

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学 号: B200124004

UDC _____

厦 门 大 学
博 士 学 位 论 文

混沌在扩谱通信中的应用研究

The Application of Chaos in Spread Spectrum

Communication Systems

李 晓 潮

指导教师姓名: 吴伯僖 教授

郭东辉 教授

专 业 名 称: 凝聚态物理

论文提交日期: 2004 年 10 月

论文答辩时间: 2004 年 12 月

学位授予日期: 2004 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2004 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

鉴于混沌系统的高度随机性、良好相关性、宽带性和非周期性等特点,有望在扩谱通信系统中得到实际应用,因此在无线通信日益普及的今天,混沌扩谱通信已成为扩谱通信研究的重要方向之一。本博士学位论文工作主要集中在混沌序列和混沌载波调制两个方面的研究,在总结前人研究成果的基础上,提出了三种新的混沌在扩谱通信中应用的方案。它们分别是:

(1) 异步 DS-CDMA 系统混沌扩谱序列的优化选择方案。该方案用来优化选择混沌二值序列集作为异步 DS-CDMA 系统的最优扩谱序列,采用最优混沌二值序列集的系统多用户干扰低于采用传统伪随机序列的系统。

(2) 基于混沌差分频率调制的快跳频扩谱通信系统方案 (FFH-FMDCSK)。该方案采用快跳频技术来增加 FMDCSK 抗人为干扰的能力,作为 FMDCSK 多址接入方法,并使系统具有更好的抗多径干扰能力和较低的信号功率谱密度。

(3) 基于混沌序列的 OFDM-CDMA 系统方案。该方案利用混沌实数序列解决目前 OFDM-CDMA 上行信道中峰均功率比 (PAPR) 过高的问题。

为了说明这三种方案的创新性和优点,本论文回顾了已有混沌扩谱通信的应用范围和成果,比较分析了它们和现有混沌扩谱通信方案之间,以及与传统扩谱通信方案之间的性能差异。对提出的三种方案,我们不仅从理论上分析其所能提高的性能,而且通过系统建模和仿真实验来验证方案的有效性。

关键词: 扩谱通信, 混沌序列, 混沌载波调制

ABSTRACT

This paper presents new implementations of chaos in spread spectrum communication systems. Active research in this area was initiated by the random-like, uncorrelated, broad band, aperiodic and simple generation characteristics that chaotic signal possesses. In a move that researchers hope will usher in a new era of wireless communication, chaotic spread spectrum communications become an important research branch in the study of future spread spectrum communications. In our work, we focus on the two key exploitations on chaotic spread spectrum communications: chaotic sequence and chaotic modulation. And we propose three new schemes as following:

(1) The optimal chaotic spreading sequences for asynchronous DS-CDMA. We propose the optimizing criteria for selecting chaotic binary sequence in order to optimize the MAI in DS-CDMA.

(2) Fast frequency hopping FMDCSK modulation scheme (FFH-FMDCSK). Integrating fast frequency hopping (FFH) technique with FMDCSK, FFH-FMDCSK is able to improve FMDCSK performance on anti-jam, multiple access and resistance to multi-path fading.

(3) OFDM-CDMA with chaotic spread sequences. We recommend using chaotic spread sequence in the uplink channel of MC-CDMA in order to lower the PAPR of OFDM modulation.

In order to demonstrate the advantage of these new schemes, we not only deliver the theoretical analysis but also verify them by system simulation results.

**Keywords: Spread Spectrum, Chaotic Sequences,
Chaotic Modulation**

目 录

第 1 章 绪论

1.1 无线通信发展的基本要求	1
1.2 扩谱通信的特点和实现方式	4
1.3 混沌扩谱通信及其应用范围	7
1.4 混沌扩谱通信研究的现状	10
1.5 本论文研究工作的重点	13

第 2 章 混沌系统及其相关序列的基础知识

2.1 混沌系统简介	15
2.2 混沌系统的分析方法	18
2.3 传统扩谱序列	30
2.4 本文选用的混沌系统	34
2.5 本章小结	42

第 3 章 基于混沌序列的异步 DS-CDMA

3.1 扩谱通信的基本原理	44
3.2 异步 DS-CDMA 系统	46
3.3 最优混沌扩谱序列	54
3.4 仿真结果和分析	63
3.5 本章小结	72

第 4 章 基于混沌载波调制的扩谱通信系统

4.1 混沌载波调制的基本理论	74
4.2 混沌数字码分多址系统	79
4.3 FFH-FMDCSK 系统	92

4.4 本章小结	112
第5章 基于混沌序列的 OFDM-CDMA 系统	
5.1 OFDM-CDMA 系统简介	114
5.2 主要问题和解决方法	121
5.3 仿真结果和分析	126
5.4 本章小结	129
第6章 工作总结与今后的研究方向	
6.1 工作总结	130
6.2 今后的研究方向	133
参考文献	135
附录1 读博期间发表和待发表的文章	147
附录2 读博期间经常访问的主要网站	148
致 谢	149

