

第一类最佳屏蔽二进序列偶及应用研究

施炯^{①②} 蒋挺^① 周正^①

^①(北京邮电大学无线网络实验室 北京 100876)

^②(浙江万里学院 宁波市 DSP 重点实验室 宁波 315100)

摘要: 该文定义了一种离散相关信号,即第 1 类最佳屏蔽二进序列偶,研究了其性质,证明了第 1 类最佳屏蔽二进序列偶和伪随机 Hadamard 矩阵的相互构造性,给出了它们的变换性质。在此基础上,该文提出了一种将第 1 类最佳屏蔽二进序列偶应用于 OFDM 信道估计的方案,仿真结果表明,与 m 序列方式相比,该方法在兼顾系统开销和计算复杂度的情况下,表现出更好的系统性能。

关键词: OFDM; 信道估计; 最佳屏蔽二进序列偶; 伪随机序列; Hadamard 矩阵

中图分类号: TN911.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-2919-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00056

The Research and Application of First Kind of Perfect Punctured Binary Sequence Pair

Shi Jiong^{①②} Jiang Ting^① Zhou Zheng^①

^①(Wireless Network Lab, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^②(Ningbo Key Lab. of DSP, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China)

Abstract: In this paper, a new discrete correlation signal is defined, which can be called as First Kind of Perfect Punctured Binary Sequence Pair (FK-PPBSP). The properties of FK-PPBSP are studied. The mutual construction between FK-PPBSP and pseudorandom Hadamard matrices is proved. A FK-PPBSP based time-domain channel estimation algorithm for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is proposed. Simulation results show that compared with m sequence method, a better system performance with lower overhead and lower computational complexity is obtained with the proposed method.

Key words: OFDM; Channel estimation; Perfect Punctured Binary Sequence Pair (PPBSP); Pseudorandom sequence; Hadamard matrix

1 引言

对于 OFDM 系统的信道估计方法,一般可以分为两类:一类是传统的基于导频信号的非盲估计方法^[1];另一类是盲估计方法^[2]。盲估计方法需要比较多的运算量,收敛速度也没有传统的方法快,因而该方法大多只停留在理论研究的基础上,实用化难度较高。基于导频的信道估计方法性能好,实现所需的复杂度低。按照导频插入的方式,可以将其分为频域导频和时域导频两种^[3]。在 TDS-OFDM 系统中^[4],使用伪随机序列替代循环前缀,一方面利用其做信道估计,另一方面提高了系统的频谱效率。但是由于伪随机序列的异相自相关函数值为-1,并非理想 δ -函数,因此,接收机不能直接通过快速傅

里叶反变换来检测,而需要进行迭代运算消除其影响^[5],从而提高了系统实现的复杂度。

Jiang 等人^[6]提出了最佳屏蔽二进序列偶的概念,该序列偶由原序列和屏蔽序列组成,同相自相关函数为一常数,异相自相关函数值为 0,正好符合了 δ -函数的特性。因此,最佳屏蔽二进序列偶是一类相关特性比伪随机序列更加好的信号,可广泛应用于扩频通信、帧同步和多用户检测等系统^[7],扩大了最佳信号的应用范围。从搜索结果看,最佳屏蔽二进序列偶具有较大的存在空间,可以满足实际工程的需求。

本文在研究最佳屏蔽二进序列偶和伪随机序列的基础上,提出了第 1 类最佳屏蔽二进序列偶的概念,研究了它的性质,证明了它和伪随机 Hadamard 矩阵^[8]的相互构造性。在此基础上提出了一种基于第 1 类最佳屏蔽二进序列偶的 OFDM 信道估计方法,并与 m 序列方法的性能进行了比较。

2010-01-19 收到, 2010-04-21 改回

国家自然科学基金(60772021), 国家 863 计划项目(2009AA01Z262)

和国家重大专项(2009ZX03006-006, 2009ZX03006-009)资助课题

通信作者: 施炯 dearsj001@gmail.com

2 定义

定义 1^[6] 序列 $x = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ 的 p -屏蔽序列 $y = (y_0, y_1, \dots, y_{N-1})$ 为

$$y_j = \begin{cases} 0, & j \in p \text{ 个屏蔽位} \\ x_j, & j \in N - p \text{ 非屏蔽位} \end{cases} \quad (1)$$

p 为序列 x 中的屏蔽位数, 如果 $x_j = \{+1, -1\}$, p -屏蔽序列 y 为 p -屏蔽二进制序列, (x, y) 称为屏蔽二进制序列偶。

