

LS 序列部分相关特性研究及其应用

冯莉芳^① 范平志^① 李道本^②

^①(西南交通大学移动通信重点实验室 成都 610031)

^②(北京邮电大学信息工程学院 北京 100876)

摘要: 该文研究了部分相关广义正交序列及 N 倍时延部分长度 D_0 正交序列, 重点对LS (Loosely Synchronized) 序列的部分相关特性进行了分析。分析结果表明, LS序列具有4倍时延 $1/2$ 序列长度部分相关正交特性, 经过变换, 可构造出基于4倍时延 $1/2$ 序列长度的部分长度自互补序列和偶时延部分长度互互补序列。在此基础上, 该文提出了一种将 N 倍时延部分长度 D_0 正交序列应用于同步CDMA(Code Division Multiple Access)系统中的方案, 可以消除系统的多址干扰。

关键词: CDMA; 部分相关; 广义正交序列; 互补序列

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0671-04

The Research and Application of Partial Correlation Property of LS Sequences

Feng Li-fang^① Fan Ping-zhi^① Li Dao-ben^②

^①(Key Lab of Mobile Communication, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

^②(School of Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In this paper, the generalized orthogonal sequences and N -shift partial length D_0 orthogonal sequences with partial correlations are investigated. In particular, the partial correlation properties of Loosely Synchronized (LS) sequences are analyzed in details. The results show that LS sequences have partial correlation orthogonal property at 4-shift with half length, which can be utilized to construct partial length auto-complementary sequences and even-shift partial length cross-complementary sequences. Multiple-access interference can be eliminated in synchronous Code Division Multiple Access(CDMA) systems if the N -shift partial length D_0 sequences are adopted.

Key words: CDMA; Partial correlation; Generalized orthogonal sequences; Complementary sequence

1 引言

在扩频CDMA(Code Division Multiple Access)系统中, 所有用户使用相同的带宽, 每个发射机以不同的扩展码序列来区分。相关特性是描述扩展码序列间重叠位置的相关测度, 也是衡量系统多址干扰性能的重要指标^[1]。在同步CDMA系统(如CDMA2000的前向链路)中, 著名的二进制Walsh序列在零时延处正交, 系统可利用其理想的正交特性减少多址接入干扰并区分不同的用户, 在同步得到保证的前提下小区间干扰也可被消除。但由于传输信道的频率选择性衰落及路径间干扰, 不同用户间的正交性遭到破坏, 广义正交GO(Generalized Orthogonality)或无干扰窗IFW(Interference Free Window)或零相关区ZCZ(Zero Correlation Zone)的概念应运而生, 并构造出了具有GO特性的GO序列, 可减少由于不同用户正交性遭到破坏而引起的

路径间干扰^[2-4], 松同步LS(Loosely Synchronized)扩频序列就是其中颇具代表性的一类广义正交序列^[5]。这里所提到的正交性和广义正交性均基于周期相关函数。但在实际系统中, 由于序列长度很长, 相关函数的计算需要很长的时间, 因此序列的部分相关(其中相关在子序列间进行运算)特性对实际系统中多址干扰性能的影响非常重要。

Taki等人^[6]讨论了一类元素为1或-1的二进制序列, 其自相关值在除零时延的偶时延处均为0, 称为偶时延正交序列, 此概念后又被Naoki等人^[1]扩展为 N 倍时延互正交序列及由 N 倍时延正交序列组成的完全互补序列(均基于周期或非周期相关函数)。通常, 对于已知序列(如m序列、Gold序列等)部分相关特性的分析是通过对所有可能的起始位置或所有可能时延的部分相关进行计算得到一些“均值”或得到一些上、下界^[7-9]。这些部分相关界均基于所有起始位置和所有时延的。然而, 这些已有研究分析结果不能描述当时延是 N 倍而不是1(如CDMA2000系统的前向链路中, PN序列的时延是64的倍数)时的部分相关特性。

