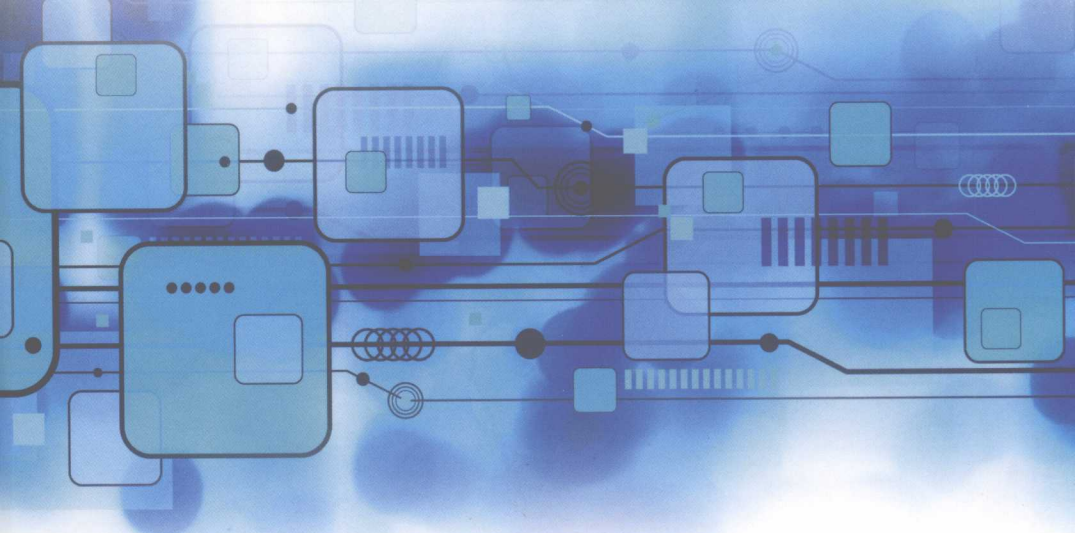




郭业才 著

非线性信道 模型及其仿真

清华大学出版社



郭业才 著

非线性信道 模型及其仿真

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

卫星信道建模与均衡技术是卫星通信领域的关键技术。研究该技术有助于提高卫星通信系统业务的可行性与质量。本书以卫星通信信道为研究对象、以卫星通信信道的非线性为立足点,开展非线性信道模型建立与均衡技术研究。

本书适合信息与通信工程、控制科学与工程、智能科学与技术等学科专业的工程技术人员、研究人员和研究生阅读。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

非线性信道模型及其仿真/郭业才著. —北京:清华大学出版社,2019
ISBN 978-7-302-51682-8

I. ①非… II. ①郭… III. ①非线性信道—信道模型—研究 ②非线性信道—仿真—研究 IV. ①TP84

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 264263 号

责任编辑:梁颖 李晔

封面设计:常雪影

责任校对:李建庄

责任印制:丛怀宇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:20.25 字 数:353 千字

版 次:2019 年 4 月第 1 版

印 次:2019 年 4 月第 1 次印刷

定 价:108.00 元

产品编号:080480-01

前言

随着信息全球化速度的加快,互联网、数据多媒体通信以及视频、音频业务的增长,通信个体化、机动性及无覆盖需求的增加,卫星通信正利用通信距离远、通信费用与距离无关、覆盖面积大、不受地理条件限制、通信频带宽、传输容量大、适用于多种业务传输等优点,向具有其独特优势的方向发展。然而,卫星通信系统所能提供业务的可行性与质量,在很大程度上受移动终端与通信卫星间信道特性的影响。为了研究这些影响,可以采用能够反映卫星信道真实特性的信道模型,这是一个有效可行的解决方案。可以毫不夸张地说,只有建立贴近卫星信道实际特性的信道模型,才能揭开卫星信号在信道传输过程中产生衰落、畸变或失真的机制,也才能进一步研究消除卫星信号衰落、畸变或失真的方案。脱离卫星通信环境或对其考虑不周都很难设计出有效的方案。

