

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 23120071150140

UDC _____

廈門大學

硕士学位论文

基于 FM-DCSK 的混沌扩谱通信系统原型设计与实现

Prototype Design and Implementation of FM-DCSK Chaotic
Communication System

林肖凡

指导教师姓名: 李晓潮 副教授

郭东辉 教授

专业名称: 电路与系统

论文提交日期: 2010 年 月

论文答辩日期: 2010 年 月

学位授予日期: 2010 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2010年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

FM-DCSK 混沌扩谱通信系统具有结构简单、低功耗和低成本等优点，是近年来人们开发新型扩谱通信技术的重要课题之一。然而，目前国内外对于 FM-DCSK 混沌扩谱通信系统的研究还主要集中在理论分析和系统仿真方面，对其原型设计和硬件实现的研究仍处于不够成熟的原理性电路验证阶段。为了促进 FM-DCSK 混沌扩谱通信系统在通信系统中的实际应用，进一步开展对其硬件实现的工程应用基础研究具有重要意义。本文以设计并实现一个基于 FM-DCSK 的混沌扩谱通信系统原型为目标展开研究，主要工作成果如下：

(1) 设计一个基于 FM-DCSK 调制技术的通信系统原型实现方案，首先在中频实现了 FM-DCSK 调制和解调，然后通过上变频器和下变频器与 RF 频段模块相连。发送端主要由模拟混沌调频载波产生模块和数字 FM-DCSK 调制模块组成。接收端在下变频后无需提取发送端的载波信号而直接进行相关解调，主要由位同步检测电路和数字 FM-DCSK 解调电路组成。并通过建模仿真验证该方案的合理性。

(2) 提出一种新的盲估计位同步方案。利用 FM-DCSK 调制信号中参考和调制部分载波波形重复、能量恒定的特性，通过寻找局部相关最大值作为本地时钟的初始同步点，再由数字锁相环进行后续的相关峰值跟踪和同步调整，以兼顾位同步的建立速度和精度。分别在白噪声信道和平坦慢衰落信道下对该方案的性能通过建模进行仿真验证。

(3) FM-DCSK 通信系统原型中关键电路的硬件兑现和测试验证。即完成 Lorenz 混沌、FM 调频、AD 转换、FM-DCSK 调制和 FM-DCSK 解调等电路的兑现和调试。最后对整个硬件系统进行功能验证，通过收集实验数据验证方案设计和硬件兑现的正确性。

关键词：调频差分混沌调制，盲估计位同步，混沌扩谱通信

ABSTRACT

FM-DCSK (Frequency Modulated-Differential Chaos Shift Keying) chaotic spread spectrum communication systems are becoming an important research subject of new spread spectrum communication technology due to the advantages they offer over other systems such as lower complexity, power consumption, and cost. However, thus far, research in this area has mainly focused on theoretical analysis and hardware simulation, and some minimal work on schematic circuit verification. We therefore, go beyond previous work by researching the hardware implementations of FM-DCSK systems, which in turn can further promote its practical application in communication systems. This thesis is to design and implement a prototype of chaotic spread spectrum communication system based on FM-DCSK. The contribution may be summarized as:

(1) Develop a scheme of FM-DCSK chaotic communication prototype system. In the scheme, the modulator and demodulator are realized on intermediate frequency, and connected to RF module by up and down converters. The transmitter is composed of FM chaotic carrier signal generator and FM-DCSK modulator. After down-frequency converting, the receiver, which contains bit synchronization and FM-DCSK demodulator, demodulates the FM-DCSK signal through direct non-coherent correlator without frequency translation. This scheme has been verified by modeling simulation.

(2) Propose a new blind bit synchronization scheme. This scheme makes use of the characteristic of FM-DCSK signal, such as the wave shape repeatability between part of reference and modulation waves, the energy conservation, etc. It searches the local maximum correlation and declares the corresponding timing offset as the start point to trigger the local clock. And then the corresponding peak tracing and synchronization adjustment are carried out by the digital PLL (phase-locked loop) to maintain the establishment speed and accuracy of the bit synchronization. This scheme has been simulated in two different channels, i.e., additive white Gaussian noise (AWGN) channel and multi-path flat channel.