本文扩展了 N 倍时延互正交序列的概念, 即 N 倍时延部

2007-10-17收到, 2008-03-17改回

国家自然科学基金(60772087/90604035)和国家863计划项目(2007AA01Z228)资助课题

分长度 D_0 互正交序列, D_0 是一个小于序列长度的定值。论文重点讨论了部分相关广义正交性的概念, 并分析了LS序列的部分相关特性。提出了一种采用 N 倍时延部分长度 D_0 互正交序列的同步系统方案。

2 定义

假定一个周期为 L 的序列 X , 其元素取 -1 或 $+1$, 用 x_i 来表示(其中 i 为整数),

$$X = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{L-1}\} \quad (1)$$

一个周期序列的部分周期自相关及互相关函数分别定义为

$$\theta_X(\tau, k, D) = \sum_{i=k}^{k+D-1} x_i x_{i+\tau} \quad (2)$$

$$\theta_{X,Y}(\tau, k, D) = \sum_{i=k}^{k+D-1} x_i y_{i+\tau} \quad (3)$$

其中 k 表示相关窗的起始位置, τ 表示相对时延, D 表示相关窗的长度。

序列具有理想部分相关特性即其零时延外的所有时延处部分自相关为零, 所有时延处的部分互相关为零。文献[7-9]中的部分相关下界从理论上证明了具有理想部分相关特性的序列并不存在, 此界基于所有起始位置及时延, 不能描述部分相关广义正交序列的特性, 也不能描述某些特殊时延处的部分相关特性, 而这些特性在实际系统中具有重要意义。

一个“长度为 L 的 N 倍时延部分长度 D_0 自正交序列”定义为具有如下特性的序列 X ,

$$\theta_X(\tau, k, D) = 0, k = 0, \dots, L-1, \tau = \pm N, \pm 2N, \dots, D = D_0 \quad (4)$$

一对“长度为 L 的 N 倍时延部分长度 D_0 互正交序列”定义为具有如下特性的序列 X 和 Y ,

$$\theta_{X,Y}(\tau, k, D) = 0, k = 0, \dots, L-1, \tau = 0, \pm N, \pm 2N, \dots, D = D_0 \quad (5)$$

具有 M 个序列的集合 $\{X_1, X_2, \dots, X_M\}$, 当其中任意两个序列都可以组成一对 N 倍时延部分长度 D_0 互正交序列时, 称为一个“长度为 L 的 N 倍时延部分长度 D_0 互正交序列集”,

$$\theta_{X_i, X_j}(\tau, k, D) = 0, k = 0, \dots, L-1, \tau = 0, \pm N, \pm 2N, \dots, D = D_0, X_i, X_j \in \{X_1, \dots, X_M\}, i \neq j \quad (6)$$

由于具有互补特性的序列集的相关函数定义为所有序列的相关函数之和, 因此互补序列的部分相关函数的定义也需要修改。

具有 M 个序列的集合 $\{X_1, X_2, \dots, X_M\}$, 当其满足如下条件时, 称为“阶为 M 部分长度为 D_0 的自互补序列”,

$$\sum_{j=1}^M \theta_{X_j}(\tau, k, D) = 0, k = 0, \dots, L-1, \tau = 1, \dots, L-1, D = D_0 \quad (7)$$

两个具有 M 个序列的集合 $\{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ 和 $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_M\}$, 当其满足如下条件时称为“阶为 M 部分长度为 D_0 的互互补序列”:

$$\sum_{j=1}^M \theta_{X_j, Y_j}(\tau, k, D) = 0, k = 0, \dots, L-1, \tau = 0, 1, \dots, L-1, D = D_0 \quad (8)$$