本书作者及其团队多年来以卫星通信信道为研究对象、以卫星通信信道的非线性为立足点,开展非线性信道模型建立与均衡技术研究。本书是点滴研究成果的汇集,主要涉及卫星信道模型及建立在信道模型基础上的均衡理论、技术与应用等研究内容,形成了从卫星信道建模到卫星信道均衡的理论与技术成果体系,体现了内容的先进性、实用性和系统性,层次分明、可读性强,有助于读者理解和掌握相关理论。全书由7章组成。第1章在分析卫星通信质量影响因素的基础上,对卫星信道建模和均衡技术国内外研究现状进行了综述,并从系统论视角出发,提出了研究内容。第2章简要分析了卫星通信系统的基本组成、基本参数、卫星信道分层传播特性、经典的卫星信道模型及二阶统计特性参数、卫星信道模型仿真方法等内容。第3章分析了大气环境与地面环境下卫星信道状态,建立了卫星信道多状态 Markov 链模型并进行了仿真。第4章针对卫星内部行波管放大器及群时延引起的非线性,建立了高斯噪声和 α 稳定分布噪声背景下非线性

信道模型及基于行波管放大器和群时延联合效应的非线性信道模型,通过仿真验证了模型的有效性。第5章和第6章利用已建立的非线性信道模型,将各种新技术融入均衡技术中,研究了非线性信道均衡算法,并验证了算法的性能。第7章以卫星MIMO信道和分子MIMO信道为研究对象,分析了MIMO信道多状态Markov链模型和机器学习模型及仿真方法。

本书成果得到了国家自然科学基金(61673222)、江苏省自然科学基金(BK2009410)、江苏省高校自然科学研究重大项目(13KJA510001)、江苏省高等学校自然科学基金(08KJB510010)、江苏高校优势学科建设二期“信息与通信工程”等项目资助。其中的一些成果已经陆续在国内外重要学术会议和期刊上发表,同时本书也吸收了一些优秀著作、学术论文和诸多相关作者的成果,引用的部分已在书中注明出处。本书成果反映了卫星通信关键技术研究最新动态和前沿趋势。

与本书作者共同研究的人员有:张秀再、韩迎鸽、饶伟、杨超、廖娟、丁锐、季童莹、胡苓苓、黄伟、孙静、丁雪洁、王卫、徐文才、李宝鸽、赵卫娟、柏鹤、袁涛、章涛、徐冉、姚超然等。本书的出版得到了清华大学出版社的大力支持。在此,向参与本书成果研究的人员、本书所引用成果的作者及清华大学出版社,表示诚挚的谢意!

由于作者水平和经验有限,本书的研究在深度和广度上有待进一步完善,不当之处难免,敬请读者批评指正!

郭业才

2018年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星信道建模研究	3
1.1.1 信道单状态模型	4
1.1.2 信道多状态模型	4
1.1.3 Ka 波段卫星信道统计特性	6
1.1.4 卫星信道模拟仿真研究	6
1.2 卫星信道均衡研究	7
1.3 本书主要内容	9
参考文献	9
第 2 章 卫星信道模型建立的理论基础	15
2.1 卫星通信系统的基本组成	16
2.2 卫星通信链路的基本参数	18
2.3 卫星信道分层传播特性	21
2.3.1 外层空间	22
2.3.2 散逸层、热层与中间层	23
2.3.3 平流层与对流层	25
2.4 经典的卫星信道模型	38
2.4.1 常用的概率分布函数	38
2.4.2 经典的卫星信道模型	45
2.5 卫星信道的统计特性参数	53
2.5.1 一阶统计特性	54
2.5.2 二阶统计特性	54

