

降低 OFDM 系统峰均比的选择性映射算法研究*

黎锁平¹ 蔡志鹏² 何继爱²

(1. 兰州理工大学 运筹与控制研究所, 甘肃兰州 730050; 2. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃兰州 730050)

摘要: 正交频分复用(OFDM)是一种具有极高的频谱利用率和抗多径衰落性能良好的多载波调制方式, 但是它存在高的峰值功率平均比(PAPR)问题。本文分析了解决该问题的基本选择性映射算法, 并从传送边带信息、传输速率和系统的计算量方面对改进的选择性映射算法进行了研究。仿真结果表明使用单极相位序列的选择性映射算法比普通的选择性映射算法可以有效降低 0.5dB 左右的 PAPR。

关键词: 正交频分复用; 选择性映射; 峰值平均功率比

Research of reducing PAPR in OFDM of selected mapping

LI Suo-ping¹ CAI Zhi-peng² HE Ji-ai²

(1. Institute of Operations Research and Control Sciences Lanzhou Univ. of Tech 730050, China;
2. College of Computer and Communication, Lanzhou Univ. of Tech 730050)

Abstract: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is a kind of multi-carrier modulations that can efficiently use of radio spectrum and withstand multi-path fading. But high peak-to-average power ratio (PAPR) of the transmitted signal is a major drawback of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). In this paper, general selected mapping (SLM) technique that is used to solve this problem is analyzed and modified selected mapping is researched in the aspect of transmitting the side information, transmitting rate and computation of the system. From the result of the simulation, the PAPR can be reduced 0.5dB in the modified selected mapping using the monopoly phase than the general selected mapping.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing; selected mapping; peak-to-average ratio

1 引言

在短短的十几年时间里, 无线通信技术历经了从第一代到第三代的重大变革^[1], 正在逐步向以正交频分复用(OFDM)多载波技术为核心的第四代移动通信发展。这是因为尽管第三代通信系统的传输率较之以前有很大的改善, 但是仍然不能满足人们的需求。未来的高质量多媒体业务需要更大的带宽和更快的传输速率来支持。但是对于单载波系统而言, 提高了传输速率后码元周期会变的更小, 此时由于无线信道的多径效应所引起的频率选择性衰落造成的码间干扰将会变得更加的严重。对于传统的解决方案, 在接收端用均衡器或直接序列加 Rake 接收机来说, 其实现复杂度和性能方面都将面临许多障碍^[2]。

OFDM 技术基本思想是将串行的数据, 并行地调制在多个正交的子载波上^[3]。其具有抗多径衰落性能强, 频谱利用率高诸多优点。但是, OFDM 技术相对于其优点来说有一个

很大的缺陷就是峰值平均功率比较大。目前, 解决 OFDM 系统的峰均比问题的算法主要有^[4]: 限幅类、编码类和概率类算法。而选择性映射算法则是概率类算法中被人们认为比较理想的方案之一, 本文就选择映射算法进行了分析研究。

2 基本的选择性映射

选择性映射的基本思想是发送端只发送低 PAPR 的 OFDM 信号, 通过相位加权来摒弃高 PAPR 信号, 其 OFDM 发射机的原理框图^[2,3]见图 1。

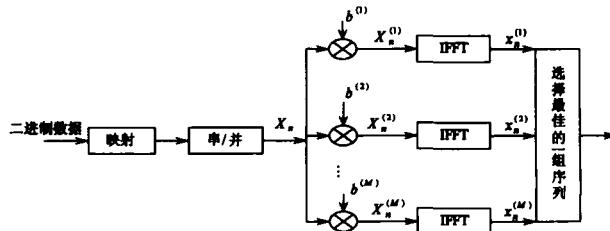


图 1 选择性映射(SLM)OFDM 发射机原理框图

收稿日期: 2006 年 11 月 1 日; 修回日期: 2007 年 5 月 15 日

*项目基金: 教育部“春晖计划”、兰州理工大学优秀中青年教师基金、兰州理工大学博士基金资助

其具体过程如下：

(1) 随机产生的二进制序列 d_0, d_1, \dots, d_l , 被 QPSK、QAM 等调制映射成信息码元, 以 16QPSK 为例, 信息码元为 $X_n = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T, N = l/4$;

(2) 信息码元经串并变换后变为 $X_n = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]$

(3) 将信息码元 X_n 分别与 M 个不同的、长度为 N 的随机相位序列矢量:

