



一种适合多载波码分多址系统的扩频序列

张志成, 黄小娜, 熊 丽

(河西学院物理与机电工程学院 张掖 734000)

摘 要:多载波码分多址(MC-CDMA)技术结合了正交频分复用(OFDM)技术和码分多址(CDMA)技术的优点,具有数据传输速率高、频谱利用率高、抗干扰能力强和系统容量大的优点,是现阶段备受瞩目的一种无线通信方式。由于该通信系统中的码分多址技术结合了多载波调制技术,所以要求该系统中使用的扩频序列在兼具良好的自相关、互相关特性的同时,还要有较低的峰均比,这对扩频序列的设计提出了较高的要求。为了满足上述要求,设计了一种以 Golay 码为基础码,以 m 序列对 Golay 码进行加扰的扩频序列,该扩频序列具有良好的自相关、互相关特性,且峰均比较低。通过对比仿真验证,证明了本文中设计的扩频序列具有良好的特性,适用于 MC-CDMA 系统。

关键词: MC-CDMA; 扩频序列; Golay 码; m 序列

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015305

A Spread Spectrum Sequence for MC-CDMA System

Zhang Zhicheng, Huang Xiaona, Xiong Li

(College of Physics and Electromechanical Engineering, He Xi University, Zhangye 734000, China)

Abstract: The MC-CDMA system takes the advantages of the OFDM system and the CDMA system. The MC-CDMA system is a kind of wireless communication aroused an ongoing and growing research interests, which has the characteristics of high bit transmission rate, high bandwidth efficiency, anti-jamming, and a large system capacity. Since the MC-CDMA system includes the multi-carrier modulation, it is difficult to design a spread spectrum sequence performing not only a high level of self-correlation and cross-correlation but also a low peak-to-average power ratio in the MC-CDMA system. To solve this problem, a spread spectrum sequence which was modulated by Golay code and m sequence was proposed. The spread spectrum sequence proposed owned a good performance in self-correlation, cross-correlation and peak-to-average power ratio. The simulation results show the effectiveness and the superiority of the proposed spread spectrum sequence.

Key words: MC-CDMA, spread spectrum sequence, Golay code, m sequence

1 引言

无线通信在人类的生活中得到了越来越广泛的应用,

因此,对于无线通信的研究也越来越受到重视。MC-CDMA 是一种在无线通信领域中具有良好前景和研究价值的通信系统^[1,2]。该系统结合了 OFDM(orthogonal frequency division

收稿日期:2015-04-19;修回日期:2015-11-04

论文引用格式:张志成,黄小娜,熊丽. 一种适合多载波码分多址系统的扩频序列. 电信科学, 2015305

Zhang Z C, Huang X N, Xiong L. A spread spectrum sequence for MC-CDMA system. Telecommunications Science, 2015305

multiplexing, 正交频分复用) 和 CDMA 两种先进的通信技术。其中 OFDM 是一种多载波调制技术, 具有传输速率快、频谱利用率高、抗码间干扰和抗多径干扰的特点^[3,4]; CDMA 是 3G 通信中的核心技术, 具有抗干扰能力强和系统容量大的特点^[5,6]。MC-CDMA 系统融合了上述两种通信技术的优点, 具有数据传输速率快、频谱利用率高、抗干扰能力强和系统容量大等优点, 是一种具有良好特性的无线通信系统。

MC-CDMA 系统融合了 CDMA 技术, 因此在通信过程中需要使用扩频序列。在 CDMA 技术中使用的扩频序列需要具有良好的自相关和互相关特性, 从而保证系统的抗干扰和多址性能^[7]。由于 MC-CDMA 系统又融合了多载波调制的 OFDM 技术, 多载波调制往往会带来较大的峰均比, 较大的峰均比会对后级放大电路造成不利的影响^[8], 因此, MC-CDMA 系统中使用的扩频序列还应具有低峰均比的特性。在已有的扩频序列中, Walsh 码^[9]具有理想的互相关特性, 但自相关特性稍差, m 序列^[10]和正交 Gold 码^[11]都具有良好的自相关和互相关特性, 但两种扩频序列的峰均比都较高; Golay 码^[12]的峰均比较低, 但自相关、互相关特性稍差。现有成果主要集中在对扩频序列单一特性的研究, 很少有对扩频序列的自相关特性、互相关特性和峰均比特性综合起来研究。