定义 2^[6] 屏蔽二进制序列偶 (x, y) 的周期自相关函数 $R_{xy}(m)$ 为

$$R_{xy}(m) = \sum_{j=0}^{N-1} x_j y_{j+m}, \quad 0 \leq m \leq N-1 \quad (2)$$

定义 3^[8] 若 H 为 Hadamard 矩阵, $H = K_1 + x_0 K^{4n-1} + x_1 K + x_2 K^2 + \dots + x_{4n-2} K^{4n-2}$, 其中, $x_i = \{+1, -1\}$, 矩阵 K_1 和 K 定义为

$$K_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}_{4n \times 4n} \quad \text{或} \quad K_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ -1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}_{4n \times 4n}$$

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}_{4n \times 4n}$$

则称此类 Hadamard 矩阵为伪随机 Hadamard 矩阵。

定义 4 设一伪随机序列 x , 将序列中的“-1”元素位置作为屏蔽位置, 则可以得到屏蔽二进制序列 y , 这样构造的 (x, y) 为最佳屏蔽二进制序列偶, 其中, x 为原序列, y 为屏蔽序列, 称此类屏蔽二进制序列偶为第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶。

定义 5 由周期为 $4n-1$ 的伪随机序列 x 所构造的第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶 (x, y) 的能量定义为

$$E = \sum_{j=0}^{4n-2} x_j y_j = (4n-1) - (2n-1) = 2n \quad (3)$$

序列 x 的平衡度定义为

$$I = \sum_{j=0}^{4n-2} x_j = n_p - n_n \quad (4)$$

n_p 和 n_n 分别为序列 x 中“+1”和“-1”的个数。

3 第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶和伪随机 Hadamard 矩阵的相互构造

根据第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶和伪随机 Hadamard 矩阵的定义, 可以给出它们的相互构造

关系。

定理 1^[8] 周期为 $4n-1$ 的伪随机序列与阶数为 $4n$ 的伪随机 Hadamard 矩阵等价。

定理 2 长度为 $4n-1$ 的第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶 (x, y) 和 $4n$ 阶伪随机 Hadamard 矩阵 H 可以相互构造。

证明 根据定理 1, 可以得到周期为 $4n-1$ 的伪随机序列与阶数为 $4n$ 的伪随机 Hadamard 矩阵等价。下面证明周期为 $4n-1$ 的伪随机序列可以构造出第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶 (x, y) 。

将伪随机序列 x 中的“-1”元素位置作为屏蔽位置, 得到屏蔽二进制序列 y , 由伪随机序列的性质可知, 序列偶 (x, y) 中的屏蔽位数为 $p = 2n-1$, 且为奇数, 平衡度 $I = 1$, 该序列偶满足最佳屏蔽二进制序列偶的组合允许条件^[1]。因此序列 y 可以表示成为

$$y(j) = \begin{cases} 0, & \text{屏蔽位在 } x(j) = -1 \\ x(j) = 1, & \text{其它} \end{cases}$$

即 $y(j) = (1/2)(x(j) + 1)$ 。则屏蔽二进制序列偶 (x, y) 的自相关函数为

$$R_{xy}(m) = \sum_{j=0}^{4n-2} x(j)y(j+m) = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{4n-2} x(j)x(j+m) + \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{4n-2} x(j) \quad (5)$$

由伪随机序列的性质可知, $\sum_{j=0}^{4n-2} x(j)x(j+m) = -1$, $m \neq 0$, 且 $I = \sum_{j=0}^{4n-2} x(j) = 1$, 故有

$$R_{xy}(m) = \begin{cases} 2n, & m \equiv 0 \pmod{4n-1} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

因此, 该屏蔽二进制序列偶 (x, y) 为第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶。

由以上证明可知, 通过周期为 $4n-1$ 的伪随机序列, 可以构造第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶和伪随机 Hadamard 矩阵, 即第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶和伪随机 Hadamard 矩阵可以相互构造。证毕