2.5.3	多普勒功率谱	57
2.6	卫星信道模型仿真方法	59
2.6.1	有色高斯噪声的产生方法	59
2.6.2	多普勒系数及多普勒频率的计算方法	60
2.6.3	多普勒相位的计算方法	63
2.6.4	经典的信道模型仿真实现方法	64
	参考文献	67
第3章	卫星信道多状态 Markov 链模型	71
3.1	卫星信道 2-状态 Markov 链模型	72
3.2	卫星信道 3-状态 Markov 链模型	82
3.2.1	大气环境信道模型	82
3.2.2	地面环境信道模型	83
3.2.3	卫星信道 3-状态 Markov 链模型	85
3.2.4	卫星信道 3-状态 Markov 链模型统计特性	87
3.2.5	卫星信道 3-状态 Markov 链模型仿真方法	88
3.3	信道 5-状态 Markov 链模型	106
3.3.1	信道 5-状态 Markov 链模型	106
3.3.2	仿真验证	109
3.4	信道 6-状态 Markov 链模型中断概率	111
3.4.1	信道 6-状态 Markov 链模型分析	112
3.4.2	仿真验证	115
3.5	基于主成分分析法和模糊聚类法的卫星信道模型	117
3.5.1	卫星信道建模关键影响因素分析	118
3.5.2	卫星信道的状态数分析	119
3.5.3	卫星信道多状态 Markov 链模型	122
3.5.4	仿真验证	123
	参考文献	126
第4章	基于不同背景下的非线性卫星信道模型	131
4.1	非线性卫星信道模型	132
4.1.1	行波管放大器模型	132
4.1.2	群时延模型	134
4.2	高斯噪声背景下非线性卫星信道模型与均衡系统	135

4.2.1	非线性卫星信道 Wiener 模型和 Hammerstein 模型	136
4.2.2	仿真验证	140
4.3	α 稳定分布噪声背景下非线性卫星信道模型与均衡系统 ..	142
4.3.1	α 稳定分布模型	142
4.3.2	非线性卫星信道的自适应神经模糊推理系统模型	145
4.3.3	仿真验证	147
4.4	基于行波管放大器和群时延的非线性卫星信道建模算法	149
4.4.1	线性群时延滤波器设计	150
4.4.2	行波管放大器非线性和群时延的组合效应	150
4.4.3	基于信道先验信息的非线性信道模型	152
	参考文献	160

第 5 章 基于多小波和回声状态网络的非线性信道盲均衡算法

5.1	非线性卫星信道 Volterra 盲均衡系统	164
5.1.1	TWTA 的非线性对调制信号的影响	165
5.1.2	基于非线性滤波器的盲均衡算法	166
5.1.3	Volterra 盲均衡算法	168
5.1.4	基于平衡正交多小波双变换的非线性盲均衡算法 ..	169
5.1.5	仿真验证	175
5.2	基于多小波神经网络的非线性盲均衡算法	177
5.2.1	神经网络模型	177
5.2.2	基于多小波神经网络的非线性盲均衡算法	179
5.2.3	仿真验证	182
5.3	基于支持向量机和神经网络的非线性盲均衡算法	184
5.3.1	支持向量机基础	184
5.3.2	支持向量机回归原理	188
5.3.3	基于空间分集支持向量机的多小波神经网络盲均衡算法	190
5.3.4	仿真验证	195
5.4	基于混沌算法优化的双神经网络盲均衡算法	197
5.4.1	混沌算法基础	197
5.4.2	混沌优化过程	198

5.4.3	基于混沌算法优化多小波双神经网络的非线性盲均衡算法	201
5.4.4	仿真验证	203
5.5	基于 Volterra 滤波回声状态网络结构和 PCA 的均衡算法	204
5.5.1	回声状态网络	205
5.5.2	平均状态熵-回声状态网络	207
5.5.3	信道均衡原理	208
5.5.4	仿真验证	210
	参考文献	216
第 6 章	非线性 Volterra 信道盲均衡算法	221
6.1	非线性信道自适应均衡算法	222
6.1.1	非线性信道自适应均衡模型	222
6.1.2	非线性信道自适应均衡算法	225
6.2	基于 Volterra 均衡器改进结构的非线性信道均衡算法	228
6.2.1	非线性信道 Volterra 均衡器改进结构	228
6.2.2	仿真验证	232
6.2.3	计算复杂度	233
6.3	基于线性 MMSE 的非线性信道 Turbo 盲均衡算法	234
6.3.1	系统描述	235
6.3.2	基于线性 MMSE 的非线性信道 Volterra-Turbo 均衡算法	236
6.3.3	基于线性 MMSE 的迭代盲均衡算法	242
6.4	基于非线性 Volterra 信道的线性频域 Turbo 均衡算法	246
6.4.1	循环模型中的可用符号	247
6.4.2	频域非线性 Volterra 信道模型	247
6.4.3	线性频域 Volterra-MMSE 均衡器	250
6.4.4	仿真验证	253
6.5	基于最大相关熵 Volterra 滤波器非线性信道均衡稳态算法	254
6.5.1	算法理论	255
6.5.2	Volterra-CMCC 算法	256
6.5.3	稳态性能	258