针对上述问题, 本文设计了一种适合 MC-CDMA 系统, 具有良好自相关、互相关特性, 且峰均比较低的扩频序列。该序列以 Golay 码为基础码, Golay 码具有较低的峰均比特性, 但自相关和互相关特性不理想。再以 m 序列为扰码, 对 Golay 码进行加扰, 从而使新生成的扩频序列(称为 m -Golay 码)在具有较低峰均比特性的同时, 具有良好的自相关和互相关特性。通过与其他扩频序列的对比仿真验证, 证明了本文中设计的 m -Golay 码具有良好的特性, 适合在 MC-CDMA 系统中使用。

2 MC-CDMA 系统发射机模型

MC-CDMA 系统发射机原理如图 1 所示。其中 A_i 为发射的比特流, $a_i(1), \dots, a_i(n)$ 为 A_i 经过串并变换后的并行比特数据, $c_i(1), \dots, c_i(n)$ 为对应扩频序列的码片, S_i 为经过多载波调制后的发射信号。MC-CDMA 系统发射机的具体工作过程: 首先将高速串行的发射比特流 A_i 经过串并变换, 变为 n 路并行的低速比特流, 其中每一路并行比特流的码元周期都等于原 n 个串行比特流的码元周期之和, 即经过串

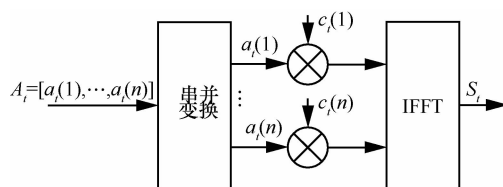


图 1 MC-CDMA 系统发射机原理

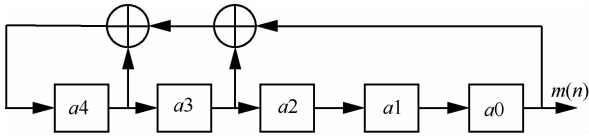
并变换后的新码元周期变为原码元周期的 n 倍, 码元周期的增长可以提高抗码间干扰能力^[3,4]。接下来每个并行比特与对应扩频序列 $c_i(i)(i=1, \dots, n)$ 的一个码片进行频域扩频, 频域扩频之后的序列进行逆傅里叶变换 (inverse-fast Fourier transformation, IFFT) 后就被调制到了多个相互正交的子载波上并叠加, 该叠加信号即 S_i 。上述处理之后, S_i 还要经过添加循环前缀等操作才能进行发射, 文中只是为了说明 MC-CDMA 系统发射机的原理, 这些细节已省略。

3 m -Golay 码的设计与理论分析

MC-CDMA 系统兼具 OFDM 技术中多载波调制和 CDMA 技术中多用户的特点, 因此要求 MC-CDMA 系统中使用的扩频序列要兼具良好的自相关、互相关特性和较低的峰均比。针对 MC-CDMA 系统对扩频序列的要求, 本文设计了一种兼具良好的自相关、互相关特性和较低的峰均比的扩频序列, 该序列使用 m 序列对 Golay 码进行加扰, 形成新的 m -Golay 码。 m -Golay 码的自相关、互相关特性与 m 序列相比略有损失, 但优于 Golay 码。 m -Golay 码的峰均比与 Golay 码的峰均比接近, 比 m 序列的峰均比大大降低。根据 m -Golay 码生成的方式判断, 同一长度的 m -Golay 码数量也很大, 满足多用户通信的需求。下面具体介绍 m -Golay 码的生成过程。

3.1 m 序列

m 序列^[10]是伪随机码(PN 码)的一种, 其具有良好的自相关和互相关特性, 在许多扩频通信系统中得到了应用, 是应用最为广泛的 PN 码之一。对于 n 阶 m 序列, 可以由一个 n 级反馈移位寄存器生成, 其对应的 m 序列周期为 $2^n - 1$, 其生成原理如图 2 所示, 图 2 中以 4 阶 m 序列为例进行说明, $a0$ 到 $a4$ 为移位寄存器, $m(n)$ 为生成的 m 序列。每一个时钟周期移位寄存器中的值向右移动一位, 同时有反馈结构的移位寄存器(如 $a4$, $a3$ 和 $a0$)中的值进行模 2 和(或异或)操作产生新的数值, 该数值传输给最左边的移位寄存器(即 $a4$)。同时, 每一个时钟周期, 最右边的移位寄存器(即 $a0$)输出 m 序列的值。如此循环, 就可以生成周期为 $2^n - 1$ 的 m 序列。

图 2 4 阶 m 序列信号发生器

3.2 Golay 码

Golay 码^[2]是一类具有低峰均比特性的序列,其构造方式为:任意两个长度均为 N 的序列 $\{a_n\}$ 和 $\{b_n\}$,只要满足条件:

$$\sum_{n=1}^{N-i} a_n a_{n+i} + \sum_{n=1}^{N-i} b_n b_{n+i} = \begin{cases} 2N, & i=0 \\ 0, & i \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

