第 37 卷　第 16 期
Vol.37　No.16

计　算　机　工　程
Computer Engineering

2011 年 8 月
August 2011

• 博士论文 •　文章编号：1000—3428(2011)16—0014—03　文献标识码：A　中图分类号：TN92

带格式的：字体颜色：自动设置

基于补零的 Zadoff-Chu 序列检测算法

刘马飞[1,2]，曾学文[2]，倪　宏[2]

(1. 中国科学院研究生院，北京 100190；2. 中国科学院声学研究所国家网络新媒体工程技术研究中心，北京 100190)

摘　要：介绍单载波频域均衡系统的随机接入方案，提出一种基于补零扩展的 Zadoff-Chu 序列的前导检测算法。使用素数 Zadoff-Chu 序列作为用户签名，接收端采用基于时域补零扩展的频域检测方法进行前导检测。仿真结果表明，与传统时域检测算法相比，该算法能在保证检测效果的同时，降低 90%计算复杂度。

关键词：随机接入；Zadoff-Chu 序列；前导检测；频域检测；补零

Zadoff-Chu Sequence Detection Algorithm Based on Zeros Padding

LIU Ma-fei[1,2], ZENG Xue-wen[2], NI Hong[2]

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. National Network New Media Engineering Research Center, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

【Abstract】This paper introduces the SC-FDE system random access scheme employing prime number Zadoff-Chu sequence as user signature, and proposes a Zadoff-Chu sequence full frequency-domain detection algorithm based on zeros padding in time-domain. Simulation result shows that the proposed algorithm can reduce the computation complexity by 90% compared to the traditional time-domain detection algorithm while maintaining same detection performance.

【Key words】random access; Zadoff-Chu sequence; preamble detection; frequency domain detection; zeros padding

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.16.005

1　概述

随机接入技术是移动通信系统中用户终端与网络建立连接，进行通信的首要步骤，其目的之一是获得终端与基站的往返时延的估计，以便有效指导用户站补偿往返时延，保证各个用户发送的数据基站可以准确接收。设计一种快速有效的随机接入前导检测算法对提高系统性能、降低系统复杂度和接入时延有具有重要的意义。单载波频域均衡(SC-FDE)技术[1]，不仅可以有效对抗信道的频率选择性衰落，实现高速率、大容量的通信传输，而且能够避免单载波时域均衡(SC-TDE)复杂度大和正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multi-plexing, OFDM)技术峰平比高的不足，因此，IEEE802.16 建议了基于单载波频域均衡技术的 Wireless MAN-SCa[2]物理层，但主要用于点对点通信，并没有对随机接入进行规范。本文将 Zadoff-Chu[3]序列应用于基于 SC-FDE 技术的随机接入方案，提出一种基于时域补零扩展的 Zadoff-Chu 序列快速检测算法。

2　单载波频域均衡系统随机接入方案

为获得低的虚警概率和高的检测概率，前导签名序列需要具有较小的自相关属性和互相关属性。Zadoff-Chu 序列是一个单位幅度的非二进制序列。奇数长度 N_{ZC} 的 Zadoff-Chu 序列可表示为：

$$x_u(n)=\exp\left[-\mathrm{j}\ u\frac{n(n+1)}{N_{zc}}\right]\quad n=\quad \mathrm{L}\quad N_{zc}- \tag{1}$$

其中，$u\in\{1,2,\mathrm{L}\ ,N_{zc}-1\}$ 为序列的根。相比于 PN 序列，Zadoff-Chu 序列具有恒定幅值特性、良好的自相关属性以及良好的互相关属性，是一种良好的前导签名序列，因此 LTE 系统采用素数长度的 Zadoff-Chu 作为前导签名序列。除此之外，Zadoff-Chu 序列[3]还具有以下 3 个特性：

(1)中心对称性

$$x_{u=a}(n)=x_u(N-1-n) \tag{2}$$

(2)复共轭对称性

若 Zadoff-Chu 序列长为 N，则根 u 序列是根 N-u 序列的共轭，即：

$$x_{u=a}(n)=x^*_{u=N-a}(n) \tag{3}$$

(3)频域对称性

若 $\mathrm{DFT}[x_u(n)]=X_u(k)$，则：

$$\mathrm{DFT}[x_{N-u}(n-1)]_k=X^*_u(k) \tag{4}$$

本文提议在单载波物理层中采用素数长度的 Zadoff-Chu 序列作为随机接入签名序列。前导突发由循环前缀、前导序列以及保护间隔组成，如图 1 所示。

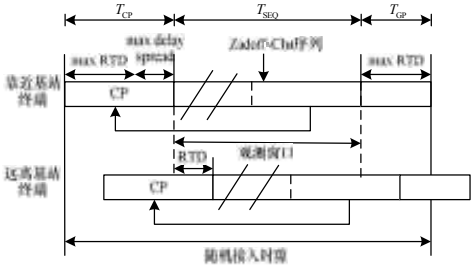


图 1　随机接入前导突发格式

基金项目：国家科技支撑计划基金资助项目(2008BAH25B03)；国家“863”计划基金资助项目(2009AA01A339)

