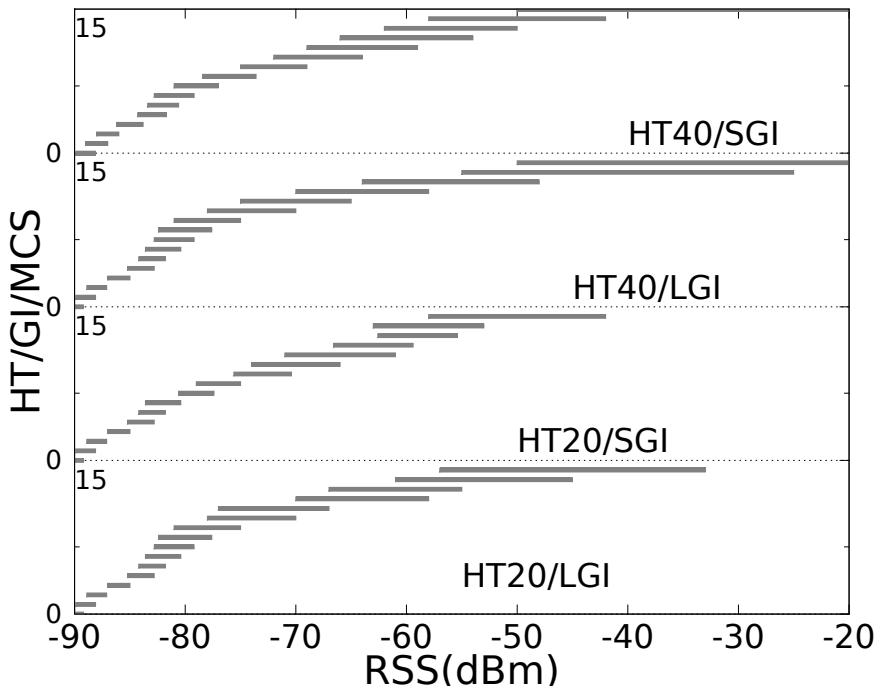


图 3-15 PDR-RSS 初始模型

Fig 3-15 Initial PDR-RSS model

的配置中，可以选择最优的配置以提高网络吞吐量。

3.3.2 模型在线更新

在线 PDR-RSS 建模主要实现 PDR-RSS 模型与数据库的实时更新，并根据当前网络状态生成 HT/GI/MCS 配置选择序列，本文将这一过程简称为 GradedM。首先，当 RSS 或 PDR 其中任何某一指标低于设置的门限值时，GradedM 便对 PDR-RSS 模型进行更新。显然，MIMO-OFDM 网络某一配置在当前状态下可以获得的可靠性，可以由每一配置下 PDR-RSS 模型过渡窗口上限 δ_+ 与当前接收信号强度 RSS 的距离表示，即 RSS-GradedT。据此可以根据当前 RSS 与 GradedT 进行 MIMO-OFDM 配置排序，从而生成 HT/GI/MCS 选择序列。以上过程的伪代码如算法 2 所示。

在算法 2 中，结构体 GradedT（第 1 行到第 3 行）定义了不同 MIMO-OFDM 配置 PDR-RSS 模型过渡窗口的上下限值，通过当前的 PDR 和 RSS 可以对此上下限的变化进行判断，如果某一门限值发生了变化则进行实时更新

算法 2 GradedM: PDR-RSS 在线建模与实时更新

输入： pdr-now, rss-now

输出： ht-gi-mcs-index

```

1: struct GradedT {
2:     graded-delta[r][2]; // r=8/16/24 对应于天线数量 1/2/3
3: } graded-table[w][g]; // w=g=2 对应于信道 HT20/HT40 与保护间隔 LGI/SGI
4: // 1. PDR-RSS 模型实时更新
5: if graded-delta-changed then
6:     graded-table ← update-delta(pdr-now,rss-now);
7: end if
8: // 2. HT/GI 选择序列排序
9: mcs-index ← sort(graded-table,rss-now);
10: // 3. HT/GI/MCS 选择序列排序
11: ht-gi-mcs-index ← sort(mcs-index,mcs-rate);
12: return ht-gi-mcs-index;

```

(第 5 行到第 7 行)。对于所有位于过渡窗口上限右边的配置，GradedM 首先根据当前 RSS 与过渡窗口上限的差值⁵，对所有可靠配置排序生成 HT/GI 选择序列 (第 9 行)，从而得到当前可选择配置序列；但此时可选序列并未按照所能获得吞吐量进行排序，然后 GradedM 根据可获得的传输速率与 HT/GI 选择序列，排序得到 HT/GI/MCS 选择序列 (第 11 行)，此时的 HT/GI/MCS 序列可以保证可靠数据传输，并按照可获得的网络吞吐量排序。由 GradedM 所产生的 HT/GI/MCS 选择序列通过网络可靠性、数据传输速率以及当前网络状态产生，因此可以通过修改或直接应用于其他上层应用中。

综上所述，802.11n 网络在线 PDR-RSS 建模框架主要由三部分构成：信道状态估计与链路质量测试、PDR-RSS 初始模型与数据库的形成以及 PDR-RSS 模型在线更新与配置排序。通过在线建模框架能够实现 MIMO-OFDM 系统的物理层与链路层的有效配置，实现网络可靠性、数据传输速率的有效平衡，在保证系统可靠性的前提之下有效提高网络吞吐量。

⁵即 $RSS - \delta_+ = RSS - \text{GradedT}(HT, GI, MCS)$ ，单位为 dB

3.4 系统实现

本章主要介绍在线建模框架的系统实现，主要包括测试平台开发与搭建和算法设计与实现，其中包括速率控制算法的设计与实现，以实现对在线建模框架性能的有效评估。

3.4.1 实验平台

802.11n 网络测试平台主要由无线接入点（Access Point, AP）、静态节点及移动节点组成，其中 AP 为 TP-LINK 的双频无线路由器 TL-WRD4310，其无线通信芯片为 Atheros AR9580 无线模块，该模块支持最高 3×3 的 MIMO 配置，在 HT20/HT40 信道下能够实现 300Mbps/450Mbps 的无线数据传输速率，静态节点和移动节点分别为台式机和便携式笔记本，并配置 Atheros 的 3 天线双频无线网卡 AR9380，所有的无线通信节点运行于 Linux 系统（内核版本 3.2.0-26），并通过 ath9k [43] 开源无线驱动实现无线通信。

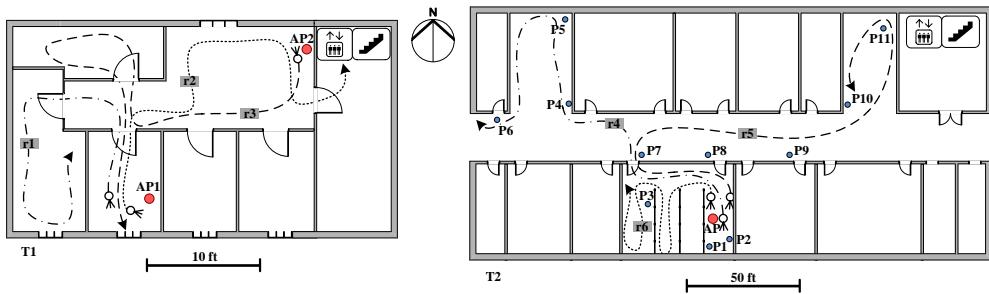


图 3-16 802.11n 网络测试系统

Fig 3-16 Experiment testbed and measurement setup for 802.11n networks

802.11n 网络测试场景如图 3-16 所示，包括宿舍与实验室两个室内环境，两者都包括 LOS 和 NLOS 信号传输，同时包含静态测试（**P1** 到 **P11**）与移动测试（**r1** 到 **r6**），其中静态测试主要完成初始 PDR-RSS 模型刻画并形成模型数据库，移动测试实现在线建模框架及速率控制算法的评估。

