

◎西南交通大学博士学位论文精品文库

文库

低/零相关区理论与扩频通信系统序列设计

全国百篇优秀博士学位论文



著者 ◎ 唐小虎 导师 ◎ 范平志

西南交通大学博士学位论文精品文库
——全国百篇优秀博士学位论文

低/零相关区理论与
Di/Ling Xiangguanqu Lilun yu
扩频通信系统序列设计
Kuopin Tongxin Xitong Xulie Sheji

著 者 唐小虎
导 师 范平志
专 业 交通信息工程及控制

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

低/零相关区理论与扩频通信系统序列设计 / 唐小虎
著. —成都: 西南交通大学出版社, 2006.5
(西南交通大学博士学位论文精品文库)
ISBN 7-81104-217-7

I. 低... II. 唐... III. 扩频通信 IV. TN914.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 004440 号

西南交通大学博士学位论文精品文库

低/零相关区理论与扩频通信系统序列设计

著者 唐小虎

责任编辑	黄淑文
责任校对	李梅
封面设计	王可
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 编	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
电子邮箱	cbsxx@swjtu.edu.cn
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	8.125
字 数	141 千字
版 次	2006 年 5 月第 1 版
印 次	2006 年 5 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-81104-217-7
定 价	38.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

西南交通大学博士学位论文精品文库

编 委 会

编委主任 周本宽

编委副主任 蒲 云

委 员 (按姓氏笔画为序)

王怀东 刘建新 罗中琼

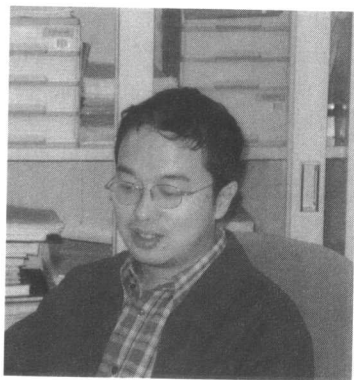
郑凯锋 夏显波 梁 娜

曾家刚

作者简介

唐小虎博士,教授,博士生导师,1972年生,全国百篇优秀博士论文获得者(2003),教育部新世纪优秀人才支持计划入选者(2004),国家自然科学基金等项目主持人,IEEE会员。作为博士后和访问学者多次赴英、日、澳、韩、新、港从事国际合作研究,在IEEE Trans IT/JSAC/VT、IEE EL等刊物和会议发表论文20余篇,获授权发明专利2项。研究兴趣为:编码理论、网络与信息安全。

(注:此论文完成于2001.3)



摘

要

【关键词】 扩频序列 准同步 CDMA 系统 低相关区 零相关区

理想情况下, CDMA 通信系统中使用的扩频序列集中: 每个扩频序列的自相关函数应该是一个冲激函数, 即除零时延外, 其值应处处为零, 每对扩频序列的互相关函数值应该处处为零。遗憾的是, 已经证明具有这种理想相关特性的序列集是不存在的。近年来, 低/零相关区扩频序列的研究引起了大家的广泛关注, 它针对准同步 CDMA 系统的特性, 即系统的同步误差控制在一定范围之内, 如一个或几个码片周期, 要求扩频序列在同步误差范围内具有(接近)理想相关特性。

本文围绕低/零相关区理论, 对低/零相关区扩频序列的理论界、低相关区扩频序列设计、具有低/零相关区的二维信号设计、整环上正交序列集设计、LA 序列设计等五方面的内容进行了深入研究。

针对一些相关函数(包括非周期相关函数、周期相关函数、周期奇相关函数)具有低/零相关区特性的序列, 在 Welch 内积界的基础上统一建立了其理论界。研究表明, 经过适当修订, 所有已知的一般序列的理论界都可应用于低/零相关区序列, 只要将相关范围限定在低/零相关区内。

