

基于高阶统计处理技术的 m-序列检测及识别

俎云霄

(北京邮电大学电子工程学院 北京 100876)

摘要: m-序列是扩频通信中使用最广泛的一种扩频码序列。该文对 m-序列的三阶相关函数(TCF), 偏三阶相关函数及其峰值特性进行了研究, 提出了基于偏 TCF 峰值特性的 m-序列的检测方法和识别标准。仿真实验证明偏三阶相关函数具有与三阶相关函数所对应截取区域相同的峰值特性, 根据这一特性可以对 m-序列进行检测及识别, 这也将为检测和识别直接序列扩频(DS-SS)信号提供理论依据。仿真实验还证明了该文提出的 m-序列检测方法及其识别标准的正确性。

关键词: 扩频通信; m-序列; 三阶相关函数; 峰值特性

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1576-04

The Detection and Recognition of m-Sequence Using Higher-Order Statistical Processing

Zu Yun-xiao

(Electronic Engineering School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: m-sequence is one of the most widely used codes in spread spectrum communications. The triple correlation function(TCF) of m-sequence, the partial triple correlation function of m-sequence and its peak feature are studied and described in this paper. Then a detection method and a recognition standard of m-sequence are proposed based on the peak feature of the partial TCF. It is testified by simulation that the peak feature of the partial TCF is same as that of the TCF during the corresponding intercepted section. With the peak feature m-sequence can be detected and recognized and this is the basis for detecting and recognizing the direct sequence spread spectrum signals. The detection method and the recognition standard of m-sequence have been proved available by the simulation.

Key words: Spread spectrum communications; m-sequence; Triple correlation function; Peak feature

1 引言

m-序列又称为最大长度线性反馈移位寄存器序列, 是由多级线性反馈移位寄存器产生的最大长度的码序列。在二进制移位寄存器发生器中, 若级数为 n , 则所能产生的码序列的最大长度为 $2^n - 1$ 。

在扩频通信中, 扩频码序列起着十分重要的作用, 希望扩频码具有良好的伪随机性、相关特性和足够的编码。实际中应用得最多的是伪随机码, 也称为伪噪声码(PN 码)。扩频通信中常用的伪随机码有 m-序列码, Gold 码和 Kasami 码等, 后两个属于组合码。本文主要对 m-序列码进行研究。

关于 m-序列的检测及识别问题, 国内的研究报道还不多, 文献[1]只提到利用 m-序列的三阶相关特性和提取本原多项式进行识别。但提取本原多项式本身就比较复杂, 而且提出后还需要判定是否是本原多项式, 所以是一种比较复杂的方法。国外 Adams, Peter 等人对 m-序

列进行了较详细的讨论, 他们提出的 m-序列检测方法一是找 m-序列的本原多项式, 二是根据三阶相关函数峰值位置的重复性, 计算峰值的和, 从而确定 m-序列的长度。这两种方法都是比较耗时的, 因为需要判断比较和重复计算。为此, 本文提出了一种更为简便的方法, 该方法不仅简单, 而且能将 m-序列与 Gold 序列, Kasami 序列, 随机噪声序列和随机二进制序列区分出来。

2 m-序列的主要特性

2.1 m-序列的产生

m-序列是由二进制线性反馈移位寄存器网络产生的最大长度的码序列, n 级网络所能产生的码序列的周期最大长度为 $2^n - 1$ [2,3]。 n 级网络主要由 n 个串联的寄存器、移位脉冲产生器和模 2 加法器组成。图 1 所示为一个 5 级线性反馈移位寄存器网络的原理图。为简化起见, 图中省略了时钟信号。每到来一个时钟, 每级的存储数便向右移动一位, m-序列由末级 a_{n-5} 输出, 末级与其他某些级的模 2 和 a_n 作为第 1 级的输入, 并称其为线性反馈