3.4.2 测试方法

为了避免其他信号的干扰，所有实验运行在 5.745GHz 频段 149 信道，同时所有实验在 0:00 到 6:00 间进行。在静态与移动测试中，系统通过 iperf⁶

⁶<http://iperf.sourceforge.net>

周期性发送 UDP 数据包，数据包长度固定为 1500bytes。实验测试过程中取消 MAC 层的 RTS/CTS 及 ACK 机制，同时关闭功率节省模式，以降低其他因素的影响。静态实验通过不同位置的通信节点进行数据采集，完成不同 MIMO-OFDM 配置的初始建模，移动测试通过常速前进的移动节点进行测试，如图 3-16 所示，以上实验可以完整覆盖移动 MIMO-OFDM 系统的所有配置与特性，从而完成对移动 802.11n 网络的测试与性能评估。

3.4.3 速率控制

根据在线建模框架，本文提出阶梯式速率控制算法 GradedR，首先 GradedR 利用 DSWA 算法提高 PDR 测试精度并有效降低测试开销，然后通过在线建模实时更新 PDR-RSS 模型并排序生成 MIMO-OFDM 配置选择序列，最后根据当前 PDR 和 RSS 在配置选择序列中确定最优配置。该速率控制算法的伪代码如算法 3 所示，其中 PDR 的门限值设置为 $\{P_{thrl}, P_{thrh}\}=\{10\%, 90\%\}$ ，配置切换上下门限值分别设置为 {3dB, 10dB}。

算法 3 GradedM → DSWA → GradedR

输入： tx-complete (packets transmitted event)

输出： rate-index (rate selection indexes of HT/GI/MCS)

```

1: // DSWA(pdr-last, pdr-now): 更新加权平均中间变量  $\gamma$  和  $\eta$ ，返回平均窗口
   长度  $W$  和滑动因子  $\beta$ 
2: // GradedM(pdr, rss): 更新 PDR-RSS 模型 graded-table 并对 MIMO-OFDM 配
   置进行排序，返回 HT/GI/MCS 选择序列 ht-gi-mcs-index
3: // GradedR(ht-gi-mcs-index): 保证当前网络 PDR 高于 90%，返回当前状态
   下的最优 MIMO-OFDM 配置 ht-gi-mcs
4: if pdr-now <  $P_{thrh}$  | rss-now <  $\delta_+ + low - limit - to - gray$  then
5:   graded-table ← GradedM(pdr-now,rss-now); // rc.c
6:   rate-index ← down-rate-mcs(ht-gi-mcs-table);
7: end if
8: if graded-sens - rss-now > high-limit-to-gray then
9:   rate-index ← up-rate-mcs(ht-gi-mcs-table);
10: end if
11: return {tx-status,rate-index};

```

如果当前配置下过渡窗口上限与当前 RSS 之差低于 3dB 时或高于 10dB 时，系统将根据 HT/GI/MCS 选择序列进行重新配置。如果该距离低于 3dB (第 4 行)，则在当前 HT/GI 选择区域内选择更低的 MCS 配置以降低传输速率，或在其他 HT/GI 区域内选择相同的 MCS 配置以保证当前传输速率；相反当此距离大于 10dB 时 (第 8 行)，GradedR 将提高 MCS 以提升网络性能，同样优先在当前 HT/GI 区域内进行选择。考虑到在第 3.3.1 节中关于保护间隔对 PDR-RSS 模型的影响，在配置选择过程将 SGI 作为最后选择，即当且仅当在 LGI 配置下的最高 MCS 仍然无法满足 PDR 或传输速率要求时，则选择 SGI 配置以保证网络性能。

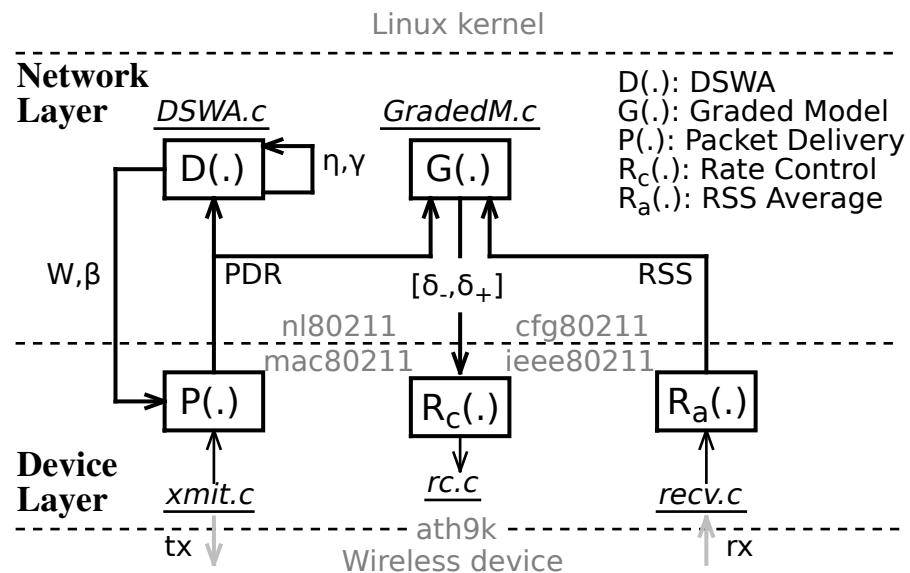


图 3-17 链路质量测试算法
Fig 3-17 Measurement framework and implementation on Linux systems

以上速率控制算法通过 `ath9k` 开源无线驱动运行于 Linux 操作系统之上，图 3-17 为 802.11n 网络性能测试与速率控制的软件框架，主要由驱动层和网络层两部分构成。网络层进行 DSWA 参数计算以确定平均窗口长度和滑动因子，同时通过 GradedT 对配置选择序列进行实时更新；驱动层由数据包发送和接收事件驱动，负责执行 PDR 计算和 RSS 平均，同时根据当前 PDR 和 RSS 结果结合网络层的配置选择序列，进行重新配置的判断与执行。

3.5 性能评估

性能评估部分包括测试精度与开销的对比以及系统的吞吐量评估，本章首先对 DSWA 和 EWMA 测试算法的测试精度与开销进行了对比，然后详细分析评估了 DSWA 和在线 PDR-RSS 建模框架对系统性能的提升。

3.5.1 传输成功率

在静态无线网络中，接收信号强度在短时间内基本保持不变 [18]，可以认为在 PDR 测试过程中 p_i 恒定不变，则 x_i 为独立同分布随机变量，此时可以刻画为伯努利过程，即 $\mathbf{P}(x_i = 1) = p$ 且 $X \sim B(p)$ ，此时 DSWA 和 EWMA 都是被测 PDR 的无偏估计，因此具有相同的测试精度，而 DSWA 可以有效降低测试开销。但是在实际网络中，EWMA 的测试精度明显低于 DSWA，主要原因是 p_i 的时变特性，而在移动网络中还需要考虑网络的空间特性。图 3-18 为移动网络中 EWMA 和 DSWA 算法测试误差的累积分布函数（Cumulative Distribution Function, CDF），对于 DSWA 测试算法而言，其测试误差在 ± 0.008 之间，而 EWMA 的测试误差为 -0.019 到 0.032。同时从 EWMA 算法测试误差的 CDF 曲线可以看出，其测试误差相对于 $Error = 0$ 整体右移，说明 EWMA 算法的 PDR 测试结果相对于真实值普遍偏高，从而影响网络性能。相对于 EWMA 测试算法，DSWA 算法在整体的测试精度上可以提高 89%。

