

降低 OFDM 信号峰均比的边带信息检测方案

杨 刚, 蒋日淼, 李玉山

(西安电子科技大学 电路 CAD 所 陕西 西安 710071)

摘要: 对于每个子载波只受到 QPSK 符号调制的正交频率复用系统,提出了两种边带信息检测方案,此边带信息是部分传输序列次优算法降低正交频率复用信号峰均比所引入的。这两种方案利用了 QPSK 符号的特点,在发射端通过 QPSK 符号相位旋转把边带信息嵌入信号中,然后在接收端通过求模、减法以及比较运算把边带信息检测出来。这两种方案计算复杂度很低,具有较高检测可靠性。

关键词: 部分传输序列算法,峰均比,边带信息

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-240X(2005)05-0671-04

Detection of side information for peak-to-average power ratio reduction of the OFDM signal using the suboptimal PTS method

YANG Gang, JIANG Ri-miao, LI Yu-shan

(Research Inst. of Electronic CAD, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: For every sub-carrier of the OFDM system modulated by QPSK or 4QAM symbols, two simple side information detection schemes for peak-to-average power ratio reduction of the OFDM signal using the suboptimal Partial Transmit Sequence method are proposed. By using the properties of QPSK data and marking the side information into the signal with phase rotation of QPSK data at the transmitter, the two schemes can detect the side information by simple operations (modulo arithmetic, subtract operation and compare operation) at the receiver. The proposed schemes can lead to significant reduction in computational complexity. Simulation results demonstrate the good performance of the proposed schemes, especially for the scheme 2 with error correction.

Key Words: partial transmit sequence, peak-to-average power ratio, side information

正交频率复用(OFDM)是对抗多径衰落和提供高效频谱利用率的一种调制技术。由于可以利用快速傅里叶变换(FFT)实现调制和解调,从而简化了系统的复杂度,因此得到了广泛的应用。与单载波系统相比,由于 OFDM 信号是由多个独立的经过调制的子载波信号相加而成的,这样的合成信号就有可能产生比较大的峰均功率比,因此会对功率放大器的线性范围提出很高的要求^[1]。如果功率放大器线性动态范围不能满足信号变换要求,则接收信号会产生畸变,破坏 OFDM 信号各子载波的正交性,使系统性能恶化,所以必须降低峰均比,如文献[2]的方法。

部分传输序列(PTS)是一种无失真降低峰均比算法,可以有效降低 OFDM 信号峰均功率比。但是,PTS 算法需要发送边带信息给接收机,这就要牺牲 OFDM 系统的频谱效率。如果不以频谱损失为代价,而能够在接收信号中准确地检测边带信息,就可以提高 OFDM 系统频谱效率。在已提出的 PTS 次优算法^[3]基础上,参考已有的边带信息检测算法^[4,5],提出了两种更简单可靠的边带信息检测算法,虽然此算法只适用于 OFDM 子载波受到 QPSK(4QAM)符号调制的情况,但是这两种算法具有较低的计算复杂度和较高的可靠性。

收稿日期 2004-12-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60172004),教育部博士点基金资助项目(20010701003),西安电子科技大学青年工作站基金资助项目(2002XD2009)

作者简介:杨刚(1967-),男,副教授。

1 部分传输序列算法

在 OFDM 系统中,一个 OFDM 符号之内包括 N 个经过调制的子载波的合成信号,其中每个子载波都可以受到相移键控 (PSK) 或者正交幅度调制 (QAM) 符号 $\{X_n, n = 0, 1, \dots, N-1\}$ 的调制. 这 N 个子载波是正交的, 频率为 $f_n = n \Delta f, \Delta f = 1/(NT), T$ 是符号 X_n 保持周期. 经过数模转换后, OFDM 信号可以表示为

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp(j 2\pi f_n t), \quad 0 \leq t \leq NT \quad (1)$$