得到了一种由 GMW 序列复合生成多相低相关区序列集的方法, 在低相关区内, 其相关函数的边峰值为 -1 ; 更确切地说, 在整个定义域内, 除个别点外, 相关函数的值都等于 -1 。通过选择相应的 m -序列对的抽样关系, 得到了一大类渐近最佳多相低相关区序列集。借用另一不同的构造思想, 本文还得到了一类实现简单的渐近最佳二元低相关序列集。

将低/零相关区的概念从一维推广到了二维,并提出了几种利用二维正交非周期互补序列集构造具有零相关区的二维信号的方法,成功地生成了具有低相关区的二维信号,这些二维信号的相关函数在 origin 四周的一个矩形区域内非常小或为零。类似地,本文所述构造方法也可推广到高维信号设计。

基于 m -序列的自相关特性,本文利用 Galois 环上元素的迹函数,生成了整环上的正交序列集,并利用两个移位寄存器实现该序列集;提出了一个快速的两级解扩算法,对抽样信号实施快速广义 Hadamard 变换,极大地减小了运算量。

建立了 LA 序列的数学模型,推导了 LA 序列长度的理论下界,提出了几个构造方法。结果表明,其中基于进化算法的构造方法比其他方法性能更佳,所生成的 LA 序列远优于已知结果,大部分新 LA 序列达到了长度的理论下界。

本文所设计的低/零相关区序列可用于准同步 CDMA 扩频通信系统,可降低甚至消除共信道干扰,提高系统容量。

Abstract

【Keywords】 spreading sequences quasi-synchronous CDMA system
low correlation zone zero correlation zone

Ideal spreading codes used for CDMA system should have impulsive-like auto-correlation functions and zero cross-correlation functions. Unfortunately, it has been shown that such ideal codes do not exist. Recently, the research on spreading sequences with low or zero correlation zone is being paid much attention. These sequences have ideal or very low correlation functions within a specific zone, which can be used in quasi-synchronous CDMA system, where the synchronization among users can be controlled within permissible time difference.

In this thesis, five sequence design topics related to the theory of low or zero correlation zone (LCZ or ZCZ) are investigated, i. e., lower bounds on the correlation of the spreading sequence set with low or zero

correlation zone, sequence design with low correlation zone, binary array design with low or zero correlation zone, orthogonal spreading sequence design over $\mathbb{Z}_p^k$, and the LA sequence design.

Based on the bounds on inner product, we have established several bounds on various correlations of LCZ (ZCZ) sequences, include aperiodic correlation bound, periodic correlation bound and odd correlation bound. Our investigation shows that, all known lower bounds on various correlations for ordinary sequences, derived from bounds on inner product, can be extended to LCZ or ZCZ sequences by limiting the correlation operation range within the low or zero correlation zone.

A new class of polyphase LCZ sequences over $\text{GF}(p)$, based on GMW sequences, is constructed. The sequences have the property that, in the low correlation zone, the out-of-phase autocorrelation and cross-correlation values are all equal to -1. Furthermore, the correlation values are all equal to -1 within the whole time duration except for a few time shifts. By selecting an appropriate sampler for a pair of m -sequences, a large class of asymptotically optimal polyphase LCZ sequence set, can be obtained. In addition, by borrowing a different strategy, another class of asymptotically optimal binary LCZ sequences set is presented.

By generalizing the concept of ZCZ and LCZ from one-dimension to two-dimension, a class of binary arrays with ZCZ property, based on a class of mutually orthogonal two-dimensional complementary codes, is presented. Besides, a class of binary arrays with low correlation zone is also obtained. It is noted that, similar concept and construction can be easily extended to three-dimensional or higher dimensional code with low or zero correlation.

Based on the autocorrelation property of m -sequence over $\text{GF}(p)$, a method for constructing orthogonal sequence sets over Galois ring is derived by making use of the trace function. It can be simply realized by means of two shift registers. In order to despread the signal efficiently at the receiver, a fast algorithm for implementing the bank of correlators is also derived to decrease computation complexity dramatically, by performing generalized fast Hadamard transform of the block of permuted samples.