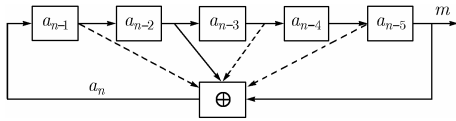


图 1 线性反馈移位寄存器原理图

移位寄存器的反馈逻辑。图 1 实线所示的反馈逻辑为 $a_n = a_{n-2} \oplus a_{n-5}$ 。

根据域论中多项式的概念，反馈逻辑可以表示为以二元有限域的元素 $a_i \in (0,1)(i = 1, 2, \dots, n)$ 为系数的多项式形式^[2,4,5]，即 $a_n = \sum_{i=1}^n a_i x^i$ 。如果将模 2 加法器反馈第一级的联线 $a_0 = 1$ 考虑进去，则反馈逻辑的多项式变为： $F(x) = 1 \oplus \sum_{i=1}^n a_i x^i = \sum_{i=0}^n a_i x^i$ ，并称其为特征多项式。

$a_i = 0$ 表示所对应的寄存器不参加反馈， $a_i = 1$ 则表示参加反馈。将各系数 a_i 的取值用一个二进制数组 C 表示，顺序为从高级(末级)到低级(第 1 级)，则对应图 1 实线的反馈逻辑表示为 $C=[100101]$ 。

2.2 m-序列的主要特性

m-序列具有许多优良特性^[2,3]，下面仅给出与本文相关的一些主要特性。

- (1)平衡性 m-序列中一个周期内“1”的数目比“0”的数目多 1 个。
- (2)平移相加性 m-序列与其移位后的序列逐位模 2 相加后，所得的序列仍然为一 m-序列，只是相移不同而已。
- (3)二值自相关性 m-序列具有优良的二值自相关特性，码位数越长越接近于随机噪声的自相关特性。但是，两个相同长度的 m-序列的互相关特性并不都很好。

3 m-序列的偏三阶相关函数及其峰值特性

3.1 m-序列的三阶相关函数

根据三阶累积量的概念，m-序列的三阶相关函数(TCF)定义为：

$$R_m(\tau_1, \tau_2) = E[m(t)m(t + \tau_1)m(t + \tau_2)] \quad (1)$$

其中 $\tau_1 = pT_c$ ， $\tau_2 = qT_c$ ， $p, q = 1, 2, \dots, L-1$ 。

实际分析中，m-序列的取值用 ± 1 ，而不是 0 和 1，对应关系如下： $(0,1) \rightarrow (1,-1)$ 。所以二进制序列加法变换为乘法。实际应用中计算 $R_m(\tau_1, \tau_2)$ 的公式^[4-6]如下：

$$R_m(\tau_1, \tau_2) = R(p, q) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L v(i)v_p(i)v_q(i) \quad (2)$$

其中 $v_p(i)$ ， $v_q(i)$ 分别表示序列平移 $\tau_1 = pT_c$ ， $\tau_2 = qT_c$ 后所得序列的第 i 个元素。

根据 m-序列的平移相加性，对某些组合 (p, q) ，有 $u_p(i) \oplus u_q(i) = u(i)$ ，从而有： $\forall i, v_p(i)v_q(i) = v(i)$ 。所以对某些组合有：

$$R(p, q) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L [v(i)]^2 = 1 \quad (3)$$

对其他的组合 (p', q') ，有 $v_{p'}(i)v_{q'}(i) = v_s(i)$ ，其中 $v_s(i) \neq v(i)$ ，但是这个新序列却仍是一个 m-序列，此时有：

$$R(p', q') = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L v(i)v_s(i) = -1/L \quad (4)$$

所以，m-序列的三阶相关函数值为：

$$R(p, q) = \begin{cases} 1, & v_p(i)v_q(i) = v(i) \\ -\frac{1}{L}, & v_p(i)v_q(i) \neq v(i) \end{cases} \quad (5)$$

因此，m-序列的平移相加性导致 m-序列的 TCF 有峰值出现。根据这一特点可以对 m-序列进行检测和识别。

3.2 m-序列的偏三阶相关函数

实际上，大多数情况下我们并不知道 m-序列的周期长度，而且，通常截取的 m-序列长度小于 m-序列的周期长度，那么，截取的这一部分 m-序列的 TCF 是否能体现 m-序列的 TCF 的峰值特性呢？文献[5-7]说明这是可能的，并提出了偏三阶相关函数(偏 TCF)的概念，定义如下：

$$R'(p, q) = \frac{1}{N-q} \sum_{i=1}^{N-q} v(i)v_p(i)v_q(i), \quad 0 \leq p \leq q \leq N-1 \quad (6)$$