作者简介：刘马飞(1984－)，男，博士研究生，主研方向：宽带多媒体通信；曾学文、倪　宏，研究员、博士生导师

收稿日期：2011-03-21　**E-mail：**zengxw@dsp.ac.cn

循环前缀 CP 用于容纳所有可能的往返时延，其长度 T_{CP} 需要大于最大时延扩展以及当前小区覆盖允许的最大往返时延之和；保护间隔用于隔离随机接入突发对子帧随后的数据传输的干扰，其长度 T_{GP} 需要大于当前小区覆盖允许的最大往返时延值；前导序列部分长为 T_{SEQ}，也需要大于系统最大允许往返时延值。设系统的符号间隔 T_s=0.651 0 μs，系统需要支持的最大覆盖范围约为 60 km，最大时延扩展为 20 μs，设计 2 种随机接入前导格式，如表 1 所示。其中，格式 1 采用 N_{ZC}=653 的 Zadoff-Chu 序列为前导序列；格式 2 采用重复的 2 个 N_{ZC}=653 的 Zadoff-Chu 序列为前导序列。

表 1　前导格式参数

格式	T_{SEQ}/T_s	T_{CP}/T_s	T_{GP}/T_s	最大时延扩展/μs	最大小区半径/km
1	653	329	298	20.181	29.1
2	2×653	643	611	20.832	59.6

3　已有的 Zadoff-Chu 序列检测算法

在随机接入过程中，基站广播其所采用的前导序列集合，广播告知用户终端。用户随机选择一个签名序列，按图 1 构造随机接入突发，以时间提前量为零进行发送。由于用户分布在小区不同位置，其与基站间具有不同的往返时延，随机接入信号到达基站的时刻与基站观测窗口起始位置的时间偏移为其往返时延，如图 1 所示。设前导序列集合中前导序列个数为 m，基站接收窗口长度为 N_{ZC}，记接收窗口起始位置 l=0。传统前导检测方法是时域检测法[4-5]，基站在接收窗口内将所有可能的前导序列 $x_u(n)$ 与接收信号 $y(n)$ 进行滑动相关，即：

$$z_u(l)=\sum_{n=0}^{N_{ZC}-1} y(n+l)x_u^*(n) \tag{5}$$

由于使用了循环前缀，使得基站在接收窗口的接收信号序列为发送序列的循环移位，循环移位的大小反应用户的往返时延值，检测公式为：

$$z_u(l)=\sum_{n=0}^{N_{ZC}-1} y(n)x_u^*[(n+l)_{N_{ZC}}] \tag{6}$$

时域检测由于需要在接收窗口中每一个符号位置计算与所有前导序列的相关值，每个随机接入时隙需要计算 mN_{ZC}^2 次复数乘法，$mN_{ZC}(N_{ZC}+1)$次复数加法，计算复杂度非常大。利用循环前缀带来的周期相关性，文献[4]提出一个应用于 LTE 的随机接入前导频域检测算法。在 LTE 中，由于随机接入信道与其他数据信号是频分复用关系，解调必须将接收时域信号通过 DFT 转换到频域，进行子载波去映射，然后通过 IDFT 转换成到时域，因此因频域检测而增加的计算复杂度相当小，因而其采用频域检测可以较大程度地降低前导检测的计算复杂度。

4　基于补零扩展的 Zadoff-Chu 序列检测方案

对于 SC-FDE 系统，随机接入信号占据整个信道频带，前导检测不必经 DFT 及 IDFT 处理，频域检测看似会增加计算复杂度；但如果能够将素数长度前导序列转换成 2 的幂次长度，按频域检测方法处理，则可以利用 FFT 快速算法减少计算复杂度。通常可以使用过采样的方式获得 2 的幂次序列，但过采样会带来相关峰值扩散，降低了系统性能。因此，本文提议一种基于补零扩展的 Zadoff-Chu 序列频域检测算法，通过序列补零成 2 的幂次长度，从而利用 FFT 快速算法降低计算复杂度，如图 2 所示。同时，该算法能对根序列 $x_u(n)$以及互补序列 $x_{Nzc-u}(n)$一起进行检测，进一步降低检测计算复杂度。