除了能够提升移动 802.11n 网络 PDR 的测试精度之外，DSWA 同时可以有效降低 PDR 的测试开销。首先 DSWA 的采样间隔 W 为前 n 次采样结果的加权平均，因此可以避免信号噪声引起的突变，同时对于 PDR 的变化作出快速反应；同时由于采样间隔 W 与 PDR 的相对变化密切相关，因此可以在链路质量持续下降时作出及时反应，并在网络状态保持稳定时降低采样频率。图 3-19 给出 DSWA 在不同网络状态下的 PDR 测试开销，首先 PDR 在约 15s 时开始降低，采样间隔 W 和滑动因子 β 相应地降低；当 PDR 从 40s 到 50s 逐渐上升并趋于稳定时，采样间隔 W 从 100 逐渐增加为 200，从而明显降低测试开销。而对于 EWMA 测试算法而言，其采样间隔在特定传输速率下基本保持不变，比如在传输速率为 6.5Mbps 时采样间隔为 $W = 20$ ，而在 300Mbps 时采样间隔上升为 $W = 500$ 。

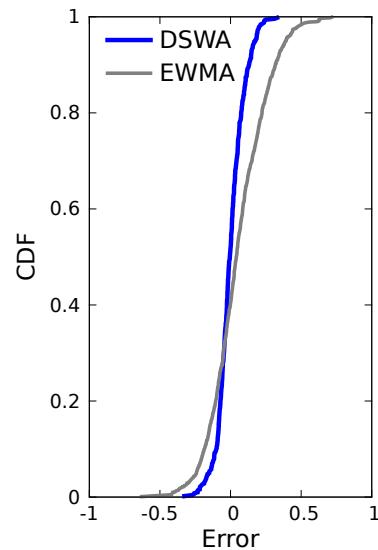


图 3-18 传输成功率测试精度

Fig 3-18 Measurement accuracy for EWMA and DSWA

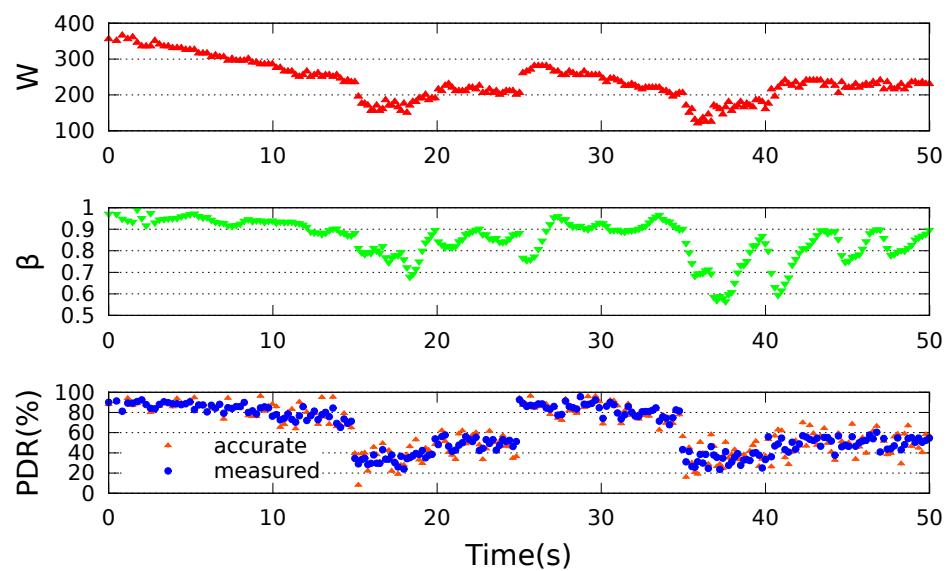


图 3-19 传输成功率测试开销

Fig 3-19 Measurement overhead for EWMA and DSWA

3.5.2 吞吐量

为了进一步对在线 PDR-RSS 建模框架和速率控制算法 **GradedR** 进行性能评估，本文通过便携式笔记本进行移动测试，所有的移动节点通过 Linux 操作系统和 **ath9k** 开源无线驱动实现无线通信，并安装 **GradedR** 算法实现网络性能测试与速率控制，物理层的吞吐量作为性能评估指标。首先通过简单的移动测试，对速率控制算法在特定移动路线的稳定性与可靠性进行评估；然后在不同移动路线进行大量移动实验，分析在不同速率控制算法下吞吐量与平均 RSS 的关系，通过统计分析分别分析 **DSWA** 测试算法及 **GradedR** 速率控制算法的性能提升情况。以上所有实验分别在 1×3 、 2×3 和 3×3 的 MIMO-OFDM 系统下进行重复测试，以全面有效地对 **DSWA** 测试算法和 **GradedR** 速率控制算法进行性能评估。以下首先分析特定移动路线下的 PDR 和吞吐量关系，然后对所有移动路线的整体吞吐量与平均 RSS 的关系进行评估。

图 3-20 所示为沿线路 **r5**（如图 3-16 所示）的速率控制结果，主要对特定移动路线的 PDR 和吞吐量进行评估。首先对于所有的 MIMO 配置，**GradedR** 能够明显提升网络可靠性，对于路线 **r5** 的所有 **GradedR** 测试至少 91% 的 PDR 高于 90%，而 **Minstrel** 约有 63% 的 PDR 低于 90%；同时随着 MIMO 可用天线数量的增加，**GradedR** 的可靠性随之上升，其低于 90% 的 PDR 所占比例由 9% 降低为 5%，而 **Minstrel** 的这一比例却从 37% 上升为 51%，说明 **Minstrel** 的可靠性随着天线数量增加而降低。其次 **GradedR** 能够明显提高网络吞吐量，对于 1×3 的 MIMO 配置，**GradedR** 算法只有在时间 20 秒之前吞吐量高于 **Minstrel** 算法 5-15Mbps，其他情况下的吞吐量基本相同；而在 2×3 和 3×3 的 MIMO 配置下，**GradedR** 算法的吞吐量明显高于 **Minstrel** 算法，在 2×3 配置下大约高于 5-20Mbps，在 3×3 配置下甚至达到 30Mbps 的性能提升。**GradedR** 能够实现吞吐量的有效提升，一方面是由于上文中提到的 PDR 的大幅提升，另一方面在于其实时准确的配置选择策略。第一，**GradedR** 利用 **DSWA** 算法能够获得准确的 PDR 参数，根据网络当前状态及在线 PDR-RSS 模型得到准确的最优配置选择，能够在保证网络可靠性的基础之上尽量提高网络吞吐量，而 **Minstrel** 通过随机探测的方式寻找可用配置，或直接降低 MCS⁷ 以保证数据的可靠传输，其配置选择效率受到很大限制；第二，由于 **DSWA** 在网络状态稳定时能够有效降低测试开销，同时 **GradedR** 不需要多余的探测数据包进行测试，从而有效降低