4 第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶和伪随机 Hadamard 矩阵的变换性质

第 3 节证明了第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶和伪随机 Hadamard 矩阵的相互构造关系, 这里给出第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶和伪随机 Hadamard 矩阵的性质。

若 (x, y) 为第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶, 其构造的伪随机 Hadamard 矩阵记为 H 。

性质 1 (负元变换): 若 $x_1(i) = -x(i)$, $y_1(i) = -y(i)$, 则屏蔽二进制序列偶 (x_1, y_1) 为第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶, (x_1, y_1) 构造的矩阵 H_1 也是伪随机

Hadamard 矩阵。

证明 序列偶 (x_1, y_1) 的自相关函数为

$$R_{(x_1, y_1)}(m) = \sum_{i=0}^{4n-2} x_1(i)y_1(i+m) = \sum_{i=0}^{4n-2} [-x(i)][-y(i+m)] = R_{(x, y)}(m) \quad (7)$$

因此, (x_1, y_1) 为第 1 类最佳屏蔽二进序列偶。下面证明 (x_1, y_1) 构造的矩阵 H_1 也是伪随机 Hadamard 矩阵。

由伪随机序列 $x_1(i) = -x(i)$, 即 $x_1 = (-x(0), -x(1), -x(2), \dots, -x(4n-2))$, 以及 K_1 和 K 的定义:

$$K_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ -1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}_{4n \times 4n}$$

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}_{4n \times 4n}$$

可得 $4n$ 阶矩阵 H_1 为: $H_1 = K_1 - x(0)K^{4n-1} - x(1)K^{4n-2} - \dots - x(4n-2)K^2$, 而

$$K^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}_{4n \times 4n}$$

$$K^{4n-2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix}_{4n \times 4n}$$

$$K^{4n-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}_{4n \times 4n}$$

从而可得: $H_1^T = K_1^T - x(0)K^{4n-1} - x(1)K^{4n-2} -$

$x(2)K^{4n-3} - \dots - x(4n-2)K$, 因此,

$$H_1 H_1^T = K_1 K_1^T - K_1(x(0)K^{4n-1} + x(1)K^{4n-2} + x(2)K^{4n-3} + \dots + x(4n-2)K) - (x(0)K^{4n-1} + x(1)K^{4n-2} + x(2)K^{4n-3} + \dots + x(4n-2)K)K_1^T + (x(0)K^{4n-1} + x(1)K^{4n-2} + x(2)K^{4n-3} + \dots + x(4n-2)K)(x(0)K^{4n-1} + x(1)K^{4n-2} + x(2)K^{4n-3} + \dots + x(4n-2)K)$$

$$+ \dots + x(4n-2)K = \begin{pmatrix} 4n & -1 & -1 & \cdots & -1 \\ -1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ -1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}_{4n \times 4n}$$

$$-(x(0) + x(1) + \dots + x(4n-2)) \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}_{4n \times 4n}$$

$$-(x(0) + x(1) + \dots + x(4n-2)) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}_{4n \times 4n}$$

$$+ R_x(0) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}_{4n \times 4n} + R_x(1)K + R_x(2)K^2$$

$$+ \dots + R_x(4n-2)K^{4n-2} = 4nI \quad (8)$$

上面的等式用到了伪随机序列的性质: $x(0) + x(1) + \dots + x(4n-2) = -1$, 且 $R_x(0) = 4n-1$, $R_x(1) = R_x(2) = \dots = R_x(4n-2) = -1$ 。因此, 矩阵 H_1 也是伪随机 Hadamard 矩阵。证毕

性质 2 (循环移位): 若 $x_1(i) = x(i+u)$, $y_1(i) = y(i+u)$, 且满足 $0 \leq i \leq 4n-2$, $0 \leq u \leq 4n-2$, $i+u \equiv (i+u) \pmod{4n-1}$; 则 (x_1, y_1) 为第 1 类最佳屏蔽二进序列偶, (x_1, y_1) 构造的矩阵 H_1 也是伪随机 Hadamard 矩阵。