A strict mathematical definition for LA sequences is established, and the lower bounds on the length of LA sequences is derived. Based on the definition of LA sequences, several algorithms are presented, and the construction based on evolutionary algorithm is outperforms others. It is shown that the result obtained are much better than the known results. Moreover, the length of the most new LA codes reaches the lower bounds.

The LCZ or ZCZ sequences presented in this thesis are suitable for applications quasi-synchronous CDMA system to reduce or eliminate the co-channel interference, and, therefore, to increase the system capacity significantly.

1 绪 论	1
1.1 扩频通信与码分多址(CDMA)技术	1
1.2 扩频序列研究在 CDMA 系统中的意义	3
1.3 扩频序列研究现状、存在问题与目前趋势	4
1.4 本文主要研究工作思路与论文内容组织	5
2 低/零相关区扩频序列的理论界	10
2.1 相关函数	10
2.2 已知的序列理论界	11
2.3 低/零相关区扩频序列的定义	14
2.4 低/零相关区扩频序列的理论界	17
2.5 低/零相关区扩频序列理论界的讨论	18
2.6 低/零相关区扩频序列的非周期相关和 周期奇相关函数理论界	19
3 低相关区扩频序列设计	25
3.1 GMW 序列	25
3.2 二元低相关区序列	27
3.3 p 相低相关区序列	28
3.4 p 相低相关区序列集的参数讨论	36
3.5 一类渐近最佳二元低相关区序列	39

4 具有低/零相关区的二维信号设计	44
4.1 具有低/零相关区的二维信号定义	44
4.2 正交非周期互补二维信号集	45
4.3 具有零相关区的二维信号集构造	46
4.4 具有低相关区的二维信号集构造	51
5 一类整环 Z_p^k 上正交序列集的构造及快速解扩算法	56
5.1 Galois 环的性质	56
5.2 Z_4 上的 m -序列和 m -序列的交织	57
5.3 一类新型四相正交序列集	59
5.4 Z_p^k 上正交序列集	60
5.5 一种快速解扩算法	65
6 LA 序列设计	72
6.1 LA 序列的定义	72
6.2 基序列长度的理论界	73
6.3 基序列的两种构造方法	76
6.4 基序列构造方法的改进	80
7 零相关区扩频序列的一些应用	84
7.1 CDMA 系统的三种同步模式	84
7.2 使用 LCZ 和 ZCZ 序列集的准同步 CDMA 系统	85
7.3 使用 ZCZ 序列集的同步 CDMA 系统	87
7.4 LA 码与 LAS-CDMA 移动通信系统	89
7.5 ZCZ 序列作为导频信号估计多径增益	90
8 结论与展望	93
8.1 结 论	93
8.2 今后工作展望	95
致 谢	96
附 录	97
参考资料	108
攻读博士学位期间发表的论文及科研成果	117



绪 论

1.1 扩频通信与码分多址(CDMA)技术

扩频通信(Spread Spectrum Communications)的基本特点是,传输信息所用的带宽远远大于信息本身的带宽。因为扩展了信号频谱,扩频通信具有以下特点:抗干扰性强;隐蔽性好;多址通信;抗多径干扰;能准确地定时和测距^[1]。

扩频通信提高了系统的性能,却付出了带宽的代价,因此采用多址技术,大量用户共用这一宽频带,可使带宽得到充分利用。

基本的多址技术有三种:

① 频分多址(FDMA)技术。它是把系统总的频带分成若干个子频带,每个子频带再分配给每个用户。

② 时分多址(TDMA)技术。它是将每个频分信道分成若干时隙,然后把每个时隙再分配给每个用户。

③ 码分多址(CDMA)技术。它给每个用户分配一个扩频序列,这些序列将用户信号变换成宽带扩展频谱信号(简称扩频信号)。在接收端,接收机用相同的序列将宽带信号再变换成原来的带宽。其他用户的宽带信号仍然是宽带信号。在这一过程中,如果有窄带干扰,则将受到抑制。