⁷降低 MCS 值即降低网络的数据传输速率

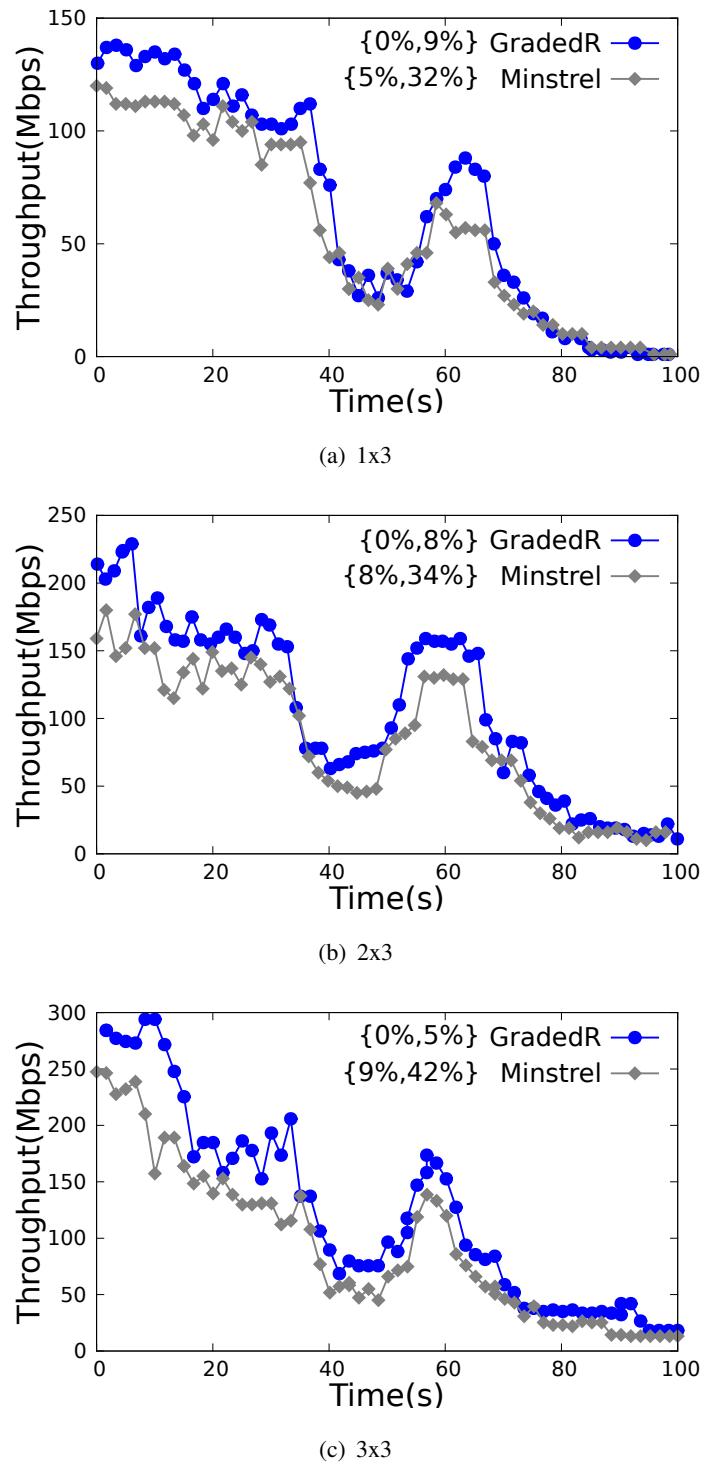
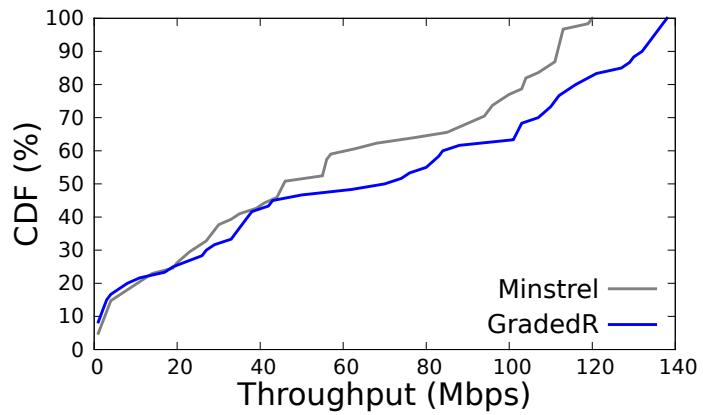
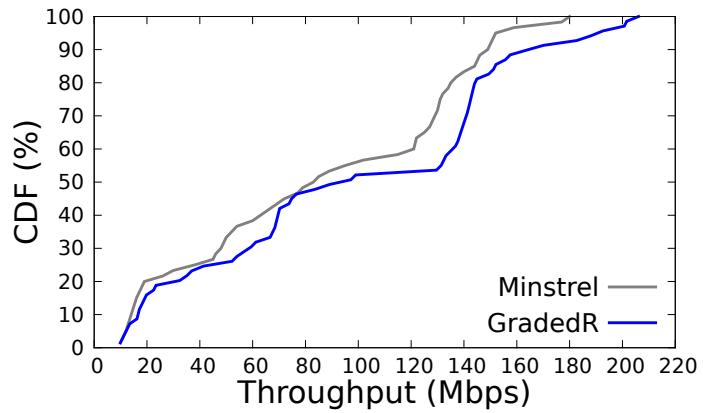


图 3-20 吞吐量及传输成功率

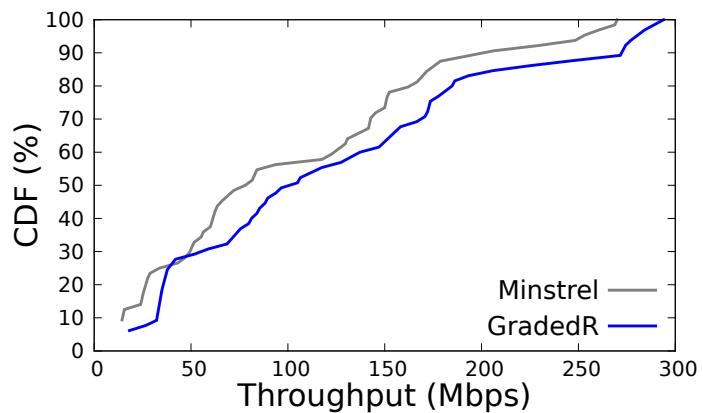
Fig 3-20 Throughput improvements and PDR results along the route r5