在部分传输序列算法中,如图 1 所示,输入数据符号被分为若干分组,然后再合并这些分组,以减小峰均功率比. 定义输入数据符号 $X = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]$ 把 X 分为 $\{X_v | X \cap X_j = 0, j \neq v; \bigcup_{k=1}^V X_k = X, v = 1, 2, \dots, V\}$ 组,然后把这 V 个分组以如下方式组合起来:

$$X' = \sum_{m=1}^V b_m X_m \quad (2)$$

其中 $\{b_m = \exp(j\theta_m) | \theta_m \in [0, 2\pi], m = 1, 2, \dots, V\}$ 是加权系数,也称为边带信息. 快速傅里叶逆变换后,式 (2) 的时域表达式为

$$x' = \sum_{m=1}^V b_m X_m \quad (3)$$

在上述的 PTS 算法中,要找到最优的加权系数来组合 V 个分组,这对 OFDM 系统来说是一个沉重的负担. 文献 [3] 提出了次优迭代寻找加权系数算法,加权系数取值只限于 $\{+1, -1\}$. 把输入数据分成 V 组,然后经快速傅里叶逆变换得到 V 个 N 点时域部分传输序列 x_m . 具体作法是,首先,假设所有 $b_m = 1, m = 1, 2, \dots, V$,计算式 (3) 的峰均功率比,接着令 $b_1 = -1$,重新计算式 (3) 的峰均功率比. 若新的峰均功率比比原来的峰均功率比小,把 $b_1 = -1$ 当作最后加权系数的一部分,否则, $b_1 = 1$. 按照此模式计算下去,直到 $m = V$. 在下两节中,把 $\{b_m, m = 1, \dots, V\}$ 称为边带信息字. 图 2 为用 PTS 次优迭代寻找加权系数算法降低峰均功率比的互补累积分布函数图,OFDM 子载波数为 256, V 为不同的分组数 (1, 2, 4, 8, 16).

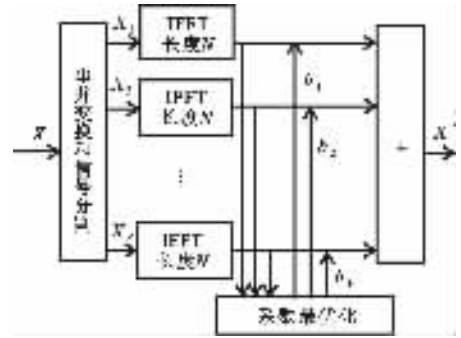


图 1 PTS-OFDM 发射机基本框图

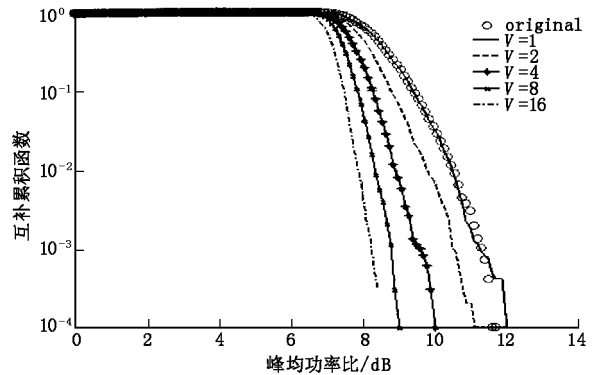


图 2 PTS 次优迭代算法降低峰均功率比的互补累积分布曲线图

2 边带信息的嵌入和检测

假设输入数据 $X = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]$ 为 QPSK (4QAM) 符号, $|X_k|^2 = 1$, 加权系数 $b = \pm 1$.