CONTENTS

1. INTRODUCTION

1. 1 Necessity of Wireless Communications	-----1
1. 2 Specification of SS Communications	-----4
1. 3 Introduction of Chaotic SS Communications	-----7
1. 4 Review of Chaotic SS Research	-----10
1. 5 Synopsis of Our Works	-----13

2. BASIS OF CHAOS

2. 1 Brief of Chaos	-----15
2. 2 Analytical Method of Chaos	-----18
2. 3 Traditional Spread Sequences	-----30
2. 4 Chaotic Systems in Our Chaotic SS	-----34
2. 5 Section Conclusion	-----42

3. CHAOTIC SEQUENCES IN ASYNC DS-CDMA

3. 1 Principles of SS	-----44
3. 2 Async. DS-CDMA	-----46
3. 3 Optimal Chaotic Spread Sequences	-----54
3. 4 Simulation Results and Analysis	-----63
3. 5 Section Conclusion	-----72

4. Chaotic Modulation Spread Spectrum System

4. 1 Overview of Chaotic Modulation	-----74
4. 2 Chaotic Division CDMA	-----79
4. 3 FFH-FMDCSK System	-----92

4. 4 Section Conclusion	-----	112
5. CHAOTIC SEQUENCES IN OFDM-CDMA		
5. 1 Overview of OFDM-CDMA	-----	114
5. 2 Key Problems and Solutions	-----	121
5. 3 Simulation Results and Analysis	-----	126
5. 4 Section Conclusion	-----	129
6. SUMMARY AND FUTURE WORK		
6. 1 Summary	-----	130
6. 2 Future Work	-----	133
REFERENCES	-----	135
APPENDIX		
1. PUBLISHED AND SUBMITTING PAPER LIST	-----	147
2. ADDRESS OF RELEVANT WEB SITE	-----	148
ACKNOWLEDGEMENT	-----	149

第1章 绪论

本论文的工作目的是希望把混沌信号类随机、良好相关性、宽带性和非周期等特点应用于无线扩谱通信系统，来提高系统的综合性能。为了强调本论文工作的必要性和可行性，本章首先介绍无线通信发展的基本要求，说明扩谱通信技术是实现宽带无线通信的关键技术之一；通过分析扩谱通信的技术特点和实现方式，说明混沌扩谱通信及其应用范围；然后，对混沌扩谱通信的研究进行回顾和总结，说明混沌扩谱通信的技术可行性和应用前景，并指出该应用研究中需要解决的一些重要技术问题；同时针对这些问题，我们设定本论文要重点展开的工作课题。最后，简要介绍论文其他各章节的内容安排。

1.1 无线通信发展的基本要求

近年来无处不在的个人移动通信已成为现代信息社会的一个重要的标志。个人移动通信网络分为3大部分：传输网、交换网和接入网。随着高速高性能交换机的出现，光通信和波分复用技术的成熟，交换网和传输网的传输速率大大提高，无线接入网已经成为制约移动通信发展的瓶颈。

无线通信发展的目标是任何人在任何时间、任何地点都可以通过移动终端接入语音传输、多媒体、Internet 等信息服务，即未来的无线通信应该是一个无缝网，满足系统、业务和覆盖等多方面无缝性的要求。系统的无缝性指的是用户可以在不同的无线系统中接入服务；业务的无缝性指的是对话音、数据和图像的无缝性；而覆盖的无缝性则指系统应能在全

球提供业务。为了满足这些要求，宽带化和 IP 化将成为无线接入网发展的主要大趋势。

为了实现无缝覆盖的目标，需要采用不同覆盖范围、不同适用区域、不同技术特点和不同接入速率的无线接入技术。充分利用不同无线接入网之间相互补充和相互支撑的关系，如图 1. 1 和图 1. 2 所示。CDMA, GSM, GPRS, 和未来的 3G 可解决广域无缝覆盖和漫游的流动性需求，IEEE802. 11, HyperLan 等无线局域网可解决中距离的较高速数据接入，而 Bluetooth, UWB 可实现近距离的超高速无线接入。未来的无线接入网络将是一个综合的一体化的解决方案，各种无线技术都将在这个一体化的网络中发挥自己的作用。整个接入网络将由个人接入网(WPAN)、局域网(WLAN)、城域网 (MAN)、广域网 (WAN) 和卫星通讯网组成，提供距离从近到远、范围从小到大的接入服务。