6.5.4	仿真验证	261
6.6	基于模糊神经网络控制的复数神经网络多项式 Volterra	
	信道盲均衡算法	263
6.6.1	模糊神经网络算法	263
6.6.2	复数神经多项式网络算法	266
6.6.3	模糊神经网络控制的复数神经多项式 Volterra	
	信道盲均衡算法	267
6.6.4	仿真验证	271
	参考文献	274

第7章 卫星 MIMO 信道 Markov 链模型及分子

	MIMO 信道机器学习模型	278
7.1	SISO 和 MIMO 信道增强 2-状态 Markov 链模型	279
7.1.1	改进的增强 2-状态 Markov 链模型	279
7.1.2	测试分析	285
7.2	LMS-MIMO 信道经验随机 Markov 链模型	288
7.2.1	LMS-MIMO 信道 Markov 链模型	289
7.2.2	测量设置	291
7.2.3	模型生成	293
7.2.4	小尺度衰落信道 LMS-MIMO 模型验证	298
7.3	分子 MIMO 信道机器学习模型	302
7.3.1	系统模型	303
7.3.2	分子 MIMO 信道模型	304
7.3.3	仿真验证	307
	参考文献	310



第1章 绪 论

导 读

本章在分析卫星通信质量影响因素基础上,对卫星信道模型(单状态模型、多状态模型、Ka 波段模型及仿真模型等)建立和均衡方法(自适应均衡和盲自适应均衡)研究所取得的主要成果进行了概述。针对现有研究模型与方法的不足,从系统论视角出发,以卫星信道模型建立及卫星信道均衡方法为研究内容。

第1章 绪论

卫星通信简单地说就是地球上(包括地面和低层大气中)的无线电通信站间利用卫星作为中继而进行的通信。卫星通信系统由卫星和地球站两部分组成。卫星通信范围大,易于实现越洋和洲际通信;只要在卫星发射电波所覆盖的范围内,任何两点之间都可进行通信;同时,可在多处接收,能经济地实现广播、多址通信(多址特点);电路设置非常灵活,可随时分散过于集中的话务量;同一信道可用于不同方向或不同区间(多址联接)。在卫星通信中,卫星在空中起中继站的作用,即把地球站发来的电磁波放大后再反送回另一地球站。而卫星数据传输容量与质量,除受卫星设备本身(如行波管放大器)性能的影响,还受星地链路环境和地面环境(称之为物理通道或物理信道)的影响。主要有大气气体、电离层与对流层、云、雨、冰结晶体、星蚀与日凌及风暴、地球表面及表面上物体及电磁环境干扰、地球站设备的杂波干扰、互调干扰、相邻信道干扰、交叉极化干扰、人为恶意干扰和宇宙噪声、大气噪声、太阳噪声、天电噪声、地面噪声等因素的影响。这些因素会使卫星信道产生**衰落效应**(主要由大气气体、雨、雾、云、冰结晶体、地球表面及表面上物体等因素引起)、**多径效应**(主要由大气气体、地球表面及表面上物体等因素引起)、**阴影效应**(主要由树木和建筑物等因素引起)、**信道噪声**(各种干扰因素与各种噪声引起)、**多普勒效应**(由卫星与地面接收站点之间相对运动引起)、**时变效应**(由各因素影响导致的接收端信号幅度和相位的迅速波动引起,预测时难以准确及时地改变预测模式,信道呈时变特性^[1])、**非线性效应**(由卫星中非线性行波管放大器、非线性物理信道、非线性接收机引起^[2])、**非平稳性**(由物理环境与气象因素起伏的变化引起^[3])和**传播延迟效应**(由对流层与电离层等因素引起)。