(3) Implement the critical circuits of the FM-DCSK prototype system and test verification, i.e., realize and debug the circuits of Lorenz chaotic circuit, FM modulator, AD Converter, FM-DCSK modulator and FM-DCSK demodulator. Eventually, experiments are conducted to verify the function of the system as well as the accuracy of the proposed prototype scheme and hardware implantation.

Key Words: FM-DCSK, Blind Bit Synchronization, Chaotic Spread Spectrum Communication.

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 关键技术及其研究现状.....	5
1.2.1 混沌信号产生技术.....	6
1.2.2 差分延时技术.....	7
1.2.3 位同步检测技术.....	9
1.3 主要研究工作.....	10
第二章 混沌扩谱通信的相关知识.....	12
2.1 混沌系统简介.....	12
2.1.1. 混沌研究回顾.....	12
2.1.2. 混沌系统的特征与分析方法.....	13
2.2 混沌扩谱通信系统.....	14
2.2.1 混沌键控 (CSK).....	15
2.2.2 混沌开关键控 (COOK).....	16
2.2.3 差分混沌键控 (DCSK).....	17
2.2.4 调频差分混沌键控 (FM-DCSK).....	19
2.3 位同步技术.....	20
第三章 FM-DCSK 原型通信系统的设计.....	22
3.1 总体系统设计方案.....	22
3.2 发送端设计.....	23
3.2.1 Lorenz 混沌电路.....	23
3.2.2 FM 调制电路.....	28
3.2.3 差分延时电路.....	31
3.2.4 DCSK 调制电路设计.....	41
3.3 接收端设计.....	43

3.3.1	位同步检测电路	43
3.3.2	DCSK 解调电路	46
3.4	系统建模与仿真	48
3.4.1	FM-DCSK 仿真模型	48
3.4.2	AWGN 信道下的仿真结果	55
3.4.2	平坦慢衰落信道下的仿真结果	59
3.5	本章小结	60
第四章 FM-DCSK 系统的兑现、调试与验证		61
4.1	调试方案	61
4.2	发送端电路调试	63
4.2.1.	Lorenz 混沌电路	63
4.2.2.	FM 调频电路	65
4.2.3.	AD 转换电路	66
4.2.4.	FM-DCSK 调制电路	69
4.3	接收端电路调试	71
4.4	整体功能验证	72
4.5	本章小结	73
第五章 总结与展望		74
5.1	工作总结	74
5.2	工作展望	75
参考文献		76
硕士期间发表的论文和申请的专利		82
致 谢		83

CONTENTS

1	Introduction	1
1.1	The Background and Meaning of Research	1
1.2	Key Technologies and Progress	5
1.2.1.	Chaos Generation Technology	6
1.2.2.	Differential Delay Technology	7
1.2.3.	Bit Synchronization Technology	9
1.3	Main Research Works	10
2	Basis of Chaos	12
2.1	Brief of Chaos	12
2.1.1	Review of Chaotic Research	12
2.1.2	Characteristics and Analytical Method of Chaos	13
2.2	Chaotic Spread Spectrum Communication System	14
2.1.1	Chaos Shift Key (CSK)	15
2.1.2	Chaos On-Off Key (COOK)	16
2.1.3	Differential Chaos Shift Key (DCSK)	17
2.1.4	Frequency Modulation Differential Chaos Shift Key (FM-DCSK)	19
2.3	Bit Synchronization Scheme	20
3	Prototype Design of FM-DCSK	22
3.1	General Design Scheme	22
3.2	Transmitter Circuit	23
3.2.1.	Lorenz Chaos Circuit	23
3.2.2.	Frequency Modulation Circuit	28
3.2.3.	Differential Delay Circuit	31
3.2.4.	DCSK Modulator Circuit	41
3.3	Receiver Circuit	43
3.3.1.	Bit Synchronization Circuit	43
3.3.2.	DCSK Demodulator Circuit	46
3.4	System Modeling and Simulation	48