则 $\{a_n\}$ 和 $\{b_n\}$ 中任意一个均可称为 Golay 码, $\{a_n\}$ 和 $\{b_n\}$ 称为一对 Golay 互补序列。在实际应用中,一般根据 Golay 核序列对生成所需长度的 Golay 码。目前研究发现的 Golay 核序列对有 4 种,分别为长度为 2 的一对 Golay 核序列对 $\{K2a\}=11, \{K2b\}=10$, 长度为 10 的两对 Golay 核序列对 $\{K10a\}_1=1001010001, \{K10b\}_1=1000000110$ 和 $\{K10a\}_2=0101000011, \{K10b\}_2=0000100110$, 长度为 26 的一对 Golay 核序列对 $\{K26a\}=01001101111010111100111010, \{K26b\}=10110010000111111100111010$ 。Golay 核序列对中任意一个核序列前半元素不变,后半元素取反后级联在原核序列后边,生成长度变为原核序列长度两倍的新 Golay 码,根据此条性质,可以构造出长度为 Golay 核序列对长度 2^n 倍的 Golay 码。此外,一对 Golay 互补序列中的任意一个 Golay 码在取反或者取逆序列后,仍然与另一个 Golay 码构成一对 Golay 互补序列,根据此条性质,一对 Golay 互补序列通过变换可以得到很多个同一长度的 Golay 码。根据上述两条性质,可以利用 Golay 核序列对生成所需的 Golay 码。

3.3 m -Golay 码的设计

本文设计的 m -Golay 码以 Golay 码为基础码,以 m 序列为扰码。生成 Golay 码时,选取长度为 2 的一对 Golay 核序列对 $\{K2a\}=11, \{K2b\}=10$ 作为基础,可以生成长度为 2^n 的多种 Golay 码。生成的 m 序列的长度为 2^n-1 ,其中 1 的个数比 0 的个数多一个,为了与 Golay 码的长度相匹配,在生成的 m 序列末尾补一个 0,使其总长度变为 2^n 。经过仿真验证,末尾补 0 后并不影响 m 序列的自相关和互相关特性。然后将长度均为 2^n 的 Golay 码和 m 序列按位进行模 2 和(或异或)操作,生成的新序列就是 m -Golay 码。

生成 m -Golay 码时,基础码需要很多种,相应的扰码只需要一种即可。根据 Golay 码的生成方式可知,利用长度为 2 的 Golay 核序列对可以生成多种长度为 2^n 的 Golay 码,

只要生成一个相应长度的 m 序列,便可以得到与 Golay 码个数相同的 m -Golay 码,从而保证了 m -Golay 码的数量,可以满足多用户系统的需求。 m -Golay 码不仅具有易构性,由第 4 节中的仿真可知, m -Golay 码还具有良好的自相关、互相关特性和较低的峰均比特性。

3.4 m -Golay 码的理论分析

本节将对 m -Golay 码自相关特性、互相关特性和峰均比特性进行理论分析,对 m -Golay 码的性能进行定性描述。在计算自相关函数、互相关函数和峰均比时,都需要对扩频序列做比特映射变换,即 0 映射为 1,1 映射为 -1。

3.4.1 自相关分析

自相关特性是表征扩频序列与其自身延迟信号相似度的特性,其计算方法为扩频序列与自身信号循环移动 1 位后按位相乘,然后把相乘的结果进行叠加,得出自相关函数的一个点,以此类推,直至循环移位一个周期后,即可求出自相关函数。设生成 m -Golay 码的 m 序列为 $\{a_n\}$, Golay 码为 $\{b_n\}$, m 序列自相关函数 $R_a(n)$ 和 Golay 码自相关函数 $R_b(n)$ 分别为:

$$R_a(n) = a_1 \times a_{\text{mod}(1+n,n)} + a_2 \times a_{\text{mod}(2+n,n)} + \cdots + a_n \times a_{\text{mod}(n+n,n)}, n=0,1,\dots,n-1 \quad (2)$$

$$R_b(n) = b_1 \times b_{\text{mod}(1+n,n)} + b_2 \times b_{\text{mod}(2+n,n)} + \cdots + b_n \times b_{\text{mod}(n+n,n)}, n=0,1,\dots,n-1 \quad (3)$$