证明 序列偶 (x_1, y_1) 的自相关函数为

$$R_{(x_1, y_1)}(m) = \sum_{i=0}^{4n-2} x_1(i)y_1(i+m) = \sum_{i=0}^{4n-2} [x(i+u)][y(i+u+m)] = \sum_{i=0}^{4n-2+u} x(i)y(i+m)$$

因为 $i + u \equiv (i + u) \pmod{4n - 1}$ ，所以有

$$\sum_{i=0+u}^{4n-2+u} x(i)y(i+m) = \sum_{i=0}^{4n-2} [x(i)][y(i+m)] = R_{(x,y)}(m) \quad (9)$$

因此, (x_1, y_1) 为第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶。证明 (x_1, y_1) 构造的矩阵 H_1 也是伪随机 Hadamard 矩阵可以参考性质 1 的证明过程, 这里省略。证毕

性质 3 (逆序变换): 若 $x_1(i) = x(4n - 1 - i)$, $y_1(i) = y(4n - 1 - i)$, 且 i 满足 $0 \leq i \leq 4n - 2$; 则 (x_1, y_1) 为第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶, (x_1, y_1) 构造的矩阵 H_1 也是伪随机 Hadamard 矩阵。

证明 序列偶 (x_1, y_1) 的自相关函数为

$$\begin{aligned} R_{(x_1,y_1)}(m) &= \sum_{i=0}^{4n-2} x_1(i)y_1(i+m) \\ &= \sum_{i=0}^{4n-2} [x(4n-1-i)][y(4n-1-i-m)] \\ &= x(4n-1)y(4n-1-m) + x(4n-2) \\ &\quad \cdot y(4n-2-m) + \dots + x(1)y(1-m) \\ &= x(0)y(0-m) + x(1)y(1-m) + \dots + x \\ &\quad \cdot (4n-2)y(4n-2-m) \\ &= \sum_{i=0}^{4n-2} x(i)y(i-m) = R_{(x,y)}(-m) \end{aligned} \quad (10)$$

因此, (x_1, y_1) 为第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶。证明 (x_1, y_1) 构造的矩阵 H_1 也是伪随机 Hadamard 矩阵可以参考性质 1 的证明过程, 这里省略。证毕

性质 4 (映射性): 若 $x_1(i) = x(-i)$, $y_1(i) = y(-i)$, 满足 $0 \leq i \leq 4n - 2$; 则 (x_1, y_1) 为第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶, (x_1, y_1) 构造的矩阵 H_1 也是伪随机 Hadamard 矩阵。

证明 序列偶 (x_1, y_1) 的自相关函数为

$$\begin{aligned} R_{(x_1,y_1)}(m) &= \sum_{i=0}^{4n-2} x_1(i)y_1(i+m) \\ &= \sum_{i=0}^{4n-2} [x(-i)][y(-i-m)] \\ &= \sum_{i=0}^{4n-2} [x(-i+4n-1)][y(-i-m+4n-1)] \\ &= \sum_{j=0}^{4n-2} x(j)y(j-m) = R_{(x,y)}(-m) \end{aligned} \quad (11)$$

因此, (x_1, y_1) 为第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶。证明 (x_1, y_1) 构造的矩阵 H_1 也是伪随机 Hadamard 矩阵可以参考性质 1 的证明过程, 这里省略。证毕

性质 5 (完全采样变换): 若 $x_1(i) = x(ki)$, $y_1(i) = y(ki)$, 满足 $0 \leq i \leq 4n - 2$, k 为整数, 与 $4n - 1$ 互素; 则 (x_1, y_1) 为第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶, (x_1, y_1) 构造的矩阵 H_1 也是伪随机 Hadamard 矩阵。

证明 序列偶 (x_1, y_1) 的自相关函数为

$$R_{(x_1,y_1)}(m) = \sum_{i=0}^{4n-2} x_1(i)y_1(i+m) = \sum_{i=0}^{4n-2} [x(ki)][y(ki+km)] \quad (12)$$

设 $ki = s \pmod{4n - 1}$, $km = t \pmod{4n - 1}$, 则 $0 \leq s, t \leq 4n - 2$, k 为整数, 与 $4n - 1$ 互素, 则当 $m = 0$ 时, $t = 0$; 当 $m \neq 0$ 时, $t \neq 0$ 。当 i 取 $0, 1, \dots, 4n - 2$ 时, 有 s 一一对应取遍 $0, 1, \dots, 4n - 2$ 中的每一个值, 故有

$$\sum_{i=0}^{4n-2} [x(ki)][y(ki+km)] = \sum_{s=0}^{4n-2} x(s)y(s+t) = R_{(x,y)}(t) \quad (13)$$