(a) 1x3



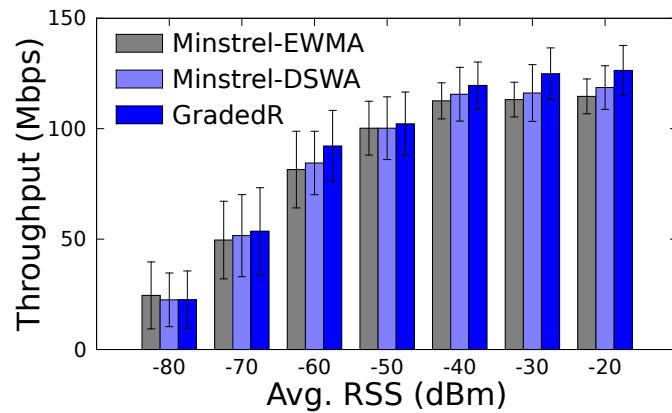
(b) 2x3



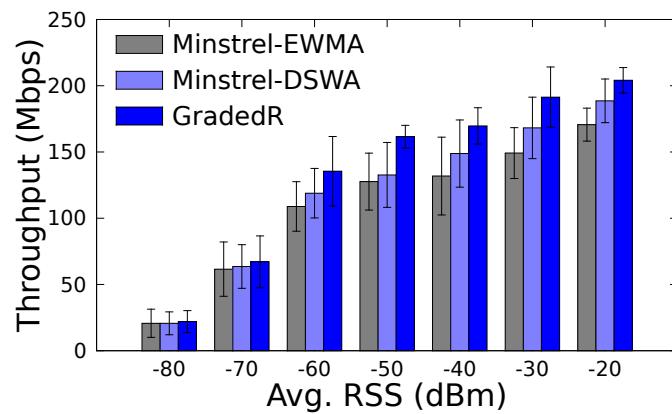
(c) 3x3

图 3-21 吞吐量累积分布函数

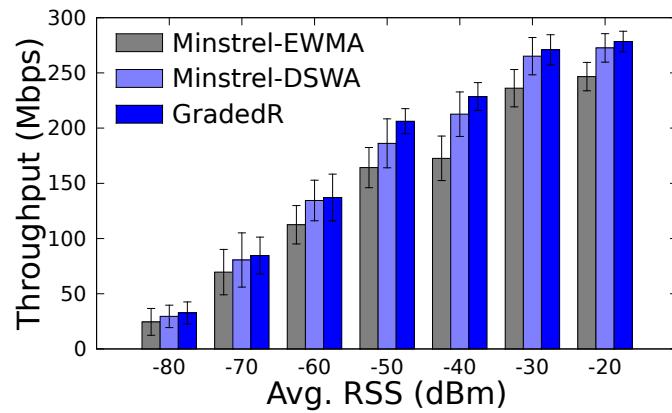
Fig 3-21 CDF of throughput along the route r5



(a) 1x3



(b) 2x3



(c) 3x3

图 3-22 吞吐量及平均接收信号强度关系

Fig 3-22 Throughput vs. average RSS under different MIMO configurations

由配置选择带来的额外开销，而 Minstrel 需要依靠 10% 的探测数据包来获得当前可用配置，其效率与准确性受到明显限制，同时探测数据包降低了可用数据传输的吞吐量。

吞吐量与平均 RSS 的关系如图 3-22 所示，包括图 3-16 中 r1 到 r6 的所有移动测试数据。整体上 GradedR 能够在不同 MIMO 配置下实现更高的吞吐量，在相同的平均 RSS 条件下同样具有更高的吞吐量，同时吞吐量的提升随着天线数量和平均 RSS 的增加而增加。从图 3-22 可以看出，GradedR 在 1×3 和 3×3 的 MIMO 配置下分别提升吞吐量 5-15Mbps 和 10-40Mbps；在特定 MIMO 配置下，不同速率控制算法的吞吐量都与平均 RSS 密切相关，当平均 RSS 低于 -60dBm 时，单天线和双天线系统的吞吐量基本相同，GradedR 在 3×3 的 MIMO 系统下的最大吞吐量提升为 5Mbps，主要原因是 GradedR 的可选配置受天线数量和平均 RSS 的限制。另一方面 Minstrel 速率控制算法结合 DSWA 测试算法同样可以实现吞吐量提升，相对于采用 EWMA 测试算法的 Minstrel，Minstrel-DSWA 的吞吐量提升同样随着天线数量和平均 RSS 而增加。如图 3-22 所示，当平均 RSS 高于 -40dBm 时，对于 1×3 MIMO 系统，Minstrel-DSWA 能够获得最高 8Mbps 的吞吐量提升，对于 2×3 和 3×3 MIMO 系统，最高的吞吐量提升分别为 25Mbps 和 30Mbps。总体上，在不同的 MIMO 配置条件下，GradedR 相对于 Minstrel 能够实现 40% 的吞吐量提升，同时在 2×3 和 3×3 的 MIMO 配置系统中，Minstrel-DSWA 能够实现高于 Minstrel-EWMA 算法 20%/25% 的吞吐量。

3.6 本章小结

本章主要讨论在移动网络中，MIMO-OFDM 系统的链路质量测试与建模问题。本文首先提出基于动态滑动窗口平均的 PDR 测试算法，通过数据包收发事件驱动确定采样间隔，从而避免多配置对 PDR 测试的影响，同时利用当前 PDR 信息降低测试开销；然后以 PDR 测试算法为基础，提出在线 PDR-RSS 建模框架，通过 PDR-RSS 模型数据库结合实时更新，解决 MIMO-OFDM 系统多配置带来的过渡窗口问题。以上的 PDR 测试算法与在线建模框架，同时利用物理层指标 RSS 与链路层指标 PDR，有效地解决了移动性及多配置对链路质量测试与建模的影响。最后通过速率控制算法设计及其系统实现，对以上算法进行实验评估，评估结果表明动态 PDR 测试算法能够提升 89% 的测试精度，同时结合在线建模框架能够在不同 MIMO 配置下实现 40% 的吞吐量提升。

总结与展望

本文针对移动网络中信道状态及链路质量测试问题，提出动态测试算法以根据当前网络状态调整测试参数，在保证测试精度的前提下尽量降低测试开销，从而保证网络的可靠运行及传输性能，本文的主要工作归结如下：

1. 信道状态采样与估计

- (a) 根据高速移动网络无线传播环境的特点，根据当前网络状态进行动态采样，同时完成衰落参数估计与采样频率计算；
- (b) 在保证测试精度的前提下降低测试开销，在高速移动条件下降低信道采样对数据传输的不利影响；
- (c) 搭建 GSM-R 网络空中接口监测系统，并自主开发在线测试软件平台，于京沪高速铁路进行实验测试。

2. 链路质量测试与建模

- (a) 通过动态滑动平均算法对传输成功率进行实时测量，根据网络状态实现链路质量测试精度与开销的有效平衡；
- (b) 设计并实现链路质量在线建模框架，同时利用物理层与链路层指标实现移动 MIMO-OFDM 网络的速率适配；
- (c) 开发无线局域网络通信质量测试软件，并对测试算法及速率适配算法进行验证、对比与评估。

针对 GSM-R 网络信道状态采样与估计，本文提出接收信号强度在线测试算法，解决高速移动性及传播环境复杂性对信道采样的不利影响，在保证一定测试精度的条件下降低测试开销，并通过系统设计与实现对该算法进行评估。该算法通过采样数据结合衰落参数历史值，对当前衰落参数进行估计，确定不同衰落参数条件下的统计区间与采样点数。在城区、山地、丘陵等密集区域，由于多径衰落现象加重，且直射路径功率所占比例较低，需要进行较为频繁的采样与统计，确保统计区间 $2L \leq 20m$ ，采样间隔 $\Delta d \leq 0.3m$ ；在平原、

高架桥等开阔区域，移动台接收功率较大，且一般存在较大比例的直射路径功率，在同样的统计区间内只需做较少的采样，保证统计区间 $2L \leq 50m$ ，采样间隔 $\Delta d \leq 1.5m$ ，便可以满足本地均值的准确性要求。对应列车运行速度在 $300km/h$ 时，采样时间间隔为 $2.0ms$ 到 $18.0ms$ 时，才能够保证测量数据的可靠性。在实际工程应用中的 GSM-R 网络无线覆盖测量，一般采用采样间隔 $\Delta d = 4cm$ 、统计区间 $10m \leq 2L \leq 100m$ 的方法，参照本章关于莱斯衰落信道下采样算法的推导，可以在高铁线路中的开阔区域适当提高采样间隔，从而在确保数据可靠性的同时降低测量开销。