2.1 边带信息的嵌入

在传输的 OFDM 频域信号中嵌入标记,这些标记唯一地表示边带信息字,具有可靠的检测性,而且不能对系统有严重的干扰影响. 图 3 是 PTS 算法在发射端的频域信号中嵌入边带信息基本框图,把标记嵌入到 OFDM 频域信号中的算法是:如果 $b_1 = 1$,

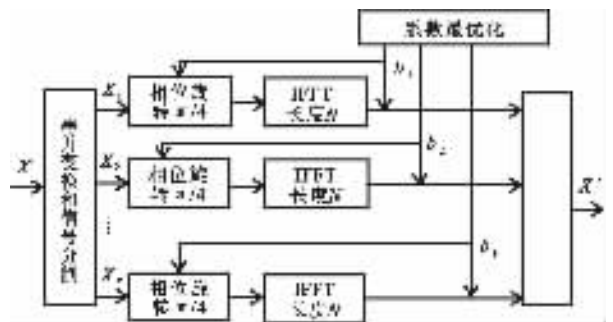


图 3 PTS-OFDM 频域信号中嵌入边带信息

则 $X_l[k] = X_l[k]$; 否则 $X_l[k] = X_l[k] \exp(j\pi/4)$, $l = 1, \dots, V; k = 0, \dots, N/V - 1$. 图 4 是用信号星座图来描述边带信息被嵌入 OFDM 频域信号后的信号星座图分布, 空心圆表示原来 QPSK 星座点, 实心圆表示相位被旋转 $\pi/4$ 的 QPSK 星座点.

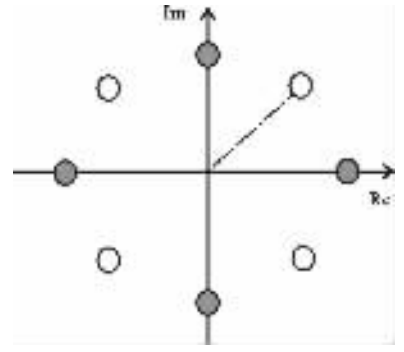


图 4 OFDM 信号被嵌入边带信息后的星座图分布

2.2 边带信息的检测

接收机把接收到的信号经过快速傅里叶变换(FFT)后得到信号为 $Y_l[k] k = 0, \dots, N/V - 1; l = 1, \dots, V$. 其中 $Y_l[k]$ 表示第 l 分组中的第 k 个子载波信号. 这里给出了检测 b_l 的准则.

$$\text{方案 1: } D_l = |\text{Re}\{Y_l[k]\}| - |\text{Im}\{Y_l[k]\}|, \quad (4)$$

其中 $|D_l| = \begin{cases} 1 & , b_l = -1 \\ 0 & , b_l = 1 \end{cases}$. 当 $|D_l| = 1$ 时, $b_l = -1$; 反之

$|D_l| = 0$ 时 $b_l = 1$. 这样, 边带信息字 $\{b_m, m = 1, \dots, V\}$ 在接收端就被检

测出来了. 由于噪声的缘故, 接收信号经过 FFT 后为 $Y = Y'/H = X + \mathcal{T}(n)/H$, n 为高斯白噪声, $\mathcal{T}(n)$ 为快速傅里叶变换. 假设信道响应 H 已估计出来, H 为理想信道. 由于 FFT 变换是线性变换, 所以 $\mathcal{T}(n)/H$ 也为高斯白噪声. 因此 $D_l \in (-P_n^{1/2}, P_n^{1/2})$ 或 $D_l \in (1 - P_n^{1/2}, 1 + P_n^{1/2})$, P_n 为噪声 $\mathcal{T}(n)/H$ 的归一化功率. 可以控制信号的信噪比, 使得区间 $(-P_n^{1/2}, P_n^{1/2})$ 和 $(1 - P_n^{1/2}, 1 + P_n^{1/2})$ 不会重叠或者重叠的区间长度较小. 因此区间 $(-P_n^{1/2}, 1 + P_n^{1/2})$ 的中点 $1/2$ 是最佳的判决门限. 从而得到

$$|D_l| \begin{cases} \geq 1/2 & , b_l = -1 \\ < 1/2 & , b_l = 1 \end{cases} \quad (5)$$

根据式 (5) 给出的判定准则来检测边带信息 b_l , 当 $|D_l| \geq 1/2$ 时 $b_l = -1$; 当 $|D_l| < 1/2$ 时 $b_l = 1$.