式中， N 为截取的序列长度。按照式(6)计算得到的 $1 \sim N$ 区间的 TCF 峰值位置与按照整个序列周期长度计算的 TCF 相对应的局部区域的峰值位置是一致的。

3.3 偏三阶相关函数的峰值特性

为了验证式(6)的正确性，分别对 $n=10$ ，反馈逻辑为 $[10100001101]$ 和 $n=7$ ，反馈逻辑为 $[11010011]$ 的两个线性移位寄存器网络产生的 m-序列进行了仿真。分别取 $N=300$ 和 $N=60$ ，仿真结果分别如图 2，图 3 所示。图中，圆圈表示有峰值产生，即对应圆圈所在位置的 (p, q) 组合产生峰值，而且在没有噪声干扰的情况下，这些峰值相等，由式(5)可知均为 1。

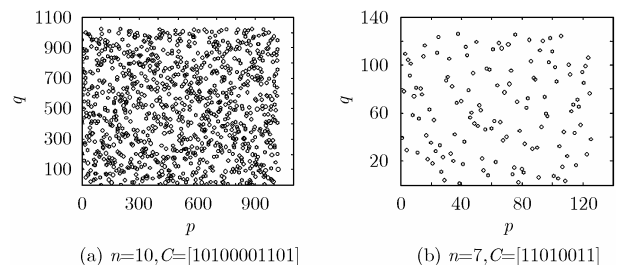


图 2 TCF 的峰值

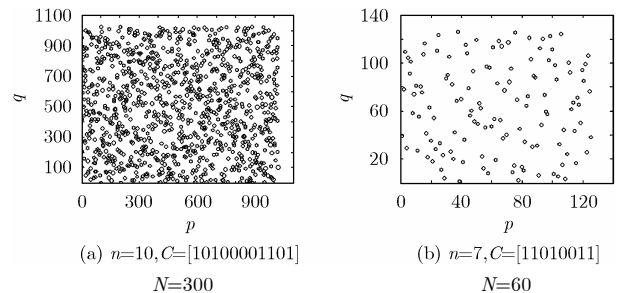


图 3 偏 TCF 的峰值

图 2 为两个序列的 TCF 峰值图, 图 3 为两个序列的偏 TCF 峰值图。由图可以看出, 图 3(a)正好是图 2(a)的 $1 \leq p, q \leq 300$ 局部区域的 TCF 峰值图, 图 3(b)正好是图 2(b)的 $40 \leq p, q \leq 100$ 局部区域的 TCF 峰值图。

图 4 是图 1 所示反馈逻辑产生的 m -序列的 TCF 峰值图, 图 4(a)是二维图, 图 4(b)是三维图。

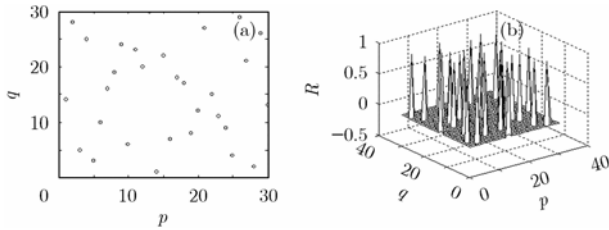


图 4 TCF 的峰值

由图 2, 图 3 还可以看出, 无论何时截取序列, 亦即无论截取的是序列的哪一部分, 利用式(6)都能计算出截取部分的 TCF 峰值位置。 m -序列的这种性质使我们更便于对其进行识别, 这样, 就不必截取一个周期的 m -序列, 只需截取一部分就可以了。

m -序列具有这种性质是因为: 具有相同反馈逻辑的移位寄存器网络, 无论其移位寄存器的初始状态如何, 产生的 m -序列的 TCF 峰值个数及位置都是相同的。而移位寄存器初始状态的改变, 只改变 m -序列的起始相位, 所以, 无论从何处截取 m -序列, 计算出的 TCF 峰值是完全相同的。