对于链路质量测试与建模，本文主要解决移动 802.11n 网络中 MIMO-OFDM 配置及移动性对链路质量测试与建模带来的问题，提出在线测试与建模框架，在保证系统可靠性的前提下尽量提高系统吞吐量，最后通过系统实现与实验测试对其测试及传输性能进行评估。本文首先提出基于动态滑动窗口平均的 PDR 测试算法，通过数据包收发事件驱动确定采样间隔，从而避免多配置对 PDR 测试的影响，同时利用当前 PDR 信息降低测试开销。然后以 PDR 测试算法为基础，提出在线 PDR-RSS 建模框架，通过 PDR-RSS 模型数据库结合实时更新，解决 MIMO-OFDM 系统多配置带来的过渡窗口问题。以上的 PDR 测试算法与在线建模框架，通过同时应用物理层指标 RSS 与链路层指标 PDR，有效地解决了移动性及多配置对链路质量测试与建模的影响。最后通过速率控制算法设计及其系统实现，对以上算法进行实验评估，评估结果表明本文提出的 PDR 测试算法能够提升 89% 的测试精度，同时结合在线建模框架能够在不同 MIMO 配置下实现 40% 的吞吐量提升。

本文提出的在线测试算法仅考虑物理层与链路层指标，并未考虑上层的用户需求及业务流量，虽然能够提升网络传输成功率与吞吐量，并不能保证无线频谱资源的利用效率，后续工作针对上层应用进行实时需求响应。同时本文没有考虑移动无线网络的能量有效性，下一步工作主要结合本文的测试与速率适配算法，通过跨层协议设计实现移动无线网络的能量有效性。

附录 A 接收信号强度本地均值估计

A.1 统计区间长度

由式 (2–6) 和式 (2–7) 并通过近似 [3] 可以得到莱斯衰落的自相关函数 $R_{p_r^2}(\tau)$

$$R_{p_r^2}(\tau) = 4\sigma^2 \left[J_0^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \tau \right) + 2K J_0 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \tau \right) \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \eta \tau \right) \right] \quad (\text{A-1})$$

其中 $J_0(\cdot)$ 为零阶贝塞尔函数， η 为中间变量，即 $\eta = \cos \theta_0$ 。然后 $\sigma_{\hat{s}}^2$ 可以通过将式 (A-1) 带入式 (2–14) 计算得到，如式 (A-2) 所示。

$$\begin{aligned} \sigma_{\hat{s}}^2 &= \frac{4\sigma^2}{L} \int_0^{2L} \frac{2L - \tau}{2L} [J_0^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \tau \right) + 2K J_0 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \tau \right) \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \eta \tau \right)] d\tau \\ &= \frac{\hat{s}^2 (2L - \lambda) \lambda}{2(1 + K)^2 L^2} \int_0^{\frac{2L}{\lambda}} [J_0^2(2\pi\rho) + 2K J_0(2\pi\rho) \cos(2\pi\eta)] \rho d\rho \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

其中 $\rho = \tau/\lambda$ 为中间变量，且当 $2L/\lambda \rightarrow \infty$ 时， $\sigma_{\hat{s}}^2 \rightarrow 0$ 。当 $2L$ 足够长时 \hat{s} 可以认为服从高斯分布，则 $\sigma_{\hat{s}}^2$ 可以简化为

$$\sigma_{\hat{s}}^2 = \frac{2(n-1)}{n^2(1+K)^2} \int_0^n g(K; \rho) d\rho \quad (\text{A-3})$$

其中 $n := 2L/\lambda$ 代表统计区间长度 $2L$ 与无线信号波长 λ 的比值, $g(K; \rho) := [J_0^2(2\pi\rho) + 2KJ_0(2\pi\rho)\cos(2\pi\eta)]\rho$ 。则均一化估计误差可以表示为

$$\begin{aligned}
 P_e &:= 10 \log_{10} \left(\frac{\hat{s} + \sigma_{\hat{s}}}{\hat{s} - \sigma_{\hat{s}}} \right) \\
 &= 10 \log_{10} \left(\frac{n(1+K) + \sqrt{2(1+n) \int_0^n g(K; \rho) d\rho}}{n(1+K) - \sqrt{2(1+n) \int_0^n g(K; \rho) d\rho}} \right) \\
 &= 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{2\sigma^2 + \nu^2}{2\sigma^2} n + \sqrt{2(1+n) \int_0^n g\left(\frac{\nu^2}{2\sigma^2}; \rho\right) d\rho}}{\frac{2\sigma^2 + \nu^2}{2\sigma^2} n - \sqrt{2(1+n) \int_0^n g\left(\frac{\nu^2}{2\sigma^2}; \rho\right) d\rho}} \right)
 \end{aligned} \tag{A-4}$$

A.2 采样点数目

根据莱斯分布的特性可以得到 $z_i^2 = x_i^2 + y_i^2$, 其中 $x_i \sim N(\nu \cos \eta, \sigma^2)$ 和 $y_i \sim N(\nu \sin \eta, \sigma^2)$ 为独立正态随机变量, η 为任一实数。令 $x_{0i} = x_i/\sigma$, 则 $x_{0i} \sim N(\nu \sin \eta, 1)$ 且其和服从非中心 χ^2 分布, 即 $\sum_{i=1}^N x_{0i}^2 \sim \chi_N^2(\nu^2 \cos^2 \eta)$ 。由于 $E[\chi_n^2(\lambda)] = n + \lambda$ 且 $D[\chi_n^2(\lambda)] = 2n + 4\lambda$, 则 $\sum_{i=1}^N x_i^2$ 的均值与方差表示为

$$\begin{aligned}
 E \left[\sum_{i=1}^N x_i^2 \right] &= \sigma^2 E \left[\sum_{i=1}^N x_{0i}^2 \right] \\
 &= \sigma^2 E [\chi_N^2(\nu^2 \cos^2 \eta)] \\
 &= \sigma^2 (N + \nu^2 \cos^2 \eta)
 \end{aligned} \tag{A-5a}$$

$$\begin{aligned}
 D \left[\sum_{i=1}^N x_i^2 \right] &= \sigma^4 D \left[\sum_{i=1}^N x_{0i}^2 \right] \\
 &= \sigma^4 D [\chi_N^2(\nu^2 \cos^2 \eta)] \\
 &= \sigma^4 (2N + 4\nu^2 \cos^2 \eta)
 \end{aligned} \tag{A-5b}$$

同样的, $E[\sum_{i=1}^N y_i^2] = \sigma^2(N + \nu^2 \sin^2 \eta)$, $D[\sum_{i=1}^N y_i^2] = \sigma^4(2N + 4\nu^2 \sin^2 \eta)$ 可以通过以上计算得到。则 r^2 及其方差分别表示为

$$\begin{aligned}\bar{r^2} &= E\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2\right] \\ &= \frac{1}{N} E\left[\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)\right] \\ &= \frac{\sigma^2}{N} (N + \nu^2 \cos^2 \eta + N + \nu^2 \sin^2 \eta) \\ &= \frac{\sigma^2}{N} (2N + \nu^2)\end{aligned}\tag{A-6a}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{r^2}^2 &= D\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2\right] \\ &= \frac{1}{N^2} D\left[\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)\right] \\ &= \frac{\sigma^4}{N^2} (2N + 4\nu^2 \cos^2 \eta + 2N + 4\nu^2 \sin^2 \eta) \\ &= \frac{\sigma^4}{N^2} (4N + 4\nu^2)\end{aligned}\tag{A-6b}$$

从而计算得到采样点数的均一化误差, 如式 (A-7) 所示

$$\begin{aligned}Q_e &= 10 \log_{10} \left(\frac{\bar{r^2} + \sigma_{r^2}}{\bar{r^2}} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{\sigma^2}{N} (2N + \nu^2) + \frac{2\sigma^2}{N} \sqrt{N + \nu^2}}{\frac{\sigma^2}{N} (2N + \nu^2)} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{2N + \nu^2 + 2\sqrt{N + \nu^2}}{2N + \nu^2} \right)\end{aligned}\tag{A-7}$$