M 个具有 M 个序列的集合 $\{X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1M}\}, \dots, \{X_{M1}, X_{M2}, \dots, X_{MM}\}$, 如果其中每个集合都是阶为 M 部分长度为 D_0 的自互补序列, 任意两个集合都是阶为 M 部分长度为 D_0 的互互补序列, 则该集合称为“阶为 M 部分长度为 D_0 的完全互互补序列”,

$$\sum_{j=1}^M \theta_{X_{ij}}(\tau, k, D) = 0, k = 0, \dots, L-1, \tau = 1, \dots, L-1, D = D_0, \sum_{j=1}^M \theta_{X_{ij}, X_{lj}}(\tau, k, D) = 0, i, l = 1, \dots, M, i \neq l, k = 0, \dots, L-1, \tau = 0, 1, \dots, L-1, D = D_0 \quad (9)$$

而且, 该研究还可扩展到部分相关广义正交序列, 具有如下特性:

$$\theta_X(\tau, k, D) = 0, 0 < |\tau| \leq Z, k = 0, 1, \dots, L-1, \theta_{X,Y}(\tau, k, D) = 0, |\tau| \leq Z, k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (10)$$

其中 Z 为零部分相关区。

3 LS 序列的部分相关特性

3.1 二进制 LS 序列的部分相关特性

在文献[5]中的 $L \times L$ 维的 LS 序列矩阵可以表示为

$$LS^L = \begin{bmatrix} C^L & S^L \\ C^L & -S^L \end{bmatrix} \quad (11)$$

对 LS 进行变换可得如下几个序列集,

$$PO_1 = LS^L, PO_2 = \begin{bmatrix} -\tilde{S}^L & \tilde{C}^L \\ \tilde{S}^L & \tilde{C}^L \end{bmatrix}, PO_3 = \begin{bmatrix} \tilde{S}^L & -\tilde{C}^L \\ -\tilde{S}^L & -\tilde{C}^L \end{bmatrix}, PO_4 = \begin{bmatrix} \tilde{S}_o^L & \tilde{C}_e^L \\ -\tilde{S}_o^L & \tilde{C}_e^L \end{bmatrix}, PO_5 = \begin{bmatrix} \tilde{S}_e^L & \tilde{C}_o^L \\ -\tilde{S}_e^L & \tilde{C}_o^L \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 $-S$ 表示 S 的二进制补序列, \tilde{C} 表示 C 的反序, C_o 和 C_e 分别表示改变奇数位和偶数位的 \pm 符号。

PO_1, PO_2, PO_3, PO_4 和 PO_5 具有如下特性:

(1) 序列集 PO_1, PO_2, PO_3, PO_4 和 PO_5 是 4 倍时延 $1/2$ 序列长度自正交序列, 满足如下条件, 其中 L 表示序列长度,

$$\theta_X(\tau, k, D) = 0, k = 0, \dots, L-1, \tau = \pm 4, \pm 2 \times 4, \dots, D = L/2 \quad (13)$$

图 1 中的曲线是基于长度为 64 的二进制 LS 序列的所有起始位置及时延部分相关窗口长度, 分别描述了当相移增量为 1 和 4 倍时的部分自相关旁瓣峰值。由图可见, 当相移增量是 1 时, 其部分自相关旁瓣峰值大于 4 倍时延的部分自相关旁瓣峰值, 且当时延是 4 的倍数, 同时部分相关窗口长度为序列长度的 $1/2$ 时, 其部分自相关旁瓣值均为零。

另外, PO_1, PO_2, PO_3, PO_4 和 PO_5 是阶为 L 长度为 L 的部分长度自互补序列, 具有如下特性:

$$\sum_{j=1}^M \theta_{X_j}(\tau, k, D) = 0, k = 0, \dots, L-1, \tau = \pm 1, 2, \dots, L-1, 0 < D \leq L \quad (14)$$

图2描述了二进制LS序列所有起始位置及时延的部分自相关和值,序列长度和数目均为64,部分相关窗口长度为17。由图可见,无论部分相关窗口的起始位置及时延如何取值,其部分自相关值之和除零时延外均为零。经分析及数值验证,无论部分相关窗口的长度如何取值,其部分自相关值之和除零时延外均为零。