卫星信道的这些特性,还受卫星通信频段的影响。最适合卫星通信的

频段为 $1\sim 10\text{GHz}$, 即微波频段。为了提高卫星传输数据容量与质量, 卫星通信频段正向 10GHz 以上(如 12GHz 、 14GHz 、 20GHz 及 30GHz 等)频段延伸; 信号调制方式由常模包络调制信号(如 multilevel phase shift keying, M-PSK)正向非常模包络调制信号(如 quadrature amplitude modulation, QAM)发展。然而, 在高频时, 卫星信道的衰减、阴影、多径、时变、非线性等效应更加严重, 这又使得高阶调制信号的非线性畸变、码间干扰与信道间干扰非常突出, 进一步影响着卫星传输数据质量。这些已成为卫星通信领域亟待解决的关键技术问题。

解决这一关键技术, 首先要根据卫星数据传输环境的复杂性, 建立逼近实际的卫星信道模型, 以真实反映卫星信道的物理状态, 并通过仿真实验与实际接收数据进行对比, 以验证模型的正确性; 其次, 要根据卫星信道的特性, 建立卫星信道对数据传输影响的补偿理论(又称均衡理论)与方法, 以提高卫星地面接收系统接收数据的容量与质量。

1.1 卫星信道建模研究

在对卫星信道传输特性的研究中, 主要有三种用于描述信道传播特性的模型, 分别为经验模型、几何模型以及统计模型。经验模型是通过数学拟合方法对测量数据进行处理并建立相应的简单公式; 几何模型根据障碍物的空间分布, 利用散射理论或射线跟踪方法对接收信号的传播特性进行描述; 统计模型是通过不同概率分布函数的组合来模拟不同环境下接收信号的统计特性^[4]。经验模型能够对重要参数的敏感度进行描述, 但对信号传播过程的本质却无法说明。几何模型可对单个或多个散射源的作用进行预测, 并对信号的衰落现象进行解释, 但其分析过程十分复杂。与经验模型和几何模型相比较, 统计模型对信号的实际传输情况进行了简化处理, 分析过程也较为简单且物理意义明显。因此, 通常采用统计模型对卫星信道传输特性进行研究。统计模型根据其描述信道状态的不同又可分为单状态和多状态两类。信道单状态模型主要用于对平稳的、单一信道环境进行描述; 信道多状态模型中不同状态分别对应于不同的概率密度分布, 常用于对非平稳的、不断变化的动态环境的描述。

1.1.1 信道单状态模型

Clarke 于 1968 年提出了描述平坦小尺度衰落的统计模型,该模型是基于散射原理且假设接收终端接收信号为多个平面波的叠加,该模型也被称作 Clarke 模型^[5]。Suzuki 在 1977 年将小尺度瑞利衰落与大尺度阴影衰落结合起来,构成服从 Rayleigh-Lognormal 分布的 Suzuki 模型^[6]。该模型假设信道环境中不存在明显区别于它径的主径,主要用于无直视分量存在的典型城市环境。1985 年,C. Loo 提出用两径模型对 L 波段传输信道进行建模^[7],他认为接收信号是由主径和从径两部分构成,其中主径受阴影遮蔽效应影响,而从径属纯多径分量。C. Loo 模型将瑞利过程与对数正态过程相结合,因从径没有受阴影衰落影响,故又被称为部分阴影模型,该模型主要适用于乡村、近郊等较开阔地区。Corazza 在 1994 年提出了全阴影信道模型^[8],该模型将 Rice 过程和对数正态过程综合考虑,通过对 L 波段实际卫星链路的测试,给出了 L 波段卫星信道 Corazza 模型参数的经验公式,该模型可用于多种卫星移动信道环境的描述。

Suzuki 模型、C. Loo 模型以及 Corazza 模型是三种经典的卫星移动信道模型。之后的许多信道模型都是这三种模型的衍生物。1998 年,Pätzold 在 Suzuki 模型基础上引入直视分量,采用相关色高斯噪声建模,提出了扩展 Suzuki 模型^[9]。在 C. Loo 模型中,将描述主径阴影遮蔽效应的对数正态分布改为 Nakagami 分布,就形成了 Abdi 模型^[10]。在 Corazza 模型基础上,假设直视分量与多径分量分别受相互独立的阴影衰落作用,就形成了独立阴影模型^[11]。在 Corazza 模型基础上,2002 年,文献[12]提出了一种用于描述非城市区域信道传输特性的统计模型,该模型采用 K 分布取代对数正态分布来描述阴影遮蔽效应引起的信道衰落特性。2003 年,文献[13]提出了 Lognormal-Rice-Rayleigh 模型(简称 LR²模型),该模型通过对模型参数设置可表示为其他几种经典的卫星移动信道统计模型。图 1.1 给出了几种卫星信道模型之间的相互关系。