其中, mod 表示取余数运算, $\times$ 表示相乘运算, $+$ 表示叠加运算。当 $n=0$ 时,即信号与自身延迟信号对齐时,其自相关函数对应点为信号与自身按位相乘并把相乘结果进行叠加的结果,表现为一个较大的峰值。当 n 为其他值时,其自相关函数对应点为信号与自身延迟信号按位相乘并把相乘结果进行叠加的结果,由于 m 序列是类似于白噪声的信号,具有强烈的随机性,因此,此时的自相关函数对应点表现为一系列较小的旁瓣;而 Golay 码随机性较差,因此,此时的自相关函数对应点表现为一系列较大的旁瓣。设 m -Golay 码为 $\{x_n\}$, 其自相关函数 $R_x(n)$ 为:

$$\begin{aligned} R_x(n) &= (a_1 \times b_1) \times (a_{\text{mod}(1+n,n)} \times b_{\text{mod}(1+n,n)}) + \cdots + \\ &\quad (a_n \times b_n) \times (a_{\text{mod}(n+n,n)} \times b_{\text{mod}(n+n,n)}), n=0,\dots,n-1 \\ &= (a_1 \times a_{\text{mod}(1+n,n)}) \times (b_1 \times b_{\text{mod}(1+n,n)}) + \cdots + \\ &\quad (a_n \times a_{\text{mod}(n+n,n)}) \times (b_n \times b_{\text{mod}(n+n,n)}), n=0,\dots,n-1 \end{aligned} \quad (4)$$

m -Golay 码自相关函数可以认为是 m 序列自相关函数和 Golay 码自相关函数对应点按位相乘后,再把相乘结果

进行叠加。当 $n=0$ 时, 即 m -Golay 码与自身延迟信号对齐时, 其自相关函数对应点为信号与自身按位相乘并把相乘结果进行叠加的结果, 由于此时 m 序列和 Golay 码均为信号与自身延迟信号对齐, 因此 m -Golay 码自相关函数对应点表现为一个较大的峰值, 且与 m 序列和 Golay 码的自相关函数峰值均相等。当 n 为其他值时, m -Golay 码自相关函数对应点可以认为是 m 序列自相关函数与一个随机性稍差的序列 (Golay 码自相关函数) 按位相乘并把相乘结果进行叠加的结果, 因此, m -Golay 码自相关特性比 m 序列自相关特性稍差; 同理, m -Golay 码自相关函数对应点也可以认为是 Golay 码自相关函数与一个随机性稍好的序列 (m 序列自相关函数) 按位相乘并把相乘结果进行叠加的结果, 因此, m -Golay 码自相关特性比 Golay 码自相关特性稍好。

3.4.2 互相关分析

互相关特性是表征扩频序列与干扰信号相似度的特性, 其计算方法与自相关函数计算方法相同, 只是变为扩频序列与干扰信号循环移动 1 位后按位相乘, 然后把相乘结果进行叠加, 得出互相关函数的一个点, 以此类推, 直至循环移位一个周期后, 即可求出互相关函数。设两组 m 序列分别为 $\{a_n\}$ 和 $\{b_n\}$, 两组 Golay 码分别为 $\{c_n\}$ 和 $\{d_n\}$, 上述两组 m 序列互相关函数 $R_{ab}(n)$ 和上述两组 Golay 码互相关函数 $R_{cd}(n)$ 分别为:

$$R_{ab}(n) = a_1 \times b_{\text{mod}(1+n,n)} + a_2 \times b_{\text{mod}(2+n,n)} + \cdots + a_n \times b_{\text{mod}(n+n,n)}, n = 0, 1, \cdots, n-1 \quad (5)$$

$$R_{cd}(n) = c_1 \times d_{\text{mod}(1+n,n)} + c_2 \times d_{\text{mod}(2+n,n)} + \cdots + c_n \times d_{\text{mod}(n+n,n)}, n = 0, 1, \cdots, n-1 \quad (6)$$

由于 m 序列是类似于白噪声的信号, 具有强烈的随机性, 其互相关函数表现为一系列较小的值, 即两组 m 序列之间相似性较小; 而 Golay 码随机性较差, 其互相关函数表现为一系列较大的值, 即两组 Golay 码之间相似性较大。设两组 m -Golay 码分别为 $\{x_n\}$ 和 $\{y_n\}$, $\{x_n\}$ 由 m 序列 $\{a_n\}$ 和 Golay 码 $\{c_n\}$ 生成, $\{y_n\}$ 由 m 序列 $\{a_n\}$ 和 Golay 码 $\{d_n\}$ 生成, 上述两组 m -Golay 码互相关函数 $R_{xy}(n)$ 为:

$$\begin{aligned} R_{xy}(n) &= (a_1 \times c_1) \times (a_{\text{mod}(1+n,n)} \times d_{\text{mod}(1+n,n)}) + \cdots + \\ &\quad (a_n \times c_n) \times (a_{\text{mod}(n+n,n)} \times d_{\text{mod}(n+n,n)}), n = 0, \cdots, n-1 \\ &= (a_1 \times a_{\text{mod}(1+n,n)}) \times (c_1 \times d_{\text{mod}(1+n,n)}) + \cdots + \\ &\quad (a_n \times a_{\text{mod}(n+n,n)}) \times (c_n \times d_{\text{mod}(n+n,n)}), n = 0, \cdots, n-1 \end{aligned} \quad (7)$$

$R_{xy}(n)$ 可以认为是 m 序列自相关函数和 Golay 码互相关

函数对应点按位相乘后, 再把相乘结果进行叠加。由于 m 序列类似于白噪声信号, 具有强烈的随机性, 因此, 其自相关函数仍为一组具有较强随机性的序列, 该序列和 Golay 码互相关函数对应点按位相乘并把相乘结果进行叠加生成的 m -Golay 码互相关函数, 可以认为比 Golay 码互相关函数具有更大的随机性, 因此, m -Golay 码互相关特性比 Golay 码互相关特性稍好; 同理, 由于增大了随机性, 使得 m -Golay 码有接近于 m 序列的互相关特性。

3.4.3 峰均比特性分析

峰均比特性是表征信号中峰值功率与平均功率之比的特性。其计算方法为多组扩频序列叠加在一起形成的混叠信号的峰值功率与平均功率之比。设生成一系列 m -Golay 码的 m 序列为 $\{a_n\}$, Golay 码分别为 $\{b_n\}$ 、 $\{c_n\}$ 、 $\cdots$ 、 $\{x_n\}$, 这些 m -Golay 码的混叠信号 $R(n)$ 为:

$$\begin{aligned} R(n) &= \left\{ (a_1 \times b_1) + (a_1 \times c_1) + \cdots + (a_1 \times x_1) \cdots \right. \\ &\quad \left. (a_n \times b_n) + (a_n \times c_n) + \cdots + (a_n \times x_n) \right\} \\ &= \{a_1 \times (b_1 + c_1 + \cdots + x_1) \cdots a_n \times (b_n + c_n + \cdots + x_n)\} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $R(n)$ 可以认为是 Golay 码混叠信号中的各点和 m 序列中对应点按位相乘的结果, 即相当于峰均比特性较好的 Golay 码混叠信号中的各点进行随机的幅度极性反转而幅度大小不发生变化。因此, Golay 码混叠信号的峰值功率不变, 且基本不改变 Golay 码混叠信号的平均功率, 所以, m -Golay 码的峰均比特性比 Golay 码的峰均比特性稍差。经过上述分析, m -Golay 码具有接近于 Golay 码的峰均比特性, 且 Golay 码的峰均比特性比 m 序列的峰均比特性优秀很多, 因此, m -Golay 码的峰均比特性要比 m 序列的峰均比特性优秀。

4 仿真结果

为了验证本文中设计的 m -Golay 码的性能, 对 Walsh 码、 m 序列、正交 Gold 码、Golay 码和 m -Golay 码进行了对比仿真, 对比仿真各种扩频序列的自相关特性、互相关特性和峰均比特性。仿真中的扩频序列周期均为 2^5 , 即 32。

4.1 自相关特性

自相关特性是表征扩频序列与其自身延迟信号相似度的特性, 在信号检测中具有重要的作用, 即如果当扩频序列与其自身延迟信号在完全对齐的情况下, 其自相关值是一个较大的峰值, 而在没有对齐的情况下, 其自相关值是比较平坦的值, 就表明该扩频序列具有良好的自相关特



性,容易被准确检测到。

上文中提到的5种扩频序列的自相关特性对比仿真结果如图3所示。由图3可知,Walsh码的自相关特性较差,其他4种扩频序列的自相关特性中都出现了峰值,性能也类似。图3(f)为各种扩频序列自相关特性中主瓣峰值与最大旁瓣值的比值,该比值越大说明峰值越明显,即自相关性越好。由图3(f)可以看出, m 序列的自相关特性最好,其次是正交Gold码和 m -Golay码,Golay码的自相关特性与其他3种扩频序列相比较差,Walsh码没有出现明显峰值,自相关特性最差。