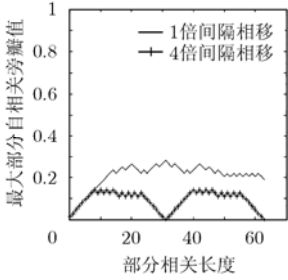


图1 部分自相关旁瓣峰值

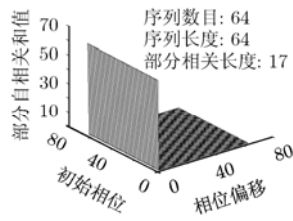


图2 部分自互补序列的部分自相关特性

(2) $\{PO_1, PO_2\}, \{PO_1, PO_3\}, \{PO_1, PO_4\}$ 和 $\{PO_1, PO_5\}$ 中的相应序列是4倍时延1/2序列长度互正交序列,具有如下特性:

$$\begin{aligned} \theta_{X_j, Y_j}(\tau, k, D) &= 0, \\ \{X_j, Y_j\} &\in \{PO_1, PO_2\}, \{PO_1, PO_3\}, \{PO_1, PO_4\}, \{PO_1, PO_5\}, \\ k &= 0, \dots, L-1, \tau = 0, \pm 4, \pm 2 * 4, \dots, D = L/2 \end{aligned} \quad (15)$$

图3中的曲线是基于长度为64的二进制LS序列的所有起始位置及时延部分相关窗口长度,分别描述了当相移增量为1和4倍时的部分互相关值。由图可见,当相移增量是1时,其部分互相关峰值大于4倍时延的部分互相关峰值,且当时延是4的倍数,同时部分相关窗口长度为序列长度的1/2时,其部分互相关值均为零。

另外, $\{PO_1, PO_2\}, \{PO_1, PO_3\}, \{PO_1, PO_4\}$ 和 $\{PO_1, PO_5\}$ 是阶为L长度为L的偶时延部分长度互互补序列,具有如下特性(如图4所示):

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^M \theta_{X_j, Y_j}(\tau, k, D) &= 0, \\ \{X_j, Y_j\} &\in \{PO_1, PO_2\}, \{PO_1, PO_3\}, \{PO_1, PO_4\}, \{PO_1, PO_5\}, \\ k &= 0, \dots, L-1, \tau = 0, \pm 2, \pm 4, \dots, 0 < D \leq L \end{aligned} \quad (16)$$

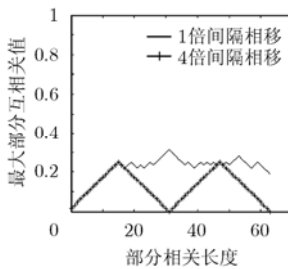


图3 部分互相关峰值

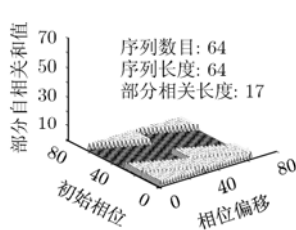


图4 偶时延部分互补序列的部分互相关特性

图4描述了二进制LS序列的所有起始位置及时延的部分互相关和值,序列长度和数目均为64,部分相关窗口长度为17。由图可见,无论部分相关窗口的起始位置及时延如何取值,其部分互相关值之和在偶时延处均为零。经分析及数值验证,无论部分相关窗口长度如何取值,其部分互相关值之和在偶时延处均为零。