$b^{(u)} = (b_0^{(\mu)}, b_1^{(\mu)}, \dots, b_{N-1}^{(\mu)})$, $\mu = 1, 2, \dots, M$, 其中 $b_i^{(\mu)} = \exp(i\phi_i^{(\mu)})$ 且 $\phi_i^{(\mu)} \in [0, 2\pi]$

相乘得到:

$$X^{(u)} = [X_0^{(u)}, X_1^{(u)}, \dots, X_{M-1}^{(u)}]^T \text{ 其中 } X_n^{(u)} = X_n \cdot b^{(u)}$$

(4) 经过 IFFT 变换后得到 $x^{(u)} = \text{IFFT}\{X^{(u)}\}$

(5) 最后传输信号 $\tilde{x} = x^{(\tilde{u})}$

其中 $\tilde{u} = \arg \left\{ \min_u \max |x^{(u)}| \right\}$ 为选择一组恰当的序列的目标函数, 也称为边带信息。边带信息在传输中要占有一部分有效带宽; 同时, 对于接收端来讲, 需要专门的设备来判决边带信息。因此, 选择性映射方案是以降低系统的频带利用率和增加系统的复杂性为代价来实现降低系统的 PAPR 特性的。同时, OFDM-SLM 系统和别的系统一样, 也存在着运算量的问题。基于这两个出发点, 出现了不少的改进选择性映射方案, 根据文献[5]~[8]我们对现在改进的选择性映射方法分析如下。

3 改进的选择性映射

3.1 以不传送边带信息为改进目的选择性映射

以不发送边带信息的选择性映射的思想是尽可能将边带信息包含在原有的信息序列中, 以利于接收端的判决。这里我们介绍两种通过相位序列的改进方案。在第一种方案中使用的相位序列的相位角定义如下:

$$\phi_k = ak^p/N \quad (1)$$

其中 $0 \leq k \leq N-1$, a 可取任意值, $p \geq 2$; N 代表子载波数。

这种随机相位序列又叫单极相位序列, 其优点就是不需要传输边带信息。这是因为在接收端接收到的信号为:

$$W_k = X_k e^{j\bar{a}k^p} / N + V_k$$

其中 \bar{a} 是最优单极相位参数, 属于一个有限集; V_k 为信道噪声。

对于一个给定的 $a \in A$, 这里 A 为有限集。先计算 $W_k e^{-j\bar{a}k^p/N}$ 与星座中点的最小距离 d_k , 然后将所有的 d_k 相加产生目标函数 $J(a)$, 估计 \bar{a} 来最小化 $J(a)$ 。在这种情况下, 这对于盲检测来说比较容易。

第二种方案使用伪随机相位序列定义为:

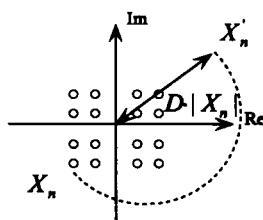
$$P^{(u)} = [P_0^{(u)}, P_1^{(u)}, \dots, P_{N-1}^{(u)}]$$

其中 $P^{(u)} \in \{(De^{j\pi})^{k_n^{(u)}} | k_n^{(u)} = 0, 1, \dots, N-1, D > 1, u = 1, 2, \dots, M\}$

当 $k_n^{(u)} = 0$ 时, 表示信号的分量没有被改变, 而当 $k_n^{(u)} = 1$ 时, 表示经过映射后和串并变换后的信息码元 X_n 将变为

$$X'_n = X_n \cdot De^{j\pi}$$

从上式可以看到 X'_n 的相位比 X_n 的相位增加了 π 。具体对星座图的影响见图 2。在接收端通过判决 D 的值来恢复原始的 OFDM 信号而不需传送边带信息。



对于上述的这两种方案来说, 第二种方案将系统中星座点的位置放大, 使得系统必须增大一定的发射功率; 而因为它们都不需传送边带信息, 因而频带的利用率比较高而且没有由于边

图 2 随机相位对星座图影响 带信息造成的信息传输速率的降低。但是如果系统加入信道编码, 以上两种方案将会因为编码而带来信息传输速率的降低, 而以下的这种方法就是针对这种情况的。

3.2 以不降低传输速率为目的选择性映射

在一个完整的通信系统中, 编码模块是必不可少的。而在 OFDM 系统中由于编码的存在, 降低峰均比的算法的传输率会下降, 因此在普通选择性映射算法的基础上, 我们给出了一种既可以降低 OFDM 系统峰均比, 又不使得系统的传输速率下降的选择性映射算法, 其原理见图 3。