除了 FDMA、TDMA 和 CDMA 外,尚有正交频分多址(OFDMA)技术——一种特殊的多载波系统;空分多址(SDMA)技术——它用波束形成

技术划分空间,以获得多址能力^[2]。

CDMA 通信系统与采用传统频分多址 FDMA、时分多址 TDMA 等无线多址技术的通信系统相比,具有抗干扰性强、抗多径、保密性好、软容量、软越区切换、话音激活持续期的利用、免除保护时间等一系列优点^[3~6]。

20 世纪 40 年代末期,CDMA 技术主要用于军事通信,以达到抗干扰的目的;到 70 年代末期,才开始应用于蜂窝移动通信;80 年代,Qualcomm 公司把 DS-CDMA 技术用于蜂窝系统,成为今天的窄带 CDMA IS-95 标准;90 年代,宽带 CDMA 技术被用于第三代移动通信系统(3G)中。

用户密度的急剧增长及对数据业务需求的提高,特别是多媒体业务的兴起,导致了对带宽需求愈发无止境。由于受到空中接口技术以及网络能力的限制,目前正在使用的第二代移动通信系统(2G)提供的数据承载业务速率较低,且 QoS 能力有限,无法满足多媒体、多呼等新业务要求,难以满足未来市场的需求。

以 ITU、3GPP、3GPP2 为首的许多国际组织和机构,正致力于第三代移动通信系统(3G)的标准制定和研究开发,以期使移动通信同时提供对话音、数据、图像等多种业务的支持,满足人们日益增长的对无线多媒体通信的需要。ITU TG8/1 早在 1985 年就提出了第三代移动通信系统的概念,最初命名为 FPLMTS(未来公共陆地移动通信系统),后在 1996 年更名为 IMT-2000。

1998 年 6 月,欧洲、日本、美国、中国和韩国的有关电信组织,分别向 ITU 提出了各自的 IMT-2000 RTT 候选方案。从技术上看,虽然总共提出了 10 种地面通信的 RTT 方案,但其中一些方案所采用的技术基本相同,只是某些参数有所差异,主要可分为以下几类:WCDMA(如 ETSI UTRA、ARIB W-CDMA 等)、TD-CDMA(ETSI TDMA/CDMA、CATT TD-SCDMA)、CDMA2000、TDMA(如 UWC-136、DECT)^[7~8]。

目前,欧洲与日本的 W-CDMA、美国的 CDMA2000 和中国的 TD-SCDMA 已成为 IMT-2000 系统主要候选方案。特别值得一提的是,在体现尖端高科技的移动通信领域,中国第一次提交了自己的技术规范 TD-SCDMA,并成为三大候选方案之一。

各国提交的 IMT-2000 RTT 的 10 种候选方案中,有 8 种为 CDMA 技术,三个主流候选方案中都采用了 CDMA 技术。不管第三代移动通信系统最终采用何种标准,CDMA 技术在第三代通信系统中居于主导地位已是不争的事实。

1.2 扩频序列研究在 CDMA 系统中的意义

CDMA 系统通常采取的扩频方式有两种：一种是直接序列扩频 (DS) 技术；另一种是跳频扩频 (FH) 技术^[1,9~12]。第三代移动通信系统一般采用前者，即是 DS-CDMA 系统。图 1.1 是一个简单的 DS-CDMA 系统。

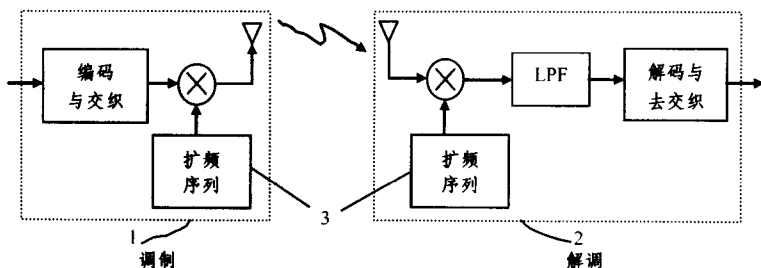


图 1.1 DS-CDMA 系统模型

DS-CDMA 系统中，众多的用户工作在同一时间同一频段内，每个用户分配一个独特的扩频码，依靠各个扩频序列的自相关和互相关函数值来区分各个用户，因此要求扩频序列具有良好的自相关和互相关特性。另外，为实现同步、抗多径等要求，扩频序列也应该具有优良的自相关特性^[13~14]。一般而言，CDMA 系统的干扰由四部分组成：