3.4.1	FM-DCSK Simulation Model	48
3.4.2	Simulations in AWGN Channel.....	55
3.4.2	Simulations in Multi-path Flat Channel.....	59
3.5	Section Conclusion.....	60
4	Hardware Debug and Verify	61
4.1	Debugging Scheme.....	61
4.2	Transmitter Circuit Debug.....	63
4.2.1.	Lorenz Chaos Circuit	63
4.2.2.	FM Circuit.....	65
4.2.3.	AD Converter	66
4.2.4.	FM-DCSK Modulator	69
4.3	Receiver Circuit Debug.....	71
4.4	Overall Funtion Verification.....	72
4.5	Section Conclusion.....	73
5	Summary and Future Work.....	74
5.1	Summary.....	74
5.2	Future Work.....	75
	References.....	76
	Published Paper List and Patent Application.....	82
	Acknowledgement	83

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

混沌扩谱通信系统是以宽带混沌信号作为载波的扩谱通信系统，由于不需要额外的扩谱电路，从而降低了系统的复杂度，具有结构简单、低功耗和低成本等特点[1]，因此对混沌通信系统的研究已得到广泛的重视。国际著名刊物 IEEE 从 90 年代以来，已经出版了多期有关混沌在电子和通信中应用的专辑[2][3][4][5][6]，显示出混沌扩谱通信研究所取得的重大进展和广阔前景。1997 年，欧盟工业理事会负责管理的信息产业计划 ESPRIT 发起的 INSPECT 项目[7]，其主要目标之一是设计一个工作在 2.4GHz 的 ISM 频带范围内的调频差分混沌键控 (FM-DCSK) 通信系统。并于 2001 年成功设计及实现了一款 FM-DCSK 系统的收发机原型[8][9][10]，初步验证了 FM-DCSK 调制的可行性、鲁棒性，实验结果表明系统在实际信道下的误码率指标和理论性能一致，为 FM-DCSK 扩谱通信的进一步实质应用提供了良好的实验基础。为了简化原型设计的复杂度，该系统的 DCSK 调制和解调是通过现场可编程门阵列 (FPGA) 芯片在基带实现，之后才采用直接数字式频率合成器 (DDS) 技术进行 FM 调制，因此该系统不完全符合 FM-DCSK 混沌调制的框架。之后，众多研究人员对 FM-DCSK 混沌通信系统的性能、调制方式和多址接入等方面作了改进，并在理论上进行了推导和分析[11][12][13][14]。由于混沌调制所具有的低功耗、低成本和低复杂度的特点，因此混沌开关键控 (COOK)、差分混沌键控 (DCSK) 和混沌脉冲位置调制 (Chaotic-PPM) 等混沌调制方式被作为 IEEE802.15.4a 标准中的提案[15][16][17]，其中 COOK 方式于 2007 年成为该标准中的正式备选方案[18]。2007 年 Samsung SAIT 实验室采用 0.18um 工艺实现了基于 COOK 调制的混沌 UWB 收发机原型系统，产生的混沌载波信号的中心频率在 3.5G~4.5GHz 之间可调且其信号带宽的可调范围为 70M~620MHz，该芯片最高传输速率为 15Mbps[19]。混沌扩谱通信再次引起了各国的重视，特别是针对混沌在 IEEE802.15.4a 系统中的应用研究。文献[20]根据该标准实现了混沌 UWB 通信物理层和 MAC 层，并在实际网络中对 PER (Packet Error Rate) 等系统指标

进行了测试。文献[21][22]采用蒙特卡洛法验证了 COOK 和 DCSK 混沌通信系统 IEEE802.15.4a 标准定义的多径信道下的优良误码率性能,并详细分析了系统的复杂度、功耗、位传输速率、吞吐率等性能指标,进一步验证了混沌通信是 LR-WPAN 的良好备选方案。同时文献[23][24]对 UWB 混沌通信系统中关键的接收同步部分展开了一系列的研究。可见混沌扩谱通信的核心是混沌载波调制和解调技术,无论是 INSPECT 项目还是基于混沌的 UWB 系统的进展都显现了混沌载波调制在未来通信中得到实际应用的广阔前景。