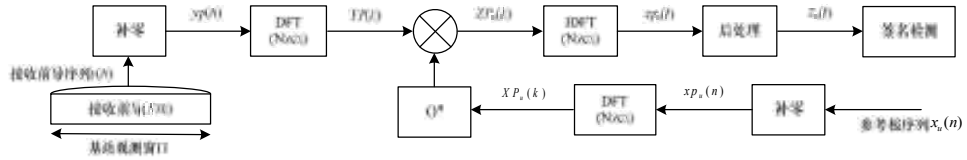


图 2　基于补零扩展的频域 Zadoff-Chu 检测算法

前导检测首先通过将长度 N_{ZC} 的接收序列 $y(n)$和参考序列 $x_u(n)$通过在其后补零，形成长为 N_{ZCX} 的序列 $yp(n)$和 $xp_u(n)$，$xp_u(n)$的 DFT 取共轭后与 $yp(n)$的 DFT 相乘，经过 IDFT 获得扩展互相关检测 $zp_u(l)$，然后通过一定的后处理恢复原始互相关检测 $z_u(l)$。由于补零经过 DFT 以及 IDFT 后，导致 $zp_u(l)$并不是 $z_u(l)$的补零扩展，因此需要考察两者之间的关系，通过特定的后处理恢复。

通过数学分析研究 $zp_u(l)$与 $z_u(l)$的关系，确定后处理的方法。根据图 2 所示，接收序列和接收补零扩展序列可表示为：

$$y(n)=[y(0),\ y(1),\ \cdots,\ y(N_{ZC}-2),\ y(N_{ZC}-1)]$$

$$yp(n)=[y(0),\ y(1),\cdots,\ y(N_{ZC}-1),\ zeros(N_{ZCX}-N_{ZC})] \tag{7}$$

而参考序列和参考补零扩展序列可以表示为：

$$x_u(n)=[x_u(0),\ x_u(1),\ \cdots,\ x_u(N_{ZC}-2),\ x_u(N_{ZC}-1)]$$

$$xp_u(n)=[x_u(0),\ x_u(1),\cdots,\ x_u(N_{ZC}-1),\ zeros(N_{ZCX}-N_{ZC})] \tag{8}$$

记接收扩展序列 $yp(n)$的 DFT 为 $YP(k)$，$xp_u(n)$的 DFT 为 $XP_u(k)$，$XP_u(k)$的复共轭为 $XP^*_u(k)$，表示为：

$$XP_u^*(k)=\left[\sum_{n=0}^{N_{ZCX}-1} x_u(n)W_{N_{ZCX}}^{nk}\right]^*=\sum_{n=0}^{N_{ZCX}-1} x_u^*(n)W_{N_{ZCX}}^{(N_{ZCX}-n)k} \tag{9}$$

令 $m=N_{ZCX}-n$，则式(9)可表示为：

$$XP_u^*(k)=\sum_{m=N_{ZCX}-N_{ZC}+1}^{N_{ZCX}} x_u^*(N_{ZCX}-m)W_{N_{ZCX}}^{mk} \tag{10}$$

因此，$XP^*_u(k)$ 可等于如下序列的 DFT：

$$xpc_u(\mathrm{n})=[\ x_u^*(0),zeros(N_{ZCX}-N_{ZC}),\ x_u^*(N_{ZC}-1)\ ,\cdots,\ x_u^*(1)\ ] \tag{11}$$

其中，$zeros(m)$表示连续 m 个零的序列段。根据图 2 所示，$XP^*_u(k)$与 $YP(k)$相乘，然后经过 IDFT 获得 $zp_u(l)$。根据 DFT 的性质，$zp_u(l)$可以由 $yp(n)$和 $xpc_u(n)$的圆周卷积计算得到。根据圆周卷积公式，将 $zp_u(l)$的每一项展开如下：

$$zp_u(0)=[\ x_u^*(0),\cdots,\ x_u^*(N_{ZC}-1)\ ,\ zeros(N_{ZCX}-N_{ZC})]\times yp(n)^{\mathrm{T}}$$

$$zp_u(1)=[zeros(1),\ x_u^*(0),\cdots,\ x_u^*(N_{ZC}-1),\ zeros(N_{ZCX}-N_{ZC}-1)]\times yp(n)^{\mathrm{T}}$$