在方案 1 中, 只用了分组序列中的一个数据, 由于信道的噪声干扰, 可能使检测到的边带信息字出错, 此方案没有纠错能力. 如果把简单编码理论应用到方案 1 中, 就使得这种检测准则有了很强的可靠性. 就此在方案 1 的基础上, 再增加两个子载波数据, 提出了方案 2.

$$\begin{aligned} \text{方案 2: } D_l^i &= \text{abs}(|\text{Re}\{Y_l[i]\}| - |\text{Im}\{Y_l[i]\}|) \\ D_l^j &= \text{abs}(|\text{Re}\{Y_l[j]\}| - |\text{Im}\{Y_l[j]\}|) \\ D_l^k &= \text{abs}(|\text{Re}\{Y_l[k]\}| - |\text{Im}\{Y_l[k]\}|) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 i, j, k 为第 l 分组中任一位且 $i \neq j \neq k$. 约定, 当 $|D_l^i| \geq 1/2$ 时 $d_l^i = 1$; 反之 $d_l^i = 0$. 同理有 d_l^j 和 d_l^k , 所以得到三位二进制数 $d_l^i d_l^j d_l^k$. 按照编码的纠错理论, 这三位二进制数可以有 8 种组合. 但在此方案中只有 $d_l^i d_l^j d_l^k = 111$ 和 $d_l^i d_l^j d_l^k = 000$ 是许用码组, 其余为禁用码组. 当检测出 $d_l^i d_l^j d_l^k = 110$ 时, 就认为 $d_l^i d_l^j d_l^k = 111$, 因为码组中错一个码的概率比错两个码的概率大, 所以不会认为 $d_l^i d_l^j d_l^k = 000$. 同理, 当 $d_l^i d_l^j d_l^k$ 为 $(111, 110, 101, 011)$ 之一时, 就认为 $d_l^i d_l^j d_l^k = 111$; 当 $d_l^i d_l^j d_l^k$ 为 $(000, 001, 100, 010)$ 之一时, 就认为 $d_l^i d_l^j d_l^k = 000$. 因此得出结论:

$$d_l^i d_l^j d_l^k = \begin{cases} 111 & , b_l = -1 \\ 000 & , b_l = 1 \end{cases} \quad (7)$$

即当 $d_l^i d_l^j d_l^k = 111$ 时 $b_l = -1$; 当 $d_l^i d_l^j d_l^k = 000$ 时 $b_l = 1$.

把以上两个方案和文献 [4] 中的方案进行比较. 在文献 [4] 中, 如果 $b_l = 1$, 则 $X_l[k] = X_l[k]$, $l = 1, \dots, V; k = 0, \dots, N/V - 1$; 如果 $b_l = -1$, k 为偶数时, $X_l[k] = X_l[k]$; k 为奇数时, $X_l[k] = X_l[k] \exp(j\pi/4)$. 在接收端检测 b_l 的准则是

$$D_l = \sum_{k=1}^{N/V-1} (Y_l[k] Y_l^*[k+1])^4 \quad (8)$$

其中 $D_l = \begin{cases} N/V - 1 & , b_l = 1 \\ -(N/V - 1) & , b_l = -1 \end{cases}$. 其检测的方法是: 首先得到序列 $\{\text{Re}\{D_l\}, l = 1, 2, \dots, V\}$, 然后把序列中的每项数字转换为 $+1$ 或 -1 . 最后在长度为 V 的沃尔什序列中选择汉明距离最小的沃尔什序列

作为边带信息序列 $\{b_l, l = 1, 2, \dots, V\}$.