3.4 偏三阶相关函数的峰值检测

信号都是在信道中传输的, 而信道不可避免地要受到噪声的干扰, 所以, 研究在噪声干扰情况下的峰值检测是具有实际意义的。根据信号检测理论^[8], 令 H_0, H_1 分别表示产生 TCF 峰值和不产生 TCF 峰值的事件, D_0 和 D_1 分别表示判断为产生 TCF 峰值和不产生 TCF 峰值的事件, 则可以用如下公式来计算 TCF 峰值检测的正确概率。

$$P_r = P(D_0 | H_0)P(H_0) + P(D_1 | H_1)P(H_1) = \frac{r}{N_0} \cdot \frac{N_0}{N} + \frac{l}{N_1} \cdot \frac{N_1}{N} = \frac{r+l}{N} \quad (7)$$

式中 N 表示所有的 p, q 组合数, N_0 表示产生 TCF 峰值的 p, q 组合数, N_1 表示不产生 TCF 峰值的 p, q 组合数, r 表示在给定的阈值条件下判断为 TCF 峰值的 p, q 组合数, l 为在给定的阈值条件下判断为非 TCF 峰值的 p, q 组合数。

式(7)说明对产生 TCF 峰值事件和不产生 TCF 峰值事件给予相同的权重, 而有时不同事件对结果的影响并不相同, 或我们对不同事件的重视程度不同, 此时, 应对不同事件给予不同的权重。现在我们的目的是检测出峰值, 所以对判断为产生 TCF 峰值的事件给以较大的权

重 $c_{00} = 0.95$, 对判断为不产生 TCF 峰值的事件给予较小的权重 $c_{11} = 0.05$ 。由此得到下式:

$$P_r = c_{00}P(D_0 | H_0)P(H_0) + c_{11}P(D_1 | H_1)P(H_1) = c_{00} \cdot \frac{r}{N_0} \cdot \frac{N_0}{N} + c_{11} \cdot \frac{l}{N_1} \cdot \frac{N_1}{N} = \frac{c_{00}r + c_{11}l}{N} \quad (8)$$

对式(8)进行归一化, 归一化的标准是: 假定产生 TCF 峰值时, 完全正确地判断为产生 TCF 峰值; 不产生 TCF 峰值时, 也完全正确地判断为不产生 TCF 峰值, 即条件概率 $P(D_0 | H_0) = 1, P(D_1 | H_1) = 1$, 则此时

$$P_r = c_{00}P(D_0 | H_0)P(H_0) + c_{11}P(D_1 | H_1)P(H_1) = c_{00} \cdot \frac{N_0}{N} + c_{11} \cdot \frac{N_1}{N} = \frac{c_{00}N_0 + c_{11}N_1}{N} \quad (9)$$

所以, 归一化后的概率表达式为:

$$P_r = \frac{c_{00}r + c_{11}l}{c_{00}N_0 + c_{11}N_1} \quad (10)$$

根据式(10), 正确检测偏 TCF 峰值的概率曲线如图 5 所示, 其中图 5(a), 图 5(b)分别为 SNR=3dB 和 SNR=5dB 时的情况。由图可以看出, 如果取一个合适的 $R(p, q)$ 阈值 R_t , 则正确检测率很高, 甚至可达 100%。通过对不同 m -序列的仿真, 得出如下结论: 如果取 $R_t = 0.6$, 则对 SNR=3dB 的情况, 检测的正确率大于 98%; 而对于 SNR=5dB 的情况, 检测的正确率为 100%。

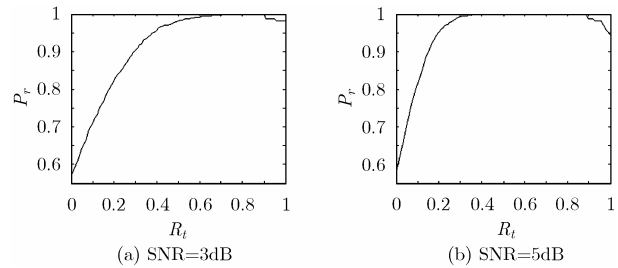


图 5 m -序列的正确检测率

4 m -序列的检测及识别

利用 m -序列偏 TCF 函数的峰值特性, 可以对 m -序列进行识别。根据上一部分对偏 TCF 函数峰值检测的讨论可知, 在取阈值 $R_t = 0.6$ 时, SNR=3dB 情况下, 偏 TCF 峰值检测的正确率大于 98%, 而 SNR=5dB 情况下, 检测的正确率为 100%。所以, 可以在阈值 $R_t = 0.6$ 情况下, 以检测概率 95% 作为标准, 对 m -序列进行识别。如果检测概率大于 95%, 即认为是 m -序列, 否则为非 m -序列。