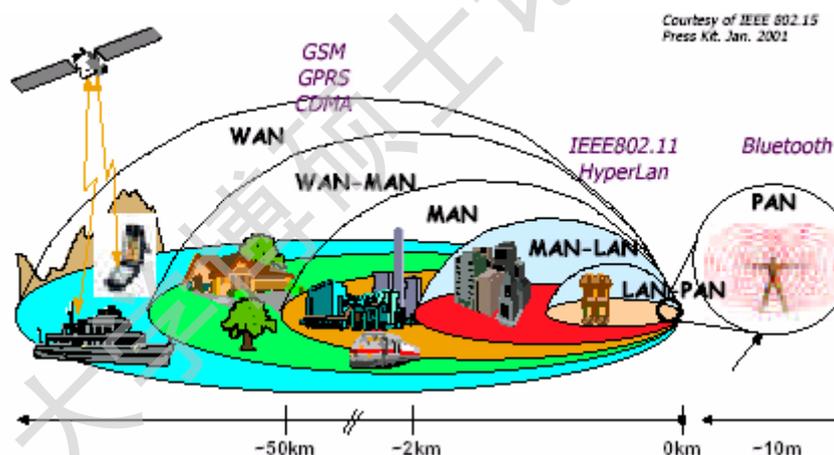


图 1. 1 无缝无线接入网组成[1]

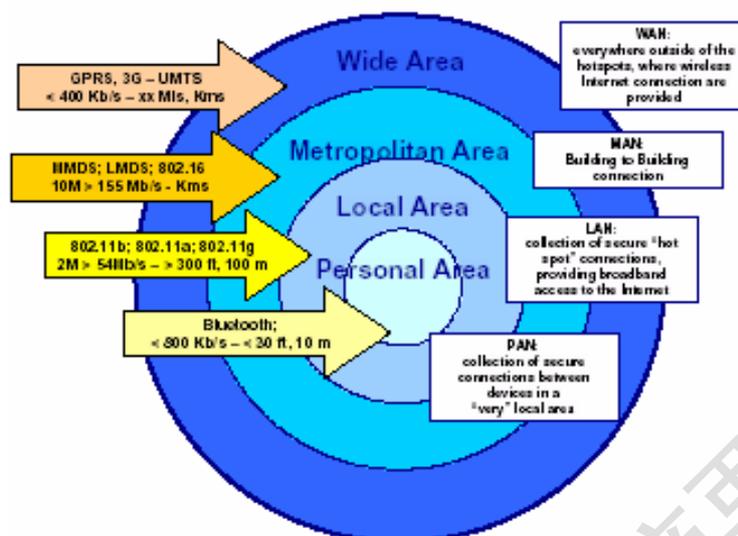


图 1. 2 无线接入的分类和对应标准[1]

无论采用何种通信技术和方式，在无线通信中每个通信用户都面临着四种主要的干扰：多用户干扰、多站点干扰、多径干扰和多种介质干扰[2]。正如 C. E. Shannon 在“通信的数学理论”一文中指出[3]：在存在高斯噪声、平均功率受限的信道上，实现有效和可靠通信的最佳信号是具有白噪声统计特性的信号。这是因为高斯白噪声具有理想的 δ 相关特性、平坦最低的功率谱和最大的熵，使得用户之间、站点之间的干扰最小，且能区隔不同路径的信号，同时信号传送的信息容量最大。在现有的通信技术中，扩谱技术是实现上述最佳信号的唯一可行方法，因此它已成为无线通信中不可或缺的关键技术。

由于扩谱技术合理地解决了无线通信存在的干扰、多址、保密和组网等问题，具有其它系统无法比拟的优点，使得扩谱通信已经涵盖短波、超微波、微波通信和卫星通信，并且广泛用于蜂窝通信、无绳电话、个人通信以及各种无线接入网。表 1. 1 列出了部分使用扩谱通信技术的无线通信标准。今后无线通信发展将主要以扩谱技术发展为核心，并通过结合

其它新技术来进一步提高系统的性能，如：正交频分复用（OFDM），Turbo码，多用户检测，移动 IP 等。

表 1. 1: 使用扩谱技术的无线通信标准

通信标准	直序扩谱 DS	跳频扩谱 FH	跳时扩谱 TH
IEEE 802. 11 (WLAN)	√	√	
IS-95	√		
WCDMA	√		
TD-SCDMA	√		
CDMA2000	√		
Bluetooth (WPAN)		√	
IEEE 802. 15. 3a (UWB)			√