- ① 本地噪声；
- ② 码间干扰 (ISI)；
- ③ 多址干扰 (MAI)，即小区内其他用户的干扰；
- ④ 邻信道干扰 (ACI)，及邻小区、邻信道间其他用户的干扰。

除本地噪声外，其他三种干扰都可通过选择具有优良相关特性的扩频序列予以降低甚至消除。一般来说，序列集的相关特性越好，系统的干扰就越小。而 CDMA 系统的容量主要受限于干扰，具有软容量与大容量的特点，这与传统的无线多址技术 TDMA、FDMA 不同，后两者的系统容量是由物理信道数决定的。因此可以选用具有优良相关特性的扩频序列，降低甚至消除后三种干扰，实现最大容量的 CDMA 系统。

同时，扩频序列还被广泛应用于雷达、声纳、同步、信道估计和均衡、通信保密、系统辨识、测试与测量、编码孔径成像等众多工程领域。

所以扩频序列设计涉及 CDMA 通信系统核心问题,具有重要的理论价值和广阔的应用前景。

1.3 扩频序列研究现状、存在问题与目前趋势

本节结合作者的研究工作,对扩频序列研究现状、问题和趋势进行简要说明,也可参阅参考文献[15~18]。

扩频序列的研究始于 20 世纪 50 年代,开创性的工作是 Golomb 和 Zierler 关于 m -序列特性的研究^[19,20]。目前扩频序列设计研究已经取得了丰硕的成果, m -序列、Walsh 序列、OVSF 序列^[21]、Gold 序列^[22,23]等因其优良的相关性而闻名。还有许多性能优良的序列,如 GMW 序列、Kasami 序列、互补序列、几乎最佳周期自相关序列、零相关区序列(ZCZ 序列)、LA 序列、最佳四相序列等。

理想情况下,CDMA 通信系统中使用的扩频序列集应具有如下相关特性:

① 每个扩频序列的自相关函数应该是一个冲激函数,即除零时延外,其值应处处为零;

② 每对扩频序列的互相关函数值应该处处为零。

遗憾的是,已经证明具有这种理想相关特性的序列集是不存在的。对给定的序列周期与数目,一个序列集最大自相关函数边峰值和最大互相关函数值不可能同时为零,它们受到一些理论界(如 Welch 界^[24], Sidelnikov 界^[25], Sarwate 界^[26]等)的约束,要求一个变小时,另一个必然增大。

长期以来,人们普遍认为具有噪声性质的扩频码是最佳码。伪随机码 m -序列、Gold 序列等因具有近似噪声的相关函数,被广泛地用于第二代和第三代移动通信系统,如 CDMA2000 两级扩频方案中扰码(Scrambling Code)采用 m -序列,而 WCDMA 扰码选用 Gold 序列。

近年来,扩频码设计取得了重大突破,Fan 等针对准同步 CDMA 系统,不再要求扩频序列在整个周期内具有理想相关特性,只要求序列在同步误差范围内具有理想相关特性,提出了零相关区(Zero Correlation Zone,简称 ZCZ)的概念,并在非周期正交互补序列对基础上成功构造了

ZCZ 序列集(对)^[27~29]。稍后, Deng 等基于非周期正交互补序列集构造出 ZCZ 序列集^[30]。此外, 还有一些类似或等价的概念: 二元序列有广义正交(Generalized Orthogonality)序列^[31]、ZCD(Zero Correlation Duration)序列^[32], 非二元序列有三进制的零相关窗(Zero Correlation Window)序列^[33,34]、三进制 ZCZ 序列^[35]、伪周期(pseudo-periodicity)多相序列^[36], 仅考虑自相关性有几乎最佳自相关(Almost Perfect)序列^[37,38]、半最佳自相关(Semi Perfect)序列^[39]等。这些扩频序列集尽管称谓各不相同, 但它们具有一个共同的特征: 在零时延附近具有一定长度的零相关区。利用这些零相关区序列, 可以实现无共信道的准同步 CDMA 扩频通信系统。