按调制解调方案的不同,混沌扩谱通信系统可以分为相干和非相干两大类。基于 Pecora 和 Carroll 于 1990 利用驱动-响应法实现的两个混沌电路同步[25][26],U.Parlitz 于 1992 年第一次提出基于相干解调的数字混沌调制方案[27],后来研究人员称其为 CSK (Chaos-Shift-Key) [28]。之后,人们对 Lorenz 系统、Rossler 系统、Chen 和 Liu 等系统的混沌同步展开研究[29][30][31][32]。但是混沌信号具有非周期性和对初值敏感性,即使混沌电路的结构与参数都相等的情况,也会由于初值的不同而产生相差甚远的两种混沌信号,所以实际通信环境中还很难在接收端产生一个完全与发送端相同的混沌载波信号,即混沌同步在实际中仍较难实现[33][34]。在这种背景下,非相干调制解调由于不需要混沌同步而显得更加实用,在实际中得到首先应用。目前常见的非相干混沌通信系统主要包括混沌开关键控 (COOK) [35]、差分混沌键控 (DCSK) [36]、调频差分混沌键控 (FM-DCSK) [37][38]等调制方式。其中,COOK 和 DCSK 调制方式由于混沌信号的随机性而存在能量估计的问题,需要通过增加统计比特时间来减小能量方差估算,这将影响系统的传输速率。而结合调频技术的 FM-DCSK 具有恒定的比特能量可以直接解决能量估计问题,无需延长比特周期以获得较为固定的混沌载波能量,从而解决了数据传输速率受限的问题[38]。因此,FM-DCSK 是性能较好的混沌调制方式之一。

目前,对于 FM-DCSK 通信系统的研究可分为调制技术的理论分析及其性能改进和系统的原型设计和硬件实现两个方面。

(1) 调制技术的理论分析及其性能改进的研究主要针对多址接入、FM-DCSK 调制改进、误码率推导、多径信道仿真等方面。文献[11]通过结合 FM-DCSK 和快跳频 (FFH) 技术提出了一种多址接入方案,不仅克服了 FM-DCSK 缺乏抗人为干扰和多址接入的能力,而且可以极大改善 FM-DCSK 在多径信道下的性能。文献[12]

对原始 FM-DCSK 在每个符号时间 T_b 内发送 $T_b/2$ 参考信号和 $T_b/2$ 信息信号的调制方式提出了新的改进方案,即每发送 1 个参考信号之后连续发送 $N(N = 0,1,2 \dots)$ 个信息信号。因此在码速率相同的情况下,延长相关检测时间的积分时间,从而使噪声性能得到提高,使得 FM-DCSK 系统的性能得到改善,但要求在符号时间内时变信道参数不变[13]。此外,通过对接收信号先求平均值之后再行解调可以进一步提高系统的抗噪性能[14]。文献[11]根据 FM-DCSK 调制在 AWGN 信道下的误码率公式[39],推导 FM-DCSK 调制和 FFH-FMDCSK 调制在平坦慢衰落信道下的误码率公式,并通过仿真验证了所推导公式的正确性。文献[40]对 FM-DCSK 系统的多径性能进行仿真,初步验证了 FM-DCSK 系统在多径信道下的鲁棒性。文献[41]在此基础上对 FM-DCSK 通信系统在 PCS/JTC 室内外多种多径信道环境下的性能进行仿真,在分析了 FM-DCSK 信号的宽谱特性后,设计一个 FM-DCSK 通信系统的等效低通模型,通过对其系统的误码率性能进行仿真测试,进一步验证了 FM-DCSK 通信系统具有良好的抗多径性能。目前,FM-DCSK 扩谱通信系统的理论分析研究已渐近成熟,开始从理论走向实质应用。