1.1.2 信道多状态模型

当移动终端在大范围环境里不断移动时,信道单状态模型就无法准确描述实际不断变化的卫星信道特性,此时的信道特性可用信道多状态模型描述。Lutz 在 1991 年提出了一种信道 2-状态模型^[14],该模型根据接收信

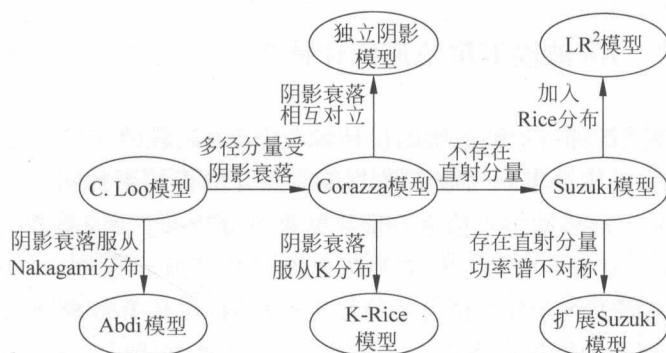


图 1.1 卫星信道单状态模型间关系图

号中是否存在直视分量,将信道环境分为“好”与“坏”两种状态。2001年,Fontan提出了广域环境下的陆地移动卫星信道模型^[15],该模型根据信号受阴影遮蔽程度的不同将信道划分为三个状态,通过对C. Loo模型参数的不同设置来描述信道不同状态。H. P. Lin在2004年提出了依据传输损耗划分为不同等级,且每一等级又划分为若干状态的两等级、多状态Markov模型^[16]。在此基础之上,2005年文献^[17]提出了一种陆地卫星移动信道6-状态Markov链模型,该模型根据接收信号阴影衰落程度将接收信号划分为两个状态,每个状态都包含三个不同的子状态。2006年,文献^[18]对Lutz模型进行了扩展,提出3-状态Markov链 R^M 模型。

在建立信道多状态Markov链模型前,需对信道的状态数以及各状态所受影响因素进行人为假设,这种假设往往是依据经验进行的,缺乏理论支持。文献^[19-22]首次将主成分分析法和模糊聚类法相结合,对移动卫星信道进行建模,该模型对信道状态数目以及信号所受主要影响因素不做任何假定。具体做法:首先对影响信道传输特性的因素进行量化,利用主成分分析法对量化数据进行处理,提取影响卫星通信质量的主要因素并选择相应的概率分布进行描述。其次,对信道状态数和状态转移矩阵进行初始化处理,利用模糊聚类法对初始数据进行数据迭代运算,得到更新的状态数以及状态转移概率矩阵;再次,根据Markov链实现状态转换。该方法科学准确地确定了信道状态数以及各状态衰落分布,避免了人为假设造成误差。信道多状态模型中的相同部分大都是从多次试验结果中总结得到的,具有较高的可信度,而不同部分则表现了实际不同传输环境下信道特性,且状态数越多,对信道特性的描述越详尽且准确度越高。但随着信道状态数增加,信道建模参数也会增多,其仿真也会变得更加复杂。

1.1.3 Ka 波段卫星信道统计特性

卫星信道的拥挤迫使系统的设计者考虑 Ka 波段的应用^[23-25]。在高频段,卫星数据传输受不同气象条件与传输媒介的影响更加明显。1998 年,C. Loo 对 L 频段移动卫星信道测量数据进行分析并扩展,得出:受天气影响的 Ka 频段卫星接收信号包络和相位均服从高斯分布^[26]。2001 年,W. Li 考虑到不同天气条件对信道传输特性的影响,在 C. Loo 模型的基础上对 Ka 频段陆地移动卫星信道进行了建模^[27]。之后,文献[28-32]对 Ka 频段卫星通信中雨衰、大气吸收、云衰、散射以及大气层闪烁等因素对信道衰落的影响进行了研究,并建立了描述 Ka 频段卫星信道统计模型。2014 年,Kourogorgas C. 提出了一种雨衰统计动态模型^[33],用以描述降雨造成的近地轨道卫星链路中信号的衰减。