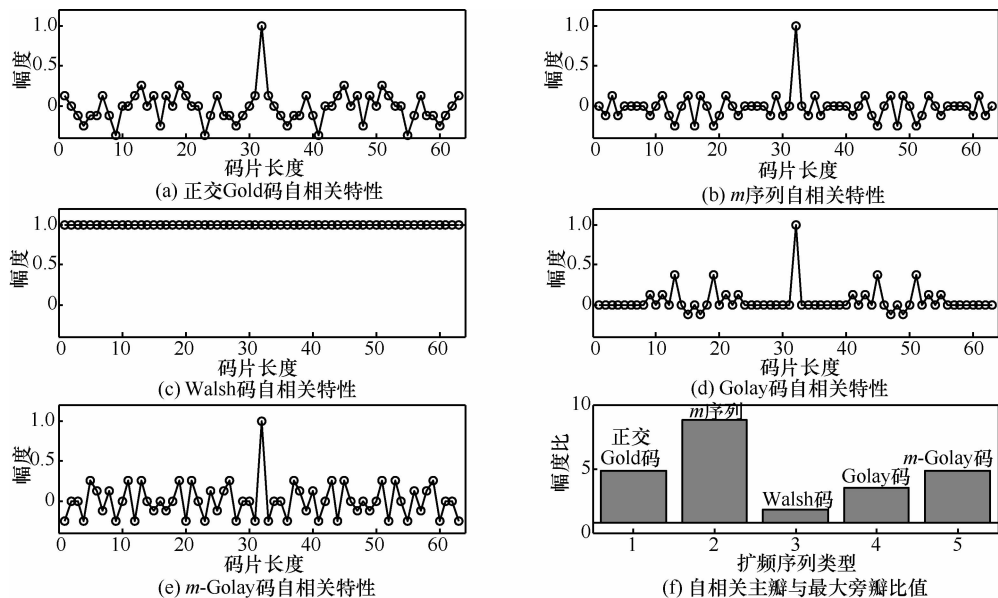


图3 5种扩频序列自相关特性对比

4.2 互相关特性

互相关特性是表征扩频序列与干扰信号相似度的特性,在区分多用户信号、屏蔽其他用户信号带来的干扰中具有重要作用,即如果当扩频序列与干扰信号的互相关值始终是一个较小的值,就表明该扩频序列具有良好的互相关特性,解扩后干扰信号对该扩频序列对应的用户信号干扰很小。

上文中提到的5种扩频序列的互相关特性对比仿真结果如图4所示。由图4可知,只有Walsh码的互相关特性处处为零,即Walsh码是完全正交的,其他4种扩频序列的互相关特性中都出现了非零值,即其它4种扩频序列

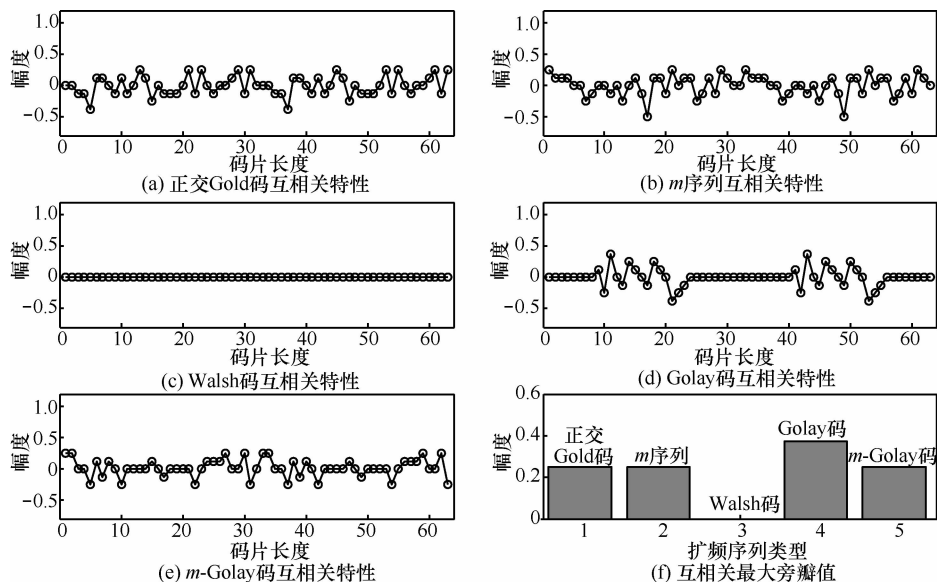


图4 5种扩频序列互相关特性对比

都是准正交的,而且性能也类似。图 4(f)为各种扩频序列互相关特性中最大旁瓣值,该值越大说明不同扩频序列之间干扰越明显,即互相关性越差,由图 4 (f) 可以看出, Walsh 码的互相关性最好, m 序列、正交 Gold 码和 m -Golay 码的互相关特性次之, Golay 码的互相关特性最差。