因此, (x_1, y_1) 为第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶。证明 (x_1, y_1) 构造的矩阵 H_1 也是伪随机 Hadamard 矩阵可以参考性质 1 的证明过程, 这里省略。证毕

5 基于第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶的 OFDM 信道估计

本文设计的 OFDM 信道估计方法属于时域导频类型, 利用第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶良好的循环自相关特性, 在系统发送端, 将其中的原序列 x 作为训练序列, 在接收端, 屏蔽序列 y 作为本地接收序列, 与训练序列进行相关运算, 得到 OFDM 时域信道估计, 将得到的信道估计值通过 FFT, 得到信道的频域估计, 利用该估计值, 对接收的 OFDM 信号进行均衡, 最后得到解调数据。系统模型如图 1 所示。

系统仿真平台参数参考 IEEE802.11a 规范, 采用 FFT 大小为 64, BPSK 调制方式, 使用的子载波数为 52, 序号为 $\{-26 \sim -1, +1 \sim +26\}$, 子载波间隔 312.5 kHz, FFT 采样频率为 20 MHz, 数据符号

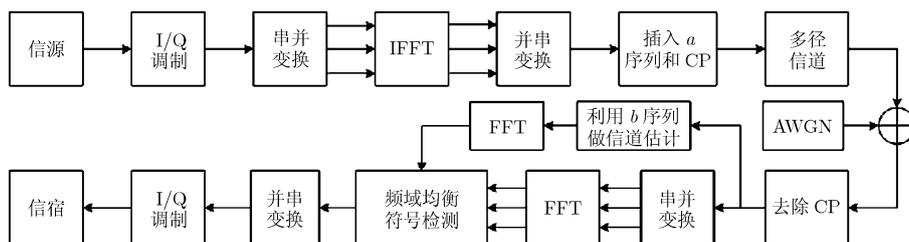


图 1 基于第 1 类最佳屏蔽二进制序列偶的 OFDM 信道估计框图

持续时间为 3.2 μs , CP 持续时间为 0.8 μs , 总符号时间为 4 μs 。由于定义的 CP 持续时间为 0.8 μs , 在 20 MHz 的条件下, 采样次数为 16 次, 则选择 Rayleigh 多径信道数为 10, 持续时间为 0.5 μs , 这样就确保了系统不受符号间干扰(ISI)。

为了比较系统性能差异, 将 4 种长度的第 1 类最佳屏蔽二进序列偶和 m 序列作对比。m 序列参数如表 1 所示, 以 5 级 m 序列本原多项式 $a_5=(45)_8$ 为例, 将八进制的系数转化为二进制的系数, 即 $a_i=(100101)_2$, 由此得到本原多项式对应系数, 即 a_0 、 a_2 和 a_5 为 1, 其他都为 0, 则本原多项式为 x^5+x^2+1 。根据定义 4, 可以构造同长度的第 1 类最佳屏蔽二进序列偶。

表 1 m 序列参数表

级数	周期	本原多项式系数(八进制)
5	31	45
6	63	103
7	127	211
8	255	435

图 2 显示了长度为 31 和 255 的第 1 类最佳屏蔽二进序列偶和 m 序列做信道估计时, 得到的误码率曲线。仿真结果表明, 在相同的序列长度下, 最佳屏蔽序列偶方法性能优于 m 序列方法, 特别是长度为 31 时, 性能差异非常明显。但是随着序列长度的增加, 两种方法的估计性能差异逐渐变小, 在长度为 255 时, 这两种方法的性能已经很相近。另外, 当长度为 255 时, 两种方式的性能已经很接近理论极限。但是, 随着长度的增加, 信道估计的计算复杂度也会增大。

图 3 展现了最佳屏蔽序列偶方法和 m 序列方法的均方误差(MSE)性能曲线。从仿真结果可以看出, 最佳屏蔽序列偶方法的 MSE 性能优于 m 序列方法。同时, 随着序列长度的增加, MSE 性能也变得更好。