随着卫星通信技术的不断发展,卫星通信的工作频率越来越高,在链路中信号受大气环境中各种衰落因子的影响也越来越明显。

1.1.4 卫星信道模拟仿真研究

在卫星通信系统的研究过程中,由于条件的限制无法实现对信道的实时测试,因此通常采用信道模拟器(channel emulator)实现不同环境下信道衰落特性的描述。卫星信道特性的模拟仿真可借助软件和硬件实现,这两种方法均能很好地对实际的卫星信道传输特性进行模拟。软件模拟的灵活性较高,可以方便地对各种统计模型进行仿真以及性能比较。但在实际的硬件调试中,软件模拟由于计算量较大而导致实时性较差。通过硬件实现的信道模拟器可让研究人员实时地测试通信样机的性能,可大大提高研发工作的效率。但其设计较为复杂,花费成本较高,也使得硬件的实现存在较大难度。

目前,卫星信道的软件模拟可基于 MATLAB 平台实现^[34-35],其信道模型的实现方法主要有正弦波叠加法(sum-of-sinusoid, SOS)和成形滤波器法^[36-37]。正弦波叠加法的运算量相对较小且方便实用,但其仿真性能存在一定的局限性。成形滤波器法则要求带宽远低于其抽样速率,因而实现起来较为复杂。在硬件实现上,日本通信研究实验室设计的一种陆地卫星移动通信信道模拟器能够模拟信道传输特性中的多径与阴影衰落效应^[38]。

同年,C. Loo 利用白高斯随机过程设计了陆地卫星移动衰落信道模拟器^[39]。2000 年我国电子科技大学也完成了卫星移动信道模拟器原理样机的设计^[40]。

目前,只有较少的几家国外公司拥有卫星信道模拟器的实物产品。美国 dBm 公司研制的 SLE900 卫星信道链路模拟器,可以对卫星通信信道的时延、频偏、瑞利衰落、莱斯衰落、高斯白噪声等信道特性进行仿真。美国 GLOCOM 公司的型号为 SCATT8906 的设备则将通信环境划分为海洋和陆地,利用瑞利和莱斯衰落模型,对多径衰落、多普勒频移等影响因素进行仿真。澳大利亚电信研究所研制的 MSCS-1 信道模拟器则采用 Markov 过程对信道模型的时变参数进行调整,从而实现时对变信道的模拟。这些信道模拟器大多都用于地面移动信道中几个重要影响因素的模拟,而忽略了他因素对信道的影响。因此,有必要对卫星信道作进一步研究,从而实现多种环境因素影响的信道特性的描述。

1.2 卫星信道均衡研究

目前,以陆地移动卫星为研究对象,减小或消除卫星信道对传输数据容量与质量影响的方法主要有两类:基于发射机的方法^[41-45]和基于接收机的方法^[46-60]。其中,基于发射机的方法非常复杂,不适合高速数据通信系统。而基于接收机的方法是通过均衡技术实现的。均衡技术是指在接收机中设计一个与多径、时变、衰落、非线性、非平稳信道等特性相反的逆滤波器(又称均衡器),以消除信道引起的码间干扰,提高信道容量与传输数据质量。在均衡技术中,需发送器发送已知的、周期的、定长训练序列的传统自适应均衡器(非盲)需要占用本来就不富裕的带宽资源,降低了信道容量、增加了接收机设计的复杂性;而不需要发送端发送训练序列的盲自适应均衡器(简称盲均器),能较好地克服传统自适应均衡器的缺点。因此,在接收机中设计与信道特性相反的盲均衡器,是非常必要的。

衡量均衡器的性能主要指标有收敛速度、均方误差(Mean Square Error, MSE)或码间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI)或误码率(Bit Error Rates, BER)、计算复杂度等。

卫星信道均衡技术研究的主要成果如下:

(1) 码间干扰对消器。适合于 16QAM 信号均衡,但没有 BER 性能的