4.3 峰均比特性

峰均比特性是表征信号中峰值功率与平均功率之比的特性。较高的峰均比往往对于后级放大器有不利的影响,当峰均比较高时,后级放大器如果对于较小的信号进行了合适的放大,峰值信号采用同样的放大倍数往往会出现削峰现象,如果后级放大器的放大倍数不使峰值信号出现削峰现象,在该放大倍数下较小的信号往往得不到合适的放大,所以较低的峰均比对于信号的无失真传输具有重要意义。

在多载波调制中,由于调制在各个子载波中的信号是随机的,多个随机信号调制后的载波叠加在一起往往会产生较大的峰均比。为了降低多载波调制的峰均比,目前主要的措施有设计低峰均比扩频码技术^[12]、削峰技术^[13]和改变子载波初相位技术^[14]。削峰技术容易造成信号邻近信道功率比(adjacent channel power ratio, ACPR)和误差向量幅度(error vector magnitude, EVM)恶化,从而影响到邻近信道的信号和信号自身的特性。改变子载波初相位技术在子载波数目较大时计算复杂度会很大,会大大增加系统的复杂度。设计低峰均比扩频码技术不会影响信号的质量和增大系统复杂度,其难点在于如何设计出具有较低峰均比的扩频码。本文采取设计低峰均比扩频码技术来降低 MC-CDMA 系统的峰均比。

上文中提到的 5 种扩频序列峰均比特性的对比仿真结果如图 5 所示。仿真中 MC-CDMA 系统的基带脉冲成型采用 4 倍上采样,滚降系数为 0.35,基带脉冲成型滤波器

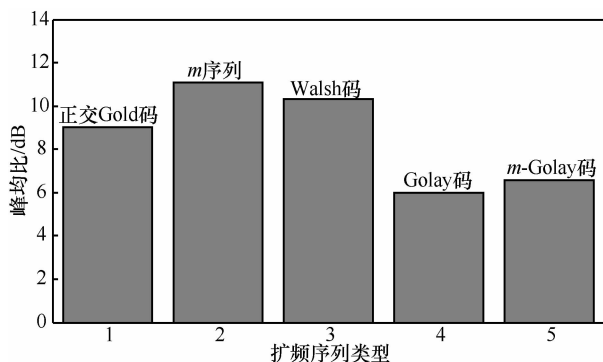


图 5 5 种扩频序列峰均比特性对比

阶数为 16。图 5 中的峰均比均是在概率为 0.01% 的条件下求得。从图 5 中可以看出, Golay 码的峰均比特性最好, m -Golay 码的峰均比特性与 Golay 码的峰均比特性相比略有下降,但要优于 Walsh 码、 m 序列和正交 Gold 码的峰均比特性。

4.4 总结

在实际应用中一般认为峰均比低于 8 dB 的信号可以为后级放大器所接受, Walsh 码、 m 序列和正交 Gold 码在不做任何处理的情况下峰均比高于 8 dB,经过后级放大器会产生非线性失真,为了降低上述扩频序列的峰均比,需要采用削峰技术等措施。参考文献[13]中使用了一种优化后的削峰技术,经过削峰后信号的峰均比降低了,但信号的 ACPR 和 EVM 还是出现了一定程度的恶化。参考文献[14]中使用了一种改变子载波初相位技术,该技术有效地降低了峰均比,但该技术较为复杂,增大了系统复杂度和硬件实现的难度。与上述文献相比,本文设计的 m -Golay 码具有较低的峰均比特性,且不会使发射信号性能恶化,也不会增加系统的复杂度,易于硬件实现,适合在实际系统中应用。因此 m -Golay 码在峰均比特性上要优于 Walsh 码、 m 序列和正交 Gold 码。

扩频序列良好的自相关、互相关特性有利于实现信号的检测和同步,并使不同用户间的干扰较小。经过 m 序列的加扰, m -Golay 码在自相关和互相关特性上要优于 Golay 码,这使得 m -Golay 码更容易实现同步和解扩,进而有利于实现信号正确的解调,并且用户间干扰较小,这有利于增大系统用户的个数,从而提高频谱利用率和系统容量。因此 m -Golay 码在自相关和互相关特性上要优于 Golay 码。

MC-CDMA 系统需要扩频序列具有较好的自相关、互相关和峰均比综合特性,综合考虑, m -Golay 码由于在每一条特性上都具有较好的特性,因此更适合在 MC-CDMA 系统中应用。