(2) 系统原型设计和硬件实现研究的主要任务是以上述理论分析为指导依据,以推动系统的实际应用为目标,根据 FM-DCSK 调制技术的基本原理设计合理的硬件系统实现方案。基于 FM-DCSK 调制技术的通信系统主要包括 RF 射频部分、IF 中频部分和基带调制部分。其中,RF 射频部分与传统数字通信系统一样,通常由上变频器、下变频器、自动增益放大器(VGA)、滤波器等模块构成[42],这部分的实现一般采用已有的商业芯片如 Intersil 公司的 PRIAM II 芯片[10]。因此,FM-DCSK 通信系统的原型设计和硬件实现的研究主要集中在对 FM-DCSK 调制技术的硬件实现上。目前,实现 FM-DCSK 调制的方案主要有模拟电路方式和数字电路方式。

文献[42]介绍了一款基于模拟电路的 DCSK 混沌通信原型系统设计方案,其中发送端主要完成 DCSK 的调制,首先由模拟电路产生混沌信号作为 DCSK 调制的参考信号,然后采用模拟存储阵列完成模拟延时模块,将混沌信号经延时电路及换向开关产生携信息信号,最后通过多路选择器在参考信号与携信息信号两路信号之间切换选择得到 DCSK 的调制信号。接收端主要完成 DCSK 的解调,首先对接收信号进行延时,其次对延时后信号与原信号进行互相关求解,在互相关值最大值的时刻开始产生同步时钟,最后在同步时钟的控制下根据互相关值的符号解

调出相应的数据。该文献对设计方案进行分析论述,但未给予以硬件实现。文献[43]在此基础上,对于 DCSK 发送端的调制部分利用 $0.35\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺进行数模混合芯片设计,其中混沌载波信号由数模混合电路产生,DCSK 调制部分由基带部分进行实现,其关键的延时电路通过控制 RAM 读写信号的时序关系来实现。该文献缺少对接收端的实现,整个通信系统还不完整。

文献[8][9]根据 FM-DCSK 调制技术的原理设计了 FM-DCSK 通信的原型系统,文献[10]在此基础上基于 FPGA 数字电路实现 FM-DCSK 通信系统,发送端主要由混沌产生器和基带 FM-DCSK 调制器组成,混沌源由一阶非线性映射系统产生,采用 FPGA 芯片完成 DCSK 的调制,之后采用直接数字式频率合成器(DDS)技术进行 FM 基带调制产生 FM-DCSK 调制信号,该信号由两路正交等效的低通 I、Q 信号构成。接收端基于 FPGA 芯片的电路完成 FM-DCSK 解调。设计迟早门(early-late gate)数字锁相环完成位同步检测,求解接收信号的自相关值,根据自相关值的符号来判断所传输的数据。实验结果表明硬件系统的误码率与理论值基本相符,只是由于所采用器件的非线性使得系统的误码率略有下降。由于系统先进行 DCSK 调制之后才进行 FM 调制,使得在每个符号的中间时刻必需将 FM 调制信号的相位突变为零,导致 FM-DCSK 调制信号的频谱被展宽而影响系统的性能。为了降低影响,在半个数据符号的最后 100ns 处开始将 FM-DCSK 的相位缓慢改变至零,但这又增加了系统的复杂度且影响了系统的传输速率。

通过以上的分析可知,目前国内外对于 FM-DCSK 混沌扩谱通信系统的研究主要集中在理论分析和系统仿真方面,研究方法大多数仅局限于计算机仿真。理论研究的渐近成熟要求我们开始将研究重点转移到对其原型设计和硬件实现的研究上。然而,目前对于这方面的研究还比较缺乏,还处于原理性电路验证阶段,已有的少数硬件实现方案也均存在其不足之处。为了促进 FM-DCSK 混沌扩谱通信系统在通信系统中的实际应用,进一步开展对其硬件实现的工程应用基础研究具有重要意义。本文旨在研究 FM-DCSK 调制技术的基础上,首先设计一个完全符合 FM-DCSK 调制架构的通信原型系统实现方案,包括发射和接收系统;然后对该实现方案进行建模和性能仿真测试以验证设计方案的正确性;最后兑现具体的硬件电路从而实现通信系统原型。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库