1.2 扩谱通信的特点和实现方式

扩谱通信起源于本世纪 40 年代[4-5]，它具有以下基本特征：

- (1) 扩谱信号是伪随机的宽带信号；
- (2) 扩谱信号带宽远远大于调制信号的带宽；
- (3) 接收信号需要通过相关技术解调；

一般而言，扩谱信号具有“伪随机性”和“多样性”两个重要标志。“伪随机性”特指用确定方式产生的看似随机的行为，而“多样性”是指通信双方可以使用的正交信号数目（也称为扩谱增益），扩谱信号的多样性一般远大于 1。根据以上扩谱信号的特点，与传统窄带通信系统相比，扩谱通信系统具有以下 5 个优点[4, 6-7]：

- (1) 低截获性。由于信号的能量被均匀摊薄、扩展到远远大于调制信号带宽的频率范围，因此它具有很低的功率谱密度。这使得监听

设备很难检测、监听、定位到扩谱通信设备发射的无线信号。

(2) 抗干扰能力强。由于扩谱信号是伪随机性信号，干扰者无法通过检测或预测来提高干扰的效果，从而降低通信信号被干扰的可能性。扩谱通信系统的扩展频谱越宽，获得的处理增益越高，干扰容限就越大，抗干扰能力就越强。

(3) 具有抗多径干扰的能力。利用扩谱信号所具有的强自相关性，接收设备可以检测、压制经不同路径到达的信号，从而提高系统抗多径干扰的能力。

(4) 多址接入。多个用户可以分别使用同一频段但又相互独立的随机宽带扩谱信号进行通信。由于不同用户信号之间的低互相关性，在接收端可以利用相关检测从多用户信号中取出所需用户信号，从而确保多个用户可以同时进行通信，互不影响。

(5) 保密性好。扩谱信号类似于随机噪声，在接收端进行相关解调时，在不知信号的扩谱方式时破译是很困难的，所以传输的信息具有高的保密性。

具有上述 3 个基本特征，和一个或多个优点的通信系统都可以被统称为扩谱通信系统。根据扩谱信号发射和接收的不同方式，现有的扩谱通信系统基本可以归纳成三类，即：

(1) TR 系统：它的基本原理是在发射端同时发射参考扩谱信号和调制扩谱信号，在接收端通过两者求相关来解调出原始数据信号。因此它不需要发射、接收端的信号同步。

(2) SR 系统：它和 TR 系统不同的是在于它的参考扩谱信号是通过信号同步在接收端本地产生，然后再进行相关解调。

(3) MF 系统：即匹配滤波系统，它通过设定匹配滤波器的冲击响应

函数来完成检测接收，也就是利用匹配滤波器完成相关运算。它和 SR 系统一样，需要信号同步。

此外，扩谱通信系统还可以按扩谱信号的产生方式分为：

(1) 随机噪声系统：它采用随机噪声作为扩谱信号，此类系统只能采用 TR 模式。

(2) 直序(DS)扩谱系统：它使用伪随机扩谱序列和 PSK 调制技术来生成扩谱信号。因为伪随机扩谱序列的每一码片(chip)时间小于所调制的数据周期，所以序列相乘后展宽了信号的频谱范围。

(3) 调频扩谱(FM-SS)系统：它利用频率调制技术来产生扩谱信号，信号的载频在一定时间间隔内扫过一个很宽的频带，从而扩展信号的频谱。

(4) 跳频(FH)扩谱系统：它通常采用 FSK 调制技术，并利用伪随机序列来控制载波的频率，从而让调制后的 FSK 信号在一个远大于信号调制带宽的频带范围内不停跳跃、变化，扩展了发射信号的总频谱范围。

(5) 跳时(TH)扩谱系统。它是让发射信号在时间轴上跳变。把时间轴分成许多时片，数据在哪个时片内发射由伪随机序列来进行控制。由于采用窄脉冲信号来发送，所以发射信号的频谱也就展宽了。

在上述几种基本的扩谱方式基础上，可以通过组合来构成各种混合扩谱通信系统，例如 DS / FH、DS / TH、DS / FH / TH 等等。90 年代发展起来的多载波 OFDM-CDMA 扩谱通信系统则属于混合扩谱通信系统中的一种。