3.2 三进制LS序列的部分相关特性

三进制LS序列即分别在二进制LS序列的 C^L 序列和 S^L 序列的后边插入N个零。如

$$\begin{aligned} PO'_1 &= \begin{bmatrix} C^L 0 \dots 0 & S^L 0 \dots 0 \\ C^L \underbrace{0 \dots 0}_N & -S^L \underbrace{0 \dots 0}_N \end{bmatrix}, \\ PO'_2 &= \begin{bmatrix} -\tilde{S}^L 0 \dots 0 & \tilde{C}^L 0 \dots 0 \\ \tilde{S}^L \underbrace{0 \dots 0}_N & \tilde{C}^L \underbrace{0 \dots 0}_N \end{bmatrix}, \dots \end{aligned} \quad (17)$$

三进制LS序列的序列长度为 $L+2N$,在本文的仿真中,假定 $N=16$ 。 $PO'_1, PO'_2, PO'_3, PO'_4, PO'_5$ 具有与 PO_1, PO_2, PO_3, PO_4 和 PO_5 相似的特性,如图5,图6与图1,图2相似,图7,图8与图3,图4相似。由于三进制LS序列的构造特性,其部分自相关旁瓣峰值及部分互相关峰值不可能大于二进制LS序列。且当部分自相关旁瓣峰值或部分互相关峰值达到二进制LS序列的最大值时,由于部分相关窗口的选取会包括零项,因此,最大值会持续一段时间,直到部分相关窗口长度大于达到最大值时的长度与N的和时,部分相关峰值才会发生变化。

同理,由于零项的插入,当部分相关窗口初始值选在零项及零项附近不大于部分相关窗口长度时,其部分相关互互补特性,即使在零时延处也会发生变化。当相关窗口小于N

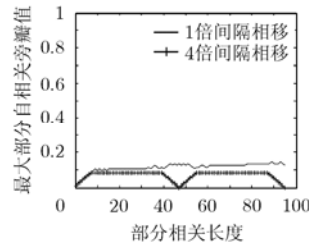


图5 部分自相关旁瓣峰值

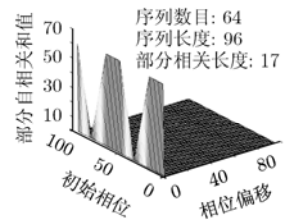


图6 部分自互补序列的部分自相关特性

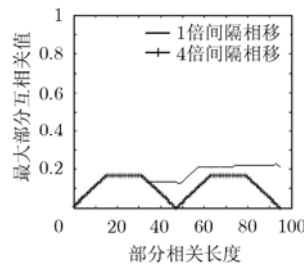


图7 部分互相关峰值

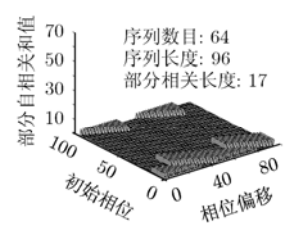


图8 偶时延部分互补序列的部分互相关特性

时,会出现零值。三进制LS序列的偶时延部分相关互互补特性与二进制LS序列偶时延部分相关互互补相关特性的差别也是因此而来。

4 应用方案

在实际应用中,扩频多址系统采用伪随机序列,这些序列有良好的周期自相关,其互相关及非周期相关特性较差。而由于实际系统所采用的序列周期非常长,因此必须花大量的时间计算序列的周期相关函数来进行解扩或捕获,这是不可行的,因此序列的部分相关特性对系统性能有着重要的影响。

基于以上分析,本文提出了一种可消除多址干扰的方案,即在正交条件下采用 N 倍时延部分正交序列,其工作过程如图9所示。在接收端,如果 N 倍时延部分长度 D_0 自正交序列是匹配滤波器的输入,序列部分自相关(部分长度为 D_0)为匹配滤波器的输出,如果输出信号在 N 倍同步间隔时进行抽样,则抽样输出为一个无旁瓣的单脉冲,系统的自干扰即可消除。如果 A 和 B 是一对 N 倍时延部分长度 D_0 的互正交序列, A 和 B 是匹配滤波器的输入,部分互相关是输出,若输出信号在 N 倍同步间隔时进行抽样,则抽样输出是零,系统的多址干扰即可消除。