$$\cdots$$

$$zp_u(N_{ZCX}-N_{ZC})=[zeros(N_{ZCX}-N_{ZC}),\ x_u^*(0),\cdots,\ x_u^*(N_{ZC}-1)\ ]\times yp(n)^{\mathrm{T}}$$

$$zp_u(N_{ZCX}-N_{ZC}+1)=[\ x_u^*(N_{ZC}-1)\ ,\ zeros(N_{ZCX}\text{-}N_{ZC}),\ \mathrm{x}^*_{\mathrm{u}}(0),\cdots,\ x_u^*(N_{ZC}-2)\ ]\times yp(n)^{\mathrm{T}}$$

$$\cdots$$

$$zp_u(N_{ZCX}-1)=[\ x_u^*(1)\ ,\cdots,\ x_u^*(N_{ZC}-1)\ ,zeros(N_{ZCX}-N_{ZC}),\ x_u^*(0)]\times yp(n)^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

将上述结果与式(6)进行比对，只要满足 $N_{ZCX}>2N_{ZC}-1$，则 $z_u(l)$可由 $zp_u(l)$经过如下后处理获得，该后处理方式为：

$$z_u(0)=zp_u(0)$$
$$z_u(n)=zp_u(n)+zp_u(n+N_{ZCX}-N_{ZC}),\ n=1,2,\cdots,N_{ZC}-1 \quad (13)$$

记 $YP(k)$与 $XP_u(k)$的乘积的 IDFT 输出为 $zp_{Nzc\text{-}u}(l)$，根据 DFT 的性质，$zp_{Nzc\text{-}u}(l)$可由 $yp(n)$和 $xp_u(n)$的圆周卷积计算得到。根据式(2)和式(3)所示的 Zadoff-Chu 序列特性，$xp_u(n)$序列又可以写成如下形式：

$$xp_u(n)=[x_u(0),\cdots,x_u(N_{ZC}-1),zeros(N_{ZCX}-N_{ZC})]=$$
$$[x^*_{Nzc\text{-}u}(0),\cdots,x^*_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC}-1),\ zeros(N_{ZCX}-N_{ZC})]=$$
$$[x^*_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC}-1),\cdots,\ x^*_{Nzc\text{-}u}(0),\ zeros(N_{ZCX}-N_{ZC})] \quad (14)$$

根据圆周卷积公式，将 $zp_{Nzc\text{-}u}(l)$的每一项展开如下：

$$zp_{Nzc\text{-}u}(0)=[x^*_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC}-1),zeros(N_{ZCX}-N_{ZC}),x^*_{Nzc\text{-}u}(0),\cdots,$$
$$x^*_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC}-2)]\times yp(n)^{\mathrm{T}}$$
$$zp_{Nzc\text{-}u}(1)=[x^*_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC}-2),x^*_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC}-1),zeros(N_{ZCX}-N_{ZC}),$$
$$x^*_{Nzc\text{-}u}(0),\cdots,x^*_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC}-3)]\times yp(n)^{\mathrm{T}}$$
$$\cdots$$
$$zp_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC}-1)=[x^*_{Nzc\text{-}u}(0),\cdots,x^*_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC}-1),zeros(N_{ZCX}-N_{ZC})]\times yp(n)^{\mathrm{T}}$$
$$zp_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC})=[zeros(1),x^*_{Nzc\text{-}u}(0),\cdots,x^*_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC}-1),zeros(N_{ZCX}-N_{ZC}-1)]\times yp(n)^{\mathrm{T}}$$
$$\cdots$$
$$zp_{Nzc\text{-}u}(N_{ZCX}-1)=[zeros(N_{ZCX}-N_{ZC}),x^*_{Nzc\text{-}u}(0),\cdots,x^*_{Nzc\text{-}u}(N_{ZC}-1)]\times yp(n)^{\mathrm{T}} \quad (15)$$

将上述结果与式(6)进行比对，只要 $N_{ZCX}>2N_{ZC}-1$，根 $N_{zc\text{-}u}$序列的互相关检测 $z_{Nzc\text{-}u}(l)$可通过 $zp_{Nzc\text{-}u}(l)$进行后处理获得，后处理方式为：

$$z_{Nzc\text{-}u}(0)=zp_{Nzc\text{-}u}(0)$$
$$z_{Nzc\text{-}u}(n)=zp_{Nzc\text{-}u}(n\text{-}1)+zp_{Nzc\text{-}u}(n\text{-}1+N_{ZC}),\ n=1,2,\cdots,N_{ZC}-1 \quad (16)$$