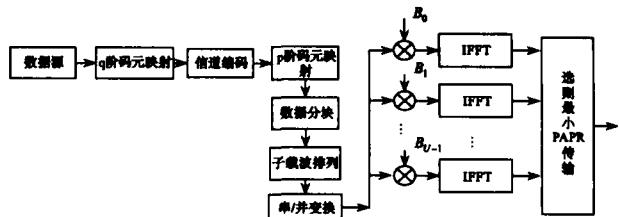


图 3 COFDM 中选择性映射的改进框图

其具体过程如下:

1. 产生随机二进制序列并映射成 q 阶码元;
2. 在 $GF(q)$ 中进行信道编码产生速率为 $r = k/n$ 的 (n, k) 线性分组码且映射为 p 阶码元;
3. 将映射后的码元分成长为 N 的数据块, 且每个数据块需要的码字数目 M 为:

$$M = \frac{N \log_2 p}{n \log_2 q}$$
4. 当收集到 M 个码字后, 将数据码元和检错码元安排到 N 个子载波中后进行串/并变换。 $N \times (k/n)$ 个子载波用来传输数据码元, $N \times (n-k)/n$ 个子载波用来传输检错码元;
5. 相位因子来限定子载波的位置, 并进行 IFFT 变换;
6. 在 U 路传输的数据中选择 PAPR 性能最优的数据发射出去。

在OFDM系统中运算量是由IFFT的复加和复乘组成的,而对于以上的这三种方案它们的复加和复乘都是 $n_{mul} = 2^{n-1}nU$ 和 $n_{add} = 2^n nU$ 。当 $n > 16$ 时运算量比较大,因此也就出现了通过改进运算量来改进OFDM-SLM系统。

3.3 以计算量改进为目的的选择性映射

在这种算法中将序列分为数据序列 A_{data} 和标记数据序列的边带序列 A_{index} ,通过引入中间数据序列信号将IFFT分为两部分来降低选择性映射算法的计算量,其框图如图4所示。信号的具体变化过程如下:

- 1、产生随机二进制序列,并映射为码元;
- 2、码元信息经串/并变换记为 A_{data} ,同时将信息进行标记记为 A_{index} ;
- 3、 A_{data} 做 k 阶IFFT变换为 \hat{a}_{data} ,则 $\hat{a}_{data} = \text{IFFT}_1^k(A_{data})$,其中 IFFT_i^j 表示从 i 阶到 j 阶的IFFT变换;
- 4、为了降低峰均比, \hat{a}_{data} 乘以不同的旋转因子 P^i ($i = 1, \dots, U$),然后再做 $n-k$ 阶IFFT变换。同时为了接收端可以判决出所传输的信息序列,加入边带序列信号 a_{index}^i ($i = 1, \dots, U$),以构成完整的发射端传输序列 a^i ($i = 1, \dots, U$);
- 5、选择PAPR性能最优的序列进行传输。

从信号变化过程中,我们可以看到引入的中间信号 \hat{a}_{data} 与最后传输信号的关系如下:

$$\begin{aligned} a^i &= \text{IFFT}_{k+1}^n \left\{ P^i \otimes \text{IFFT}_1^k(A_{data}) \right\} + \text{IFFT}_1^k \left\{ A_{index}^i \right\} \\ &= \text{IFFT}_{k+1}^n \left\{ P^i \otimes \hat{a}_{data} \right\} + a_{index}^i \end{aligned}$$

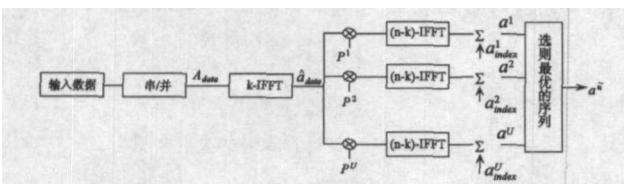


图4 改进计算量框图

此时系统的复加和复乘分别为:

$$n'_{add} = 2^n + 2^n(n-k)(U-1)$$

$$n'_{mul} = 2^{n-1}n + 2^{n-1}(n-k)(U-1)$$

其中 U 为相位序列的数目。因此复杂减少率为

$$\begin{aligned} CCRR &= \left(1 - \frac{\text{改进的计算量}}{\text{普通的计算量}} \right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{n'_{mul} + n'_{add}}{n_{mul} + n_{add}} \right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{1}{U} \right) \frac{k}{n} \times 100\% \end{aligned}$$