1.3 混沌扩谱通信及其应用范围

一直以来，混沌在工程设计上被视为随机干扰现象而尽量加以避免。然而随着混沌研究的深入，人们发现混沌的高度随机性、良好相关性、宽带特性和非周期性等特征，和扩谱通信所需要的伪随机性、多样性和宽带性十分吻合，同时它还具有更好的保密性能和简单经济的实现方式，因此探讨混沌在扩谱通信中的应用已经成为扩谱通信和非线性科学研究的热点。目前，混沌在通信中的应用可以用图 1.3 所示的通信模块来表示，它可以应用在信道编码[8-13]、信息加密[14-18]、混沌扩谱序列和混沌载波调制四个方面。

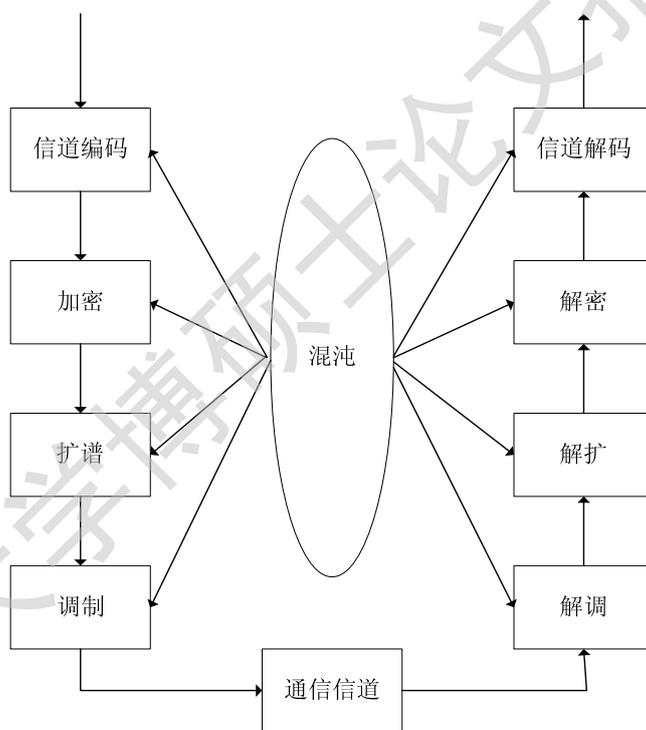


图 1.3 混沌在通信中的应用范围

混沌扩谱通信就是采用混沌来扩展信号的频谱。它主要是指混沌扩谱序列和混沌载波调制这两个方面。使用混沌扩谱序列至少有几个好

处：(1) 利用混沌对初始值和参数敏感的特点，可以得到数目众多的序列；
(2) 混沌序列具有伪随机性和非周期的特点，有利于提高系统的安全性；
(3) 混沌序列的产生非常方便，给出混沌迭代公式和初始状态，就可以产生出所需的序列；(4) 通过对混沌序列的优选，可以得到所需相关性的序列。因此，混沌扩谱序列可以解决传统扩谱通信中，扩谱序列在数量、相关性和保密上的不足。

混沌载波调制则直接利用类噪声、宽频带和非周期的混沌载波信号来传输数字信号。它打破了传统应用周期正弦信号作为载波的通信模式，在调制的同时对信号进行扩谱。利用混沌载波调制主要为了达到两个目的：(1) 解决多径衰落问题；(2) 降低发射信号的功率谱密度，从而降低对其他系统的干扰。由于不需要借助直序扩谱技术来生成伪随机宽带载波，所以基于混沌载波调制的扩谱通信系统具有结构简单、成本低廉等优点。它可以作为现有通信技术的一个补充，适合于低成本的宽带通信场合。并且，混沌载波调制还可以进一步和直序扩谱和跳频扩谱技术相结合，如 CDMA-DCSK[19]以及本文提出的 FFH-FMDCSK 系统。它们不但具有多址接入的能力，而且提高了系统抗人为干扰和多径干扰的能力、降低了对其他系统的干扰。

混沌扩谱通信作为扩谱通信的新兴研究方向已得到广泛重视。欧盟工业总理事会负责管理的信息产业计划 ESPRIT，从 1996 年就将其列入长期研究计划中 (LTR)，视其为影响下一代通信系统的有力备选方案。美国国防部军事研究室 1998 年出资 4.5 百万美元，由 UCSD, UCLA 和 STANFORD 等著名学府的无线电和非线性实验室，以及 QUALCOMM, HUGHES 电子等通信公司共同开发基于混沌原理的通信系统。国际著名刊物 IEEE 从 90 年代以来，已经出版了 5 期有关混沌在电子和通信中应用的专辑[20-24]，显示出混沌扩谱通信研究所取得的重大进展和广阔前景。

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.

厦门大学博硕士学位论文摘要库