参考文献

- [1] BALDINI G, NAI FOVINO I, MASERA M, et al. An early warning system for detecting GSM-R wireless interference in the high-speed railway infrastructure[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2010.
- [2] LEE W. Estimate of local average power of a mobile radio signal[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1985, 34(1):22–27.
- [3] AUSTIN M, STUBER G. Velocity adaptive handoff algorithms for microcellular systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994, 43(3):549–561.
- [4] DE LA VEGA D, LOPEZ S, MATIAS J, et al. Generalization of the Lee Method for the Analysis of the Signal Variability[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2):506 –516.
- [5] BALASUBRAMANIAN A, MAHAJAN R, VENKATARAMANI A. 2010. Augmenting mobile 3G using WiFi[C]//Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services, MobiSys '10.
- [6] ITOH K, WATANABE S, SHIH J, et al. Performance of handoff algorithm based on distance and RSSI measurements[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(6):1460–1468.
- [7] ZHANG N, HOLTZMAN J. Analysis of handoff algorithms using both absolute and relative measurements[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1996, 45(1):174–179.
- [8] ZHU H, YANG Q, KWAK K. Performance analysis of fast handoff with mobility prediction[C]//IEEE International Symposium on Communications and Information Technology, 2005 , 1:75–78.

- [9] ANDERSEN J, RAPPAPORT T, YOSHIDA S. Propagation measurements and models for wireless communications channels[J]. Communications Magazine, IEEE, 1995, 33(1):42–49.
- [10] SARKAR T, JI Z, KIM K, et al. A survey of various propagation models for mobile communication[J]. Antennas and Propagation Magazine, IEEE, 2003, 45(3):51–82.
- [11] OSTLIN E, SUZUKI H, ZEPERNICK H J. Evaluation of the Propagation Model Recommendation ITU-R P.1546 for Mobile Services in Rural Australia[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(1):38 –51.
- [12] AKHOONDZADEH-ASL L, NOORI N. Modification and Tuning of the Universal Okumura-Hata Model for Radio Wave Propagation Predictions[C]//Asia-Pacific Microwave Conference, 2007., 2007:1 –4.
- [13] MEDEISIS A, KAJACKAS A. On the use of the universal Okumura-Hata propagation prediction model in rural areas[C]//IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000., 2000, 3:1815–1818.
- [14] BJORNSON E, OTTERSTEN B. A Framework for Training-Based Estimation in Arbitrarily Correlated Rician MIMO Channels With Rician Disturbance[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3):1807 –1820.
- [15] SIJBERS J, DEN DEKKER A, SCHEUNDERS P, et al. Maximum-likelihood estimation of Rician distribution parameters[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1998, 17(3):357–361.
- [16] MARZETTA T. EM algorithm for estimating the parameters of a multivariate complex Rician density for polarimetric SAR[C]//International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1995., 1995, 5:3651–3654.
- [17] KOLAR V, RAZAK S, MÄHÖNEN P, et al. Link quality analysis and measurement in wireless mesh networks[J]. Ad Hoc Netw., 2011, 9(8):1430–1447.

- [18] REIS C, MAHAJAN R, RODRIG M, et al. 2006. Measurement-based models of delivery and interference in static wireless networks[C]//Proceedings of the 2006 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, SIGCOMM '06.
- [19] KASHYAP A, GANGULY S, DAS S R. 2007. A measurement-based approach to modeling link capacity in 802.11-based wireless networks[C]//Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '07.
- [20] CHEN X, GANGWAL P, QIAO D. RAM: Rate Adaptation in Mobile Environments[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(3):464 –477.
- [21] JUDD G, WANG X, STEENKISTE P. 2008. Efficient channel-aware rate adaptation in dynamic environments[C]//Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services, MobiSys '08.
- [22] LENDERS V, MARTONOSI M. Repeatable and Realistic Experimentation in Mobile Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8:1718–1728.
- [23] KIM K H, MIN A W, SHIN K G. 2010. Sybot: an adaptive and mobile spectrum survey system for Wi-Fi networks[C]//Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '10.
- [24] HALPERIN D, HU W, SHETH A, et al. 2010. Predictable 802.11 packet delivery from wireless channel measurements[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2010 conference, SIGCOMM '10.
- [25] RAYANCHU S, SHRIVASTAVA V, BANERJEE S, et al. 2011. FLUID: improving throughputs in enterprise wireless lans through flexible channelization[C]//Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '11.
- [26] KIM W, KHAN O, TRUONG K, et al. An Experimental Evaluation of Rate Adaptation for Multi-Antenna Systems[C]//INFOCOM 2009, 2009:2313 –2321.

- [27] PEFKIANAKIS I, HU Y, WONG S H, et al. 2010. MIMO rate adaptation in 802.11n wireless networks[C]//Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '10.
- [28] ZHANG J, TAN K, ZHAO J, et al. A Practical SNR-Guided Rate Adaptation[C]//INFOCOM 2008, 2008:2083–2091.
- [29] LI C Y, PENG C, LU S, et al. 2012. Energy-based rate adaptation for 802.11n[C]//Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking, Mobicom '12.
- [30] FIETKAU F. Minstrel rate control algorithm for mac80211[M], 2005. http://madwifi-project.org/browser/madwifi/trunk/ath_rate/minstrel.
- [31] WONG M, GILBERT J, BARRATT C. Wireless LAN using RSSI and BER parameters for transmission rate adaptation[M], 2008. US Patent 7,369,510.
- [32] BOPPANA R, SU X. On the Effectiveness of Monitoring for Intrusion Detection in Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(8):1162–1174.
- [33] FLOYD S, HANDLEY M, PADHYE J, et al. 2000. Equation-based congestion control for unicast applications[C]//Proceedings of the conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication, SIGCOMM '00.
- [34] HATA M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1980, 29(3):317–325.
- [35] GUDMUNDSON M. Correlation model for shadow fading in mobile radio systems[J]. Electronics letters, 1991, 27(23):2145–2146.
- [36] TEPEDELENLİOĞLU C, ABDI A, GIANNAKIS G, et al. Estimation of Doppler spread and signal strength in mobile communications with applications to handoff and adaptive transmission[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2001, 1(2):221–242.

- [37] GOPAL L, SINGH A, SHANMUGAM V. Power Estimation in Mobile Communication Systems[J]. Computer and Information Science, 2009, 1(3):P88.
- [38] MOUSA A, MAHMOUD H. Channels estimation in OFDM system over rician fading channel based on comb-type pilots arrangement[J]. Signal Processing, IET, 2010, 4(5):598 –602.
- [39] SALEH A, VALENZUELA R. A statistical model for indoor multipath propagation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1987, 5(2):128–137.
- [40] GOLDSMITH A, GREENSTEIN L, FOSCHINI G. Error statistics of real-time power measurements in cellular channels with multipath and shadowing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994, 43(3):439–446.
- [41] AJA-FERNÁNDEZ S, NIETHAMMER M, KUBICKI M, et al. Restoration of DWI data using a Rician LMMSE estimator[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2008, 27(10):1389–1403.
- [42] DEVORE M, LANTERMAN A, O SULLIVAN J. ATR performance of a Rician model for SAR images[C]//PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 2000:34–47.
- [43] Atheros Linux wireless drivers[M]. <http://linuxwireless.org/en/users/Drivers/ath9k>.
- [44] The MadWifi Project[M]. <http://madwifi-project.org>.
- [45] NIST/SEMATECH. e-Handbook of Statistical Methods[M], 2012. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.
- [46] PERAHIA E, STACEY R. Next Generation Wireless LANs: throughput, robustness and reliability in 802.11n[J]. Recherche, 2008, 67:02.
- [47] AHMED N, ISMAIL U, KESHAV S, et al. 2008. Online estimation of RF interference[C]//Proceedings of the 2008 ACM CoNEXT Conference, CoNEXT '08.