4 仿真比较

为了更好的说明上述改进方案的有效性,我们对使用单极相位序列的选择性映射算法与普通的选择性映射算法(使用旋转相位序列)进行仿真比较如下。

在 $a = 19/20, p = 4, N = 512$ 时,单极相位序列和在普通选择性映射算法中使用的旋转相位序列的相频特性比较见图5所示,从图中可以看到这两种序列的随机性几乎是差不多的,这说明构造的单极相位序列是可以在选择性映射算法中使用的。

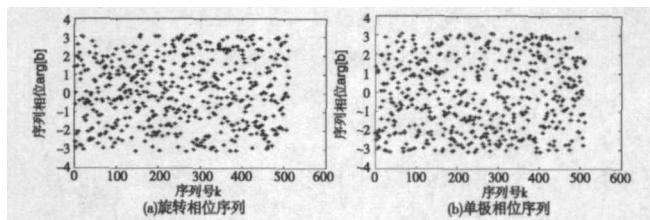


图5 相位序列的相频特性比较

在16QAM调制下,取 N 为512, M 分别为4,8,16,32时,SLM-OFDM系统的PAPR互补累积分布函数仿真曲线如图6所示。从图6(a)和(b)中也可以得知,随着 M 的增加,这两种选择映射算法改善系统的峰值平均功率比的能力将下降。但是在 M 相同的情况下,使用单极序列的选择性映射算法比使用旋转相位序列的选择性映射算法大约可以降低0.5dB左右。

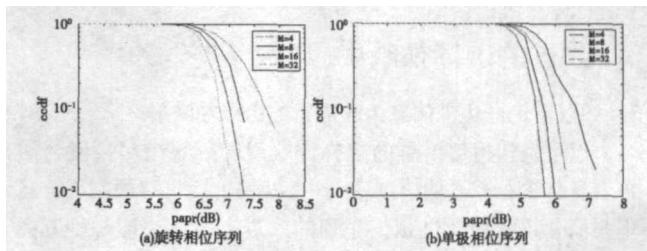


图6 两种序列下的SLM互补概率分布比较

从式(1)中,可以看到 p 是单极相位序列的一个参数,这里我们分析了这个参数对降低峰均比的性能影响,如图7所示。从图中可以看到,在不同的 p 下,单极相位序列降低峰均比的能力是几乎相同的。

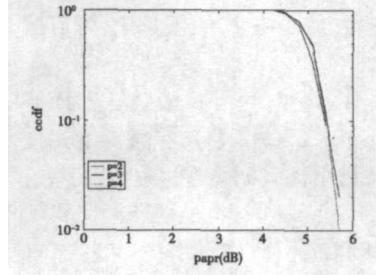


图7 不同 p 下的互补概率分布函数

5 结束语

如何降低OFDM信号的峰值平均功率比是实现OFDM系统在实际应用中所面临的一个重要的问题。针对该问题在理论上已经出现了大量的解决方案,但是在实际应用中因为各种方案的弊端,依然有待进一步的发展。这

里我们就发展前景比较好的选择性映射方法几种方案进行了研究分析。希望我们的研究对从事该研究方向的人员有一定的帮助。

参考文献

- [1] 张贤达,保铮.通信信号处理[M].北京:国防工业出版社.2000:1-82.
- [2] 尹长川,罗涛,乐光新.多载波宽带无线通信技术[M].北京:北京邮电大学出版社.2004:22-117.
- [3] 孙小东,于全,王红星,魏克军,戴卫恒. OFDM 技术及系统仿真设计[J].通信学报,2004,3(16):499-503.
- [4] 王文博,郑侃.宽带无线通信 OFDM 技术[M].北京:人民邮电出版社.2003:82-95.
- [5] Yang Chan Cho, Seung Hee Han, Jae Hong Lee. Selected Mapping Technique with Novel Phase Sequences for PAPR Reduction of an OFDM Signal[C]. Vehicular Technology Conference, 2004(7):4781-4785.
- [6] Zhou, G. T. , Baxley, R. J. , Ning Chen. Selected mapping with monomial phase rotations for peak-to-average power ratio reduction in OFDM [C]. Communications, Circuits and Systems. 2004(1):66-70.
- [7] Seung Hee Han, Jae Hong Lee. Modified selected mapping technique for PAPR reduction of coded OFDM signal[J]. IEEE Transactions, 2004,3(50):335-341.
- [8] Dae-Woon Lim, Jong-Seon No, Chi-Woo Lim, Habong Chung. A new SLM OFDM scheme with low complexity for PAPR reduction [J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2005,2(12):93-96.

作者简介

黎锁平(1965-) :男,汉,博士,教授。研究方向为随机控制与应用随机过程,信息理论与现代通信信号分析。