5 结束语

本文针对 MC-CDMA 系统对扩频序列需要兼具良好的自相关、互相关特性和较低的峰均比的要求,设计了 m -Golay 码,其自相关、互相关和峰均比特性在列举的扩频序列中均不是最优的,但其通过在合理的范围内牺牲一些特性指标来弥补另一些特性指标,达到了综合性能上的优化,从而适应 MC-CDMA 系统对扩频序列综合性能的要



求,适合在 MC-CDMA 系统中应用。

参考文献

- 1 吴作敏, 杨维. VBLAST-MC-CDMA 系统自适应调制仿真分析. 系统仿真学报, 2010, 22(2):458~462
Wu Z M, Yang W. Simulation analysis on adaptive modulation VBLAST-MC-CDMA systems. Journal of System Simulation, 2010, 22(2):458~462
- 2 Ahmed J, Hamdi K A. Spectral efficiency of asynchronous MC-CDMA with frequency offset over correlated fading. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(7):3423~3429
- 3 黄敏, 李兵兵. 基于整体最小二乘的联合信道估计及 OFDM 信号检测算法. 电子与信息学报, 2014, 36(6):1448~1453
Huang M, Li B B. Joint channel estimation and OFDM signals detection based on total least square. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(6):1448~1453
- 4 Chung C D. Spectral precoding for constant-envelope OFDM. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(2):555~567
- 5 胡乐明. CDMA 运营商的 LTE 制式选择. 电信科学, 2013, 29(1):115~117
Hu L M. Selection of LTE's duplex mode for CDMA operator. Telecommunications Science, 2013, 29(1):115~117
- 6 Ahmed K E, Farag M M. Overloaded CDMA bus topology for MPSoC interconnect. Proceedings of the 2014 International Conference on ReConFigurable Computing and FPGAs (ReConFig), Cancun, Mexico, 2014:1~7
- 7 付卫红, 杨小牛, 刘乃安. 基于盲源分离的 CDMA 多用户检测与伪码估计. 电子学报, 2008, 36(7):1319~1323
Fu W H, Yang X N, Liu N A. The multi-user detection and chip sequence estimation for CDMA system based on the blind source separation. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7):1319~1323
- 8 杨霖, 张帅, 王小波等. 改进的 GA-PTS 降低 OFDM 峰均比. 电子科技大学学报, 2013, 42(3):338~343
Yang L, Zhang S, Wang X B, et al. Improved GA-PTS method for reducing PAPR of OFDM. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42(3):338~343
- 9 Yusuf Z M, Abbasi S A, Alamoud A R M. A novel complete set of Walsh and inverse Walsh transforms for signal processing. Proceedings of the 2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), Katra, Jammu, India, 2011:504~509
- 10 蒋权, 姚振东, 李建. 基于 FPGA 的 m 序列信号发生器设计. 电子设计工程, 2014, 22(13):155~157

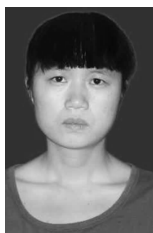
Jiang Q, Yao Z D, Li J. Design of an m sequence signal generator based on FPGA. Electronic Design Engineering, 2014, 22(13):155~157

- 11 Kumar P, Chakrabarti S. A new overloading scheme for cellular DS-SS using orthogonal gold codes. Proceedings of the 2008 Vehicular Technology Conference, Singapore, 2008:1042~1046
- 12 陈吉忠, 方琰威. 利用格雷互补序列降低多载波 CDMA 信号的峰平比. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(4):388~391
Chen J Z, Fang Y W. Reducing peak-to-average power ratio of multicarrier CDMA signals with Golay complementary sequences. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003, 35(4):388~391
- 13 李丰军, 鲍景富, 黄洪云. 新型级联噪声滤波削峰算法的研究. 通信技术, 2012, 45(12):20~22
Li F J, Bao J F, Huang H Y. Study on a new cascaded noise filter peak cancellation algorithm. Communications Technology, 2012, 45(12):20~22
- 14 Bauml R W, Fischer R F H, Huber J B. Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping. Electronics Letters, 1996, 32(22):2056~2057

[作者简介]



张志成, 男, 河西学院物理与机电工程学院讲师, 主要研究方向为电子技术基础、单片机。



黄小娜, 女, 河西学院物理与机电工程学院讲师, 主要研究方向为信号处理、复杂网络建模与优化。



熊丽, 女, 河西学院物理与机电工程学院讲师, 主要研究方向为电路理论及应用、机械电子工程。