由式(8)看出,文献[4]在接收端检测 b_l 需要用到整个数据分组 X_l ,需要做乘法、幂以及加法运算.把方案1、方案2的计算复杂度和文献[4]中方案的计算复杂度进行比较,检测 b_l 的计算量如表1所示(这里没有考虑计算沃尔什序列的复杂度).

表1 方案1、方案2和文献[4]中方案复杂度比较

运算类型	加法(减法)	乘法	幂运算	比较运算	求模运算
方案1	1次	无	无	1次	3次
方案2	3次	无	无	3次	9次
文献[4]方案	$(N/V - 1)$ 次	$(N/V - 1)$ 次	$(N/V - 1)$ 次幂指数为4的幂运算	1次	无

从表1可看出,文献[4]中方法的计算量随着OFDM系统子载波数 N ,PTS算法分组数 V 的不同而不同,每检测一个 b_l 的计算量随 N (OFDM子载波数)增加而增加,随 V (PTS算法分组数)的增加而降低.但是 V 的增加使系统降低峰均功率比的复杂度又增加,因此降低峰均功率比的运算复杂度和检测边带信息的复杂度是一个矛盾,不能彼此兼顾.方案1和方案2每检测一个 b_l 和OFDM系统子载波数 N 、PTS算法分组数 V 无关,只需要做简单的加法、比较以及求模运算就可以检测到 b_l ,无需复杂的乘法和幂运算.

方案2是方案1的一种扩展,可以根据实际情况的需要,像方案2那样适当地增加 $d_i, i = 1, 2, \dots, N/V$ 的位数(位数为奇数,奇数位的码字有完备译码性质),这样就可以得到边带信息检测可靠性更高的方案.

3 仿真和分析

在第1节中,把 $\{b_m, m = 1, \dots, V\}$ 称为边带信息字,用接收端检测出的边带信息字的误字率描述以上方案的检测性能.仿真参数为OFDM子载波数256,PTS分组数16,OFDM子载波受到QPSK符号调制,信道为AWGN信道.

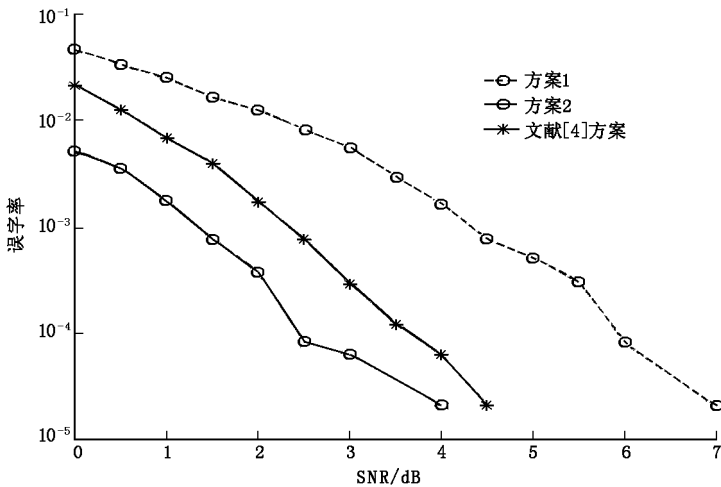


图5 不同信道比下的边带信息误字率图

仿真结果如图5所示.方案1只用每个分组中一个子载波数据来进行检测,其检测具有比较弱的抗噪声性能;方案2是在方案1的基础上,再增加同个分组中两个不同的子载波数据,同时应用了简单的纠错能力,因此方案2具有较强的抵抗噪声性能.在信噪比为2dB的条件下,方案2的误字率是0.03%,文献[4]方法的误字率是0.1%.很明显,方案2不仅复杂度低,而且检测结果可靠.在用PTS次优迭代算法降低OFDM系统峰均功率比时,方案2以一种直观、低代价的方式达到对边带信息的可靠检测.这对一些要求很强实时性,又要求很低误码率的OFDM系统来讲,方案2和PTS次优迭代算法的结合是一种很好的解决问题的方案.