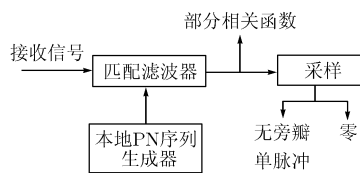


图9 同步系统中部分相关的应用

因此,无多址干扰的同步扩频系统可采用 N 倍时延部分长度 D_0 互正交序列来实现。假定系统有 L 个信道,每个信道分配一个长度为 L 的 N 倍时延部分长度 D_0 正交序列,系统保持同步,每个接收机和每个发射机知道本地生成序列时延 $iN+j$ 和发送序列时延 $iN+k$ 之间的差别,但不知道本地生成序列时延 $iN+j$ 和干扰序列时延 $kN+j$ 之间的差别。每个发射机同步发送序列,每个接收机用本地生成序列对接收的序列进行匹配滤波器接收,并在 N 倍同步间隔进行采样,则每个接收机的采样输出可消除自相关旁瓣及互相关的干扰。每个发射机可在每个 N 倍采样处发送新的信号。

5 结束语

本文研究了部分相关广义正交序列及 N 倍时延部分长度 D_0 正交序列。部分相关广义正交序列即在零时延处附近具有零部分相关区的序列集, N 倍时延部分长度 D_0 正交序列即在 N 倍时延处其自相关值(除零时延外)及互相关值(包括零时延处)均为零。

论文分析了LS序列的部分相关特性。LS序列具有4倍

时延 $1/2$ 序列长度互正交性,经过变换可构造出部分长度自互补序列及偶时延部分长度互互补序列。提出了一种采用 N 倍时延部分长度 D_0 正交序列以消除系统多址干扰的多用户同步扩频系统的应用方案。

致谢 作者同俄罗斯莫斯科物理与技术研究院无线电工程系的Ernst M. Gabidulin教授进行了富有成效的讨论,特此致谢。

参考文献

- [1] Fan P Z and Darnell M. Sequence Design for Communications Applications. RSP, John Wiley & Sons Ltd, London. ISBN 0-471-96557-x, 1996, 516.
 - [2] Zhou Z C and Tang X H. A new class of sequences with zero correlation zone based on interleaved perfect sequences. Information Theory Workshop, ITW'06 Cheng du, IEEE press, 2006: 548-551.
 - [3] Tang X H and Mow W H. Design of spreading codes for quasi-synchronous CDMA with inter-cell interference. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2006, 24(1): 84-93.
 - [4] Li D B. The perspectives of large area synchronous CDMA technology for the fourth-generation mobile radio. *IEEE Commun. Mag.*, 2003, 41(3): 114-118.
 - [5] Li D B. A method for spread spectrum multiple access coding with zero correlation window. Eur. Patent, EP 1257077, Nov. 2002.
 - [6] Taki Y, Miyakawa H, and Hatori M, *et al.* Even-shift orthogonal sequences. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1969, 1(15): 295-300.
 - [7] Paterson K G and Lothian J G. Bounds on partial correlations of sequences. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1998, 44(3): 1164-1175.
 - [8] Feng Lifang and Fan Pingzhi. Generalized bounds on partial aperiodic correlation of complex roots of unity sequences. International Conference on sequence design and their applications, Bengjing, China, 2006: 342-350.
 - [9] Feng Lifang, Fan Pingzhi, and Suehiro Naoki. Generalized bounds on the partial periodic correlation of complex roots of unity sequence set. the Second International Workshop on Sequence Design and Its Applications in Communications (IWSDA), Shimonoseki, Yamaguchi, Japan, 2005: 7-10.
- 冯莉芳: 女, 1980年生, 博士生, 研究方向为序列相关特性研究。
- 范平志: 男, 1955年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息论与编码、移动通信。
- 李道本: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息论与编码、移动通信。