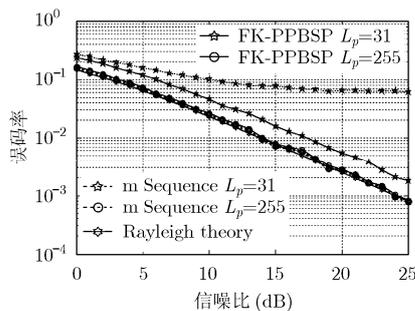


图 2 OFDM 信道估计误码率曲线

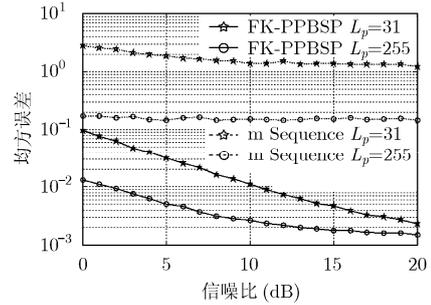


图 3 OFDM 信道估计均方误差曲线

以上仿真结果表明: (1) 在序列长度相同的情况下, 采用最佳屏蔽序列偶方法的信道估计在性能上要优于 m 序列方法。(2) 在信道估计精度和计算复杂度之间存在一种折衷, 序列长度越长, 信道估计精度越高, 但是计算量也越大。因此, 在实际使用时, 我们要选择合适长度的序列, 在计算复杂度可以接受的条件下, 满足信道估计精度要求。

6 结束语

本文给出了第 1 类最佳屏蔽二进序列偶的定义, 证明了第 1 类最佳屏蔽二进序列偶和伪随机 Hadamard 矩阵的相互构造性, 给出了它们的性质。通过这些性质, 不仅可以用 Hadamard 矩阵来构造最佳屏蔽二进序列偶, 也可以将最佳屏蔽二进序列偶的性质应用到 Hadamard 矩阵中去, 在丰富和完善最佳屏蔽二进序列偶理论的同时, 扩大了 Hadamard 矩阵的应用。同时设计了基于第 1 类最佳屏蔽二进序列偶的 OFDM 信道估计方法, 仿真分析表明, 该方法的系统性能要优于 m 序列方法, 具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] Panah A Y, Vaughan R G, and Heath R W. Optimizing pilot locations using feedback in OFDM systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(6): 2803-2814.
- [2] Song Wang and Manton J H. Blind channel estimation for non-CP OFDM systems using multiple receive antennas [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(4): 299-302.
- [3] Ozdemir K and Arslan H. Channel estimation for wireless OFDM systems [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2007, 9(2): 18-48.
- [4] Song Bo-wei, Gui Lin, and Guan Yun-feng, et al. On channel estimation and equalization in TDS-OFDM based terrestrial HDTV broadcasting system [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51(3): 790-797.

- [5] Gui Lin, Li Qi, and Liu Bo, *et al.*. Low complexity channel estimation method for TDS-OFDM based Chinese DTTB system [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(3): 1135–1140.
- [6] Jiang Ting, Zhao Xiao-qun, and Hou Lan-tian. Perfect punctured binary sequence pair [J]. *Journal of Electronics (China)*, 2003, 20(4): 285–288.
- [7] 许蕾, 蒋挺, 周正. 最佳屏蔽二进序列偶在低/零相关区中的应用研究[J]. *通信学报*, 2006, 27(10): 19–24.
- Xu Lei, Jiang Ting, and Zhou Zheng. Research of perfect punctured binary sequence pair in LCZ/ZCZ[J]. *Journal on Communication*, 2006, 27(10): 19–24.
- [8] 张涌逸. 伪随机码与 Hadamard 矩阵[J]. *中北大学学报*, 2001, 22(5): 369–372.
- Zhang Yong-yi. Pseudo-random sequences and Hadamard matrices[J]. *Journal of North University of China*, 2001, 22(5): 369–372.
- 施 炯: 男, 1982 年生, 博士生, 从事最佳信号与无线通信方面的研究.
- 蒋 挺: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事通信技术、信息理论研究和应用.
- 周 正: 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 从事无线通信技术、信号与信息处理方面研究.