图 6 是根据式(10)在 SNR=3dB 情况下, 分别对 m -序列(实线), Gold 序列, Kasami 序列, 随机产生的 0-1 二进制序列和随机噪声序列进行检测的检测正确率曲线。

由图 6 可以看出, 在阈值 $R_t = 0.6$ 情况下, 以检测

概率 95% 作为标准是完全可以 m-序列与其他序列区分开的。

图 7 是根据偏 TCF 峰值对 m-序列, Gold 序列, Kasami 序列, 随机产生的 0-1 二进制序列和随机噪声序列在阈值 $R_t = 0.6$ 情况下, 以检测概率 95% 作为标准进行识别的仿真结果。仿真选取的序列长度均为 60, 由此可以看出该方法的正确性和有效性。

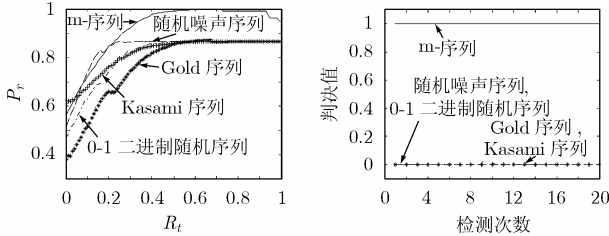


图 6 检测结果

图 7 识别结果

5 结束语

通过对 m-序列的三阶相关函数及偏三阶相关函数峰值特性的比较, 说明了偏三阶相关函数具有与三阶相关函数所对应截取区域相同的峰值特性, 因此, 可以利用偏三阶相关函数的峰值特性对 m-序列进行检测和识别。根据对偏三阶相关函数的峰值检测的结果提出了基于偏三阶相关函数峰值特性的检测和识别 m-序列的方法和标准, 并通过仿真实验证明了该方法和标准的正确性, 这也将为扩频信号的识别提供理论依据。

本文提出的 m-序列检测及识别方法, 较以往的检测方法简单, 对截取的信号只需计算其三阶相关函数并与设定的阈值进行比较, 然后按特定的检测概率公式进行计算即可。此外, 该方法不仅能将 m-序列与随机噪声序列和随机二进制序列区分开来, 而且还能将 m-序列与另外两种扩频码序列——Gold 序列和 Kasami 序列区分开来, 这将为不同类型的扩频信号检测提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 张庆, 李艳斌. 高阶统计技术在 m-序列检测与识别中的应用[J]. 无线电工程. 2004, 34(9): 40-49.
Zhang qing and Li Yan-bin. Higher-order statistical technique for blind detection and identification of m-sequence. *Radio Engineering of China*, 2004, 34(9): 40-49.
- [2] 沈允春. 扩谱技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 20-58.
- [3] 朱近康. 扩展频谱通信及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993: 118-129.
- [4] Adams E R, Gouda M, and Hill P C J. Detection & characterisation of DS/SS signals using higher-order correlation[A]. Proc. IEEE ISSSTA'96[C], Mainz, Germany, 1996: 7-31.
- [5] Batty K E and Adams E R. Detection and blind identification of m-sequence codes using higher order statistics[C]. Proceedings of IEEE on Signal Processing Workshop, Caesarea, Israel, 14-16, June 1999: 16-20.
- [6] Adams E R, Gouda M, and Hill P C J. Statistical techniques for blind detection & discrimination of m-sequence codes in DS/SS systems[C]. Proc. IEEE 5th ISSSTA symposium'98, Sun City, South Africa, 2-4 September 1998: 853-857.
- [7] Adams E R and Hill P C J. Detection of direct sequence spread spectrum signals using higher-order statistical processing[C]. Proc. Int. Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, ICASSP'97, Munich, Germany, 20-24 April 1997: 3849-3852.
- [8] 段凤增. 信号检测理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 49-84.

组云霄: 女, 1964 年生, 副教授, 主要研究方向为信号处理、通信网路由算法、电力线通信。