本文反映了作者在从事相关国家自然科学基金项目、中日国际科学合作项目和国家“八六三”计划项目中, 以零相关区扩频序列为基础, 围绕低/零相关区理论, 在低/零相关区扩频序列设计上所取得的一些成果。

1.4 本文主要研究工作思路与论文内容组织

本文按如下形式组织: 第 2 章到第 6 章分别介绍作者在五个方面的研究工作和成果, 第 7 章介绍零相关区序列的一些应用, 第 8 章是本文研究工作的结论与展望。

1.4.1 低/零相关区扩频序列的理论界

所谓序列的理论界, 是指序列的一些重要参数, 如序列长度、序列数目、序列自相关值以及互相关值等应满足一定的约束不等式。这些理论界成为判别一个序列设计优劣的标准, 并成为人们努力去达到的目标。近几十年来, 人们已经设计了许多达到理论界的序列^[40], 如小 Kasami 序列^[41]、Bent 序列^[42]等。

本文将零相关区(ZCZ)的概念推广到低相关区(Low Correlation Zone, 简称 LCZ)^[43], 后者的范围更广, 前者只是后者的特例。

为了给低/零相关区序列设计提供一个评判依据,我们针对低相关区扩频序列,在 Welch 向量内积界^[24]基础上导出了低/零相关区序列应遵循的理论界^[44]。经过对现有序列的分析讨论,我们认为对于低相关区序列该理论界是比较紧的。但对于二相和多相零相关序列,除 Walsh 码这种特殊情形外,其余序列与该理论界尚有较大距离,我们期待达到理论界的多相零相关区序列或发现更紧的界^[44]。

此外,我们还针对非周期低相关区序列和周期奇相关低相关区序列,应用 Welch 向量内积界导出了它们分别遵循的理论界^[45]。

不管是周期低相关区序列,还是非周期低相关区序列和周期奇相关低相关区序列,我们都是将其理论界转化为内积界的。而所有已知的普通序列的理论界都是基于内积界的,因此经过适当修订,我们都可以将它们应用于低相关区序列,只不过应限定在低相关区内。

1.4.2 低相关区扩频序列设计

利用零相关区序列,可以实现无共信道干扰的准同步 CDMA 系统。但由于多相零相关区序列远小于理论界,不能满足更多的用户,因此我们转而设计达到或接近理论界的低相关区序列。利用它们可以实现低共信道干扰的准同步 CDMA 系统,这样虽然干扰稍大,但用户数却大大增加。

1998 年,Long 等提出了利用 GMW 序列的复合序列构造新的二元序列集的方法。这种序列有一个显著特点:在整个定义域内,除个别点外,相关函数的值都等于-1,满足低相关区序列的定义^[10,46]。

GMW 序列于 1962 年被 Gordon 等作为差集序列提出^[47],它有良好的相关性。1984 年,Scholtz 等提出了二元 GWM 序列的迹函数构造方法^[48],稍后,Games 给出了 GMW 序列的相关函数^[49]。Antweiler 和朱近康等又分别将 GMW 序列从二相推广到 p 相,并研究其相关函数^[50,51]。

我们利用 p 相 GMW 序列,将 Long 等的方法推广到 p 相序列,构造出 p 相 LCZ 序列,通过选择相应的 m -序列对的抽样关系,可以得到渐近最佳的低相关区序列集^[43]。

近来,Matsufuji 等构造出了高频谱效率的三进制零相关区码^[35]。但遗憾的是,该方法不适用于二元序列。不过我们利用其构造思想,成功地构造出了一类渐近最佳的 LCZ 序列,且比 GMW 复合序列简单得多。