因此，根 u 和 N_{ZC}-u 的 Zadoff-Chu 序列为互补序列，可以通过频域检测联合进行。

由于每次执行 FFT，需要运行 $N_{ZCX}\mathrm{lb}(N_{ZCX})/2$ 次复数乘法和 $N_{ZCX}\mathrm{lb}(N_{ZCX})$复数加法，因此当小区采用前导成对配置时，所提议的前导频域算法检测在每个随机接入时隙需要运行的乘法次数 $mN_{ZCX}[\mathrm{lb}(N_{ZCX})+1]$，而需要的复数加法次数为 $m[2N_{ZCX}\mathrm{lb}(N_{ZCX})+N_{ZC}]$次。

假设每个小区前导序列数目 m=64，将 N_{ZC}=653，N_{ZCX}=2 048 代入并与时域检测算法复杂度进行比较，如表 2 所示。

表 2 计算复杂度对比

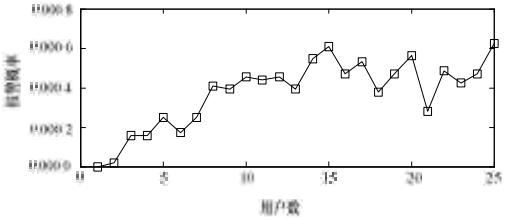
检测算法	复数乘法次数	复数加法次数
时域检测	27 290 176	27 248 384
频域检测	1 572 864	2 925 376
频/时复杂度比	0.057 0	0.107 4

由表 2 可以看出，提议的频域检测算法需要运行的复数乘法和复数加法次数分别约为时域检测需要次数的 1/20 和 1/10，较大地降低了计算复杂度。

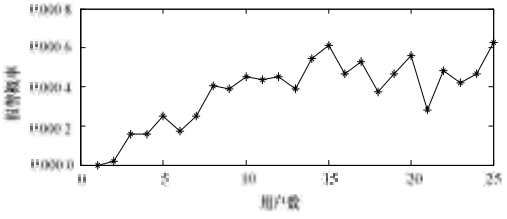
5 仿真和结果分析

由上面的理论分析可知，补零扩展的频域检测和传统的时域检测应该完全等效，因而 2 种方法获得的随机接入性能应该完全一致。

为对此进行验证，随机接入仿真中分别采用补零频域检测和传统时域检测在 SUI-5 信道信噪比 0 dB 下进行 1 000 次试验，统计漏检概率、假警概率如图 3 和图 4 所示。可以看出，补零频域检测和传统时域检测完全等效，验证了补零频域检测的正确性。

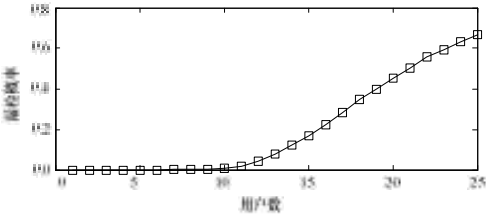


(a)时域检测

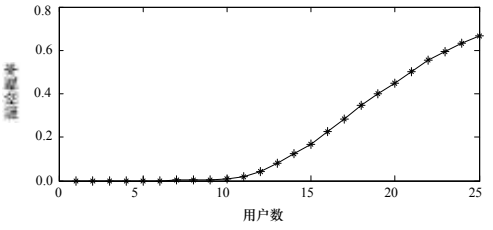


(b)补零扩展频域检测检测

图 3 假警概率比较



(a)时域检测



(b)补零扩展频域检测

图 4 漏检概率比较

6 结束语

本文介绍了 Zadoff-Chu 序列应用于单载波频域均衡系统随机接入的方案，并基于该方案提出一个基于时域补零扩展的 Zadoff-Chu 序列的前导检测算法。该算法能够同时对根为 u 和 N_{ZC}-u 的互补 Zadoff-Chu 序列进行联合检测，以及通过将序列补零成 2 的幂次进行频域检测，从而利用 FFT 快速算法降低计算复杂度。通过分析表明，该算法相比于传统的时域检测算法降低 90%的计算复杂度。单载波技术因其低峰均功率比和高覆盖效率在地面广播和无线宽带接入中依然受到重视。下一步研究方向是在现有经过软件无线电实验验证的 SC-FDE 点对点传输方案[6-7]的基础上加入随机接入检测功能进行传输实验，以验证和形成基于单载波技术的宽带无线接入回传完整方案。

(下转第 20 页)