- [48] DEEK L, GARCIA-VILLEGAS E, BELDING E, et al. 2011. The impact of channel bonding on 802.11n network management[C]//Proceedings of the Seventh Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies, CoNEXT '11.
- [49] DUJOVNE D, TURLETTI T, FILALI F. A Taxonomy of IEEE 802.11 Wireless Parameters and Open Source Measurement Tools[J]. Communications Surveys Tutorials, IEEE, 2010, 12(2):249 –262.
- [50] HIERTZ G R, DENTENEER D, STIBOR L, et al. The IEEE 802.11 universe[J]. Comm. Mag., 2010, 48(1):62–70.
- [51] KIM K H, SHIN K G. 2006. On accurate measurement of link quality in multi-hop wireless mesh networks[C]//Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '06.
- [52] PELECHRINIS K, SALONIDIS T, LUNDGREN H, et al. 2010. Experimental characterization of 802.11n link quality at high rates[C]//Proceedings of the fifth ACM international workshop on Wireless network testbeds, experimental evaluation and characterization, WiNTECH '10.
- [53] SEVANI V, RAMAN B. SIR based interference modeling for wireless mesh networks: A detailed measurement study[C]//Fourth International Conference on Communication Systems and Networks. COMSNETS 2012.
- [54] ZHAO J, GOVINDAN R. 2003. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, SenSys '03.
- [55] BALAN H V, ROGALIN R, MICHALOLIAKOS A, et al. 2012. Achieving high data rates in a distributed MIMO system[C]//Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking, Mobicom '12.
- [56] BHARTIA A, CHEN Y C, RALLAPALLI S, et al. 2011. Harnessing frequency diversity in Wi-Fi networks[C]//Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '11.

- [57] CHAI E, LEE J, LEE S J, et al. 2012. Building efficient spectrum-agile devices for dummies[C]//Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking, Mobicom '12.
- [58] GOLLAKOTA S, ADIB F, KATABI D, et al. 2011. Clearing the RF smog: making 802.11n robust to cross-technology interference[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 conference, SIGCOMM '11.
- [59] GUDIPATI A, KATTI S. 2011. Strider: automatic rate adaptation and collision handling[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 conference, SIGCOMM '11.
- [60] MAGISTRETTI E, CHINTALAPUDI K K, RADUNOVIC B, et al. 2011. WiFi-Nano: reclaiming WiFi efficiency through 800 ns slots[C]//Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '11.
- [61] MAGISTRETTI E, GUREWITZ O, KNIGHTLY E. 2010. Inferring and mitigating a link's hindering transmissions in managed 802.11 wireless networks[C]//Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '10.
- [62] MANWEILER J, ROY CHOUDHURY R. 2011. Avoiding the rush hours: WiFi energy management via traffic isolation[C]//Proceedings of the 9th international conference on Mobile systems, applications, and services, MobiSys '11.
- [63] NGUYEN N P, DINH T N, TOKALA S, et al. 2011. Overlapping communities in dynamic networks: their detection and mobile applications[C]//Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '11.
- [64] QIAN F, WANG Z, GERBER A, et al. 2011. Profiling resource usage for mobile applications: a cross-layer approach[C]//Proceedings of the 9th international conference on Mobile systems, applications, and services, MobiSys '11.

- [65] ROZNER E, NAVDA V, RAMJEE R, et al. 2010. NAPman: network-assisted power management for wifi devices[C]//Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services, MobiSys '10.
- [66] SANADHYA S, SIVAKUMAR R, KIM K H, et al. 2012. Asymmetric caching: improved network deduplication for mobile devices[C]//Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking, Mobicom '12.

致 谢

逝者如斯！值此毕业论文即将杀青之际，希望能够通过简短的文字，对各位老师、同学、朋友、亲人，以及其他有关的人、事、物，表达最真挚的谢意！

首先衷心感谢我的指导老师龙承念教授，正是在龙老师的悉心指导下，使得我在研究生阶段积累了宝贵的研究经历。龙老师在科学上认真严谨，为我们树立了榜样，同时在学术问题的探讨上事无巨细，促使我们塑造良好的科学态度。在科研项目的申请、执行与总结的过程中，龙老师积极引导并鼓励我们参与其中，使得我们对问题有更深刻的认识。在学术问题与论文写作方面，龙老师严格要求并竭力指导。所有这些经历都是我今后人生中不可或缺的宝贵财富！

其次我要感谢实验室其他老师的指导与建议，关新平教授、陈彩莲副教授和杨博副教授多次提出宝贵的建议，并提供了良好的学习与实验的环境，从而使我能够更好的投入到学术研究与论文写作之中。同时感谢本文在学院盲审过程中老师提出的修改意见，本文的最终成稿离不开评审老师的批评与指正。

感谢实验室的师兄师姐及其他同学，在与他们的学习与交流过程中，使我们学习到许多新的知识与方法，包括通信、控制及编程等方面的内容。同时我要感谢参与 PRP 项目的各位本科生同学，感谢他们在软件开发、报告总结及论文撰写过程中的辛勤工作！在论文的写作过程中，还得到了 ath9k 开源社区及其它社区成员的指导与帮助，包括出现在参考文献中各位作者及计算机与通信领域各位前辈的卓越贡献，同时得到了上海交通大学图书馆、ACM、IEEE 等机构的资源支持，在此一并致以诚挚的谢意！

最后感谢我的家人，感谢他们在学业与生活上给予我的支持、理解与关怀，他们是使我不断努力学习的最强大动力！再次感谢曾经关心与帮助过我的所有人！

攻读学位期间发表的学术论文目录

- [1] YONGSEN MA, XIAOFENG MAO, PENGYUAN DU, CHENGNIAN LONG, AND Bo LI. Dynamic estimation of local mean power in GSM-R networks[J]. under reviewing of Springer Wireless Networks.
- [2] YONGSEN MA, JING WU, CHENGNIAN LONG, AND Bo LI. Online measurement and prediction of packet delivery in mobile 802.11n networks[J]. under processing of IEEE Transactions on Mobile Computing.
- [3] YONGSEN MA, PENGYUAN DU, XIAOFENG MAO, AND CHENGNIAN LONG. On-line and dynamic estimation of Rician fading channels in GSM-R networks[C]. In WCSP' 12, October 2012.
- [4] PENGYUAN DU, LUJIN LUO, YONGSEN MA, AND CHENGNIAN LONG. A dual-antenna based handover scheme for GSM-R network[C]. In WCSP' 12, October 2012.
- [5] 龙承念, 马永森, 茅晓峰. 结合 GIS 的 GSM-R 网络通信质量测试系统. 中国, CN102595445A[P]. July 2012.
- [6] 龙承念, 马永森, 茅晓峰. GSM-R 网络接收信号强度动态测试算法. 中国, CN102571238A[P]. July 2012.
- [7] 龙承念, 马永森, 茅晓峰, 王英杰, 黎凌宇, 骆理. GSM-R 网络空中接口在线测试与预警系统. 中国, CN102438270A[P]. May 2012.
- [8] 马永森, 茅晓峰, 龙承念. GSM-R 网络空中接口测试系统 v1.0. 中国, 2011SR076399[P]. September 2011.

攻读学位期间参与的项目

- [1] 铁道部重点课题 “GSM-R 网络通信质量测试技术研究”
- [2] 国家自然科学基金 “认知无线网络动态频谱拍卖机制与优化算法研究”
- [3] 国家自然科学基金 “智能电网中需求响应与能量有效协同优化与控制”