

降低功率控制下正交频分复用系统的峰均比

武林俊, 朱世华, 冯兴乐

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了降低功率控制条件下正交频分复用系统的峰值功率与均值功率之比(峰均比),提出了基于数据块功率平衡准则的部分传输序列技术,即把子载波信号分割成 V 个数据块,按照功率平衡准则,每个数据块具有相同的信号功率,不同数据块所包含的子信道数不同.再采用旋转矩阵来减小数据块之间的相关性以便减小系统的峰均比值.与传统的均匀分割数据信号法相比,采用这种技术时,系统的峰均比值减小了 0.8~2 dB.

关键词: 功率控制;正交频分复用;峰均比;部分传输序列

中图分类号: TN914.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)08-0859-04

Reducing Peak-to-Average Power Ratio for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Systems under Low Power Control

Wu Linjun, Zhu Shihua, Feng Xingle

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A partial transmit sequence scheme based on the power-balance principle is proposed in order to reduce the peak-to-average power ratio (PAR) in low power control orthogonal frequency division multiplexing systems. According to the power-balance principle, multi-carrier signals are partitioned into V signal blocks, where every block has the same power but the number of sub-carriers within a block is different from each other. The relativity of V blocks is reduced by introducing circumrotate matrix into the V blocks. By this way, the PAR can be reduced by 0.8-2 dB compared with the original equal scheme where each block has the same number of sub-carriers.

Keywords: power control; orthogonal frequency division multiplexing; peak-to-average power ratio; partial transmit sequence

近几年来,正交频分复用(OFDM)技术由于其频谱利用率高、能消除码间串扰等优点受到了人们的日益关注,成为下一代移动通信的优选方案之一^[1,2].但是,OFDM 技术有两个关键问题——频率同步和信号的峰值功率与均值功率比(PAR)较大仍需要进一步研究.本文只针对 PAR 抑制技术进行研究.对于复正弦信号,如果不采取抑制方案,OFDM 信号的峰值功率可以达到均值功率的 N 倍(N 是总的子载波数)^[3-5],这样大的功率动态范围,

要求发射机的最大发射功率是平均发射功率的 N 倍,而且为了保证发射信号中的各个子载波的正交性,发射机不能有非线性失真,这在移动台和卫星发射端过大的功率动态范围是做不到的.由于发射机的非线性失真,发射信号子载波间的频谱不再保证正交性,信道间的干扰增大,系统的性能会急剧恶化,因此必须降低系统的 PAR 值.

现阶段已有多种降低 OFDM 信号 PAR 的技术,主要有序列法^[4-7]和相位法^[1,8].序列法是在代表

相同信息的一组序列中选择 PAR 值最小的一组发射;相位法则通过给不同的子载波信号分配不同的初始相位来保证 OFDM 信号的 PAR 极小化.部分传输序列法(PTS)^[4-6]是把所有子载波分割成 V 个相同子载波数的数据块,每个数据块包含 N/V 个 OFDM 符号,有 M 个序列与之对应,这 M 个序列都代表相同的信息,从中找出 PAR 最小的一组序列发射.这一方法需要对所有的分割块进行全局优化以保证总信号的 PAR 最小,同时需要把副信息(M 个序列中的某个序列的号)传送到接收端以便恢复信号,这是 PTS 技术必须付出的代价.为了使 PTS 编码方便和在接收端解码简单,文献[5]采用模为 1 的旋转矢量对 OFDM 符号块进行旋转,得出了旋转矢量个数 $M=4$ 即旋转矢量 $P=(\pm 1 \pm j)/2^{1/2}$ 时性能与复杂度之比的最优结果.再增大旋转矢量的个数,PAR 降低的趋势已不再明显.

已有的文献都认为,每一个数据块包含相同的子载波数时,PAR 能达到最小.这一结论没有考虑到频率选择性信道对系统性能的影响,认为其隐含条件是 N 个子信道的无线链路衰落相同,子载波信号按照等功率分配资源.然而,在实际的 OFDM 系统中,无线信道是频率选择性信道,不同子信道的衰落是不同的.同时,误码率必须要满足系统要求,于是需要在发射端引入功率控制以抵消链路衰落对系统的影响.如果采用已有的子信道平衡分割准则,整个系统会有较大的 PAR 值.本文考虑到了信道衰落对系统的影响,通过调整子载波的发射功率来保证系统的误码率性能,并采用功率平衡原则下的 PTS 技术来降低系统的 PAR 值.

1 系统模型和等功率 PTS 技术

功率控制下的 OFDM 系统的发射结构如图 1 所示.不失一般性,认为系统共有 N 个子载波.数据经过编码,映射为 OFDM 符号,再经过串/并转换为 N 路子载波数据流 $[d_1, d_2, \dots, d_N]$.在接收端,对每

一路子载波信号计算其信干比 $\gamma_n (n=1, \dots, N)$ 并与给定的目标信干比 γ_0 作比较.当 $\gamma_n \geq \gamma_0$ 时,控制比特为 0;当 $\gamma_n < \gamma_0$ 时,控制比特为 1.接收端把控制比特信息传输给发射端.发射端利用接收到的控制比特信息调节信号放大矢量 $W=[W_1, W_2, \dots, W_N]$ 以抵消无线链路对信号的衰落,满足误码率要求,其中 $W_n (n=1, \dots, N)$ 是第 n 路子载波的信号放大因子.功率控制下的信号为

$$x_n = d_n W_n, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

功率控制后的信号按照某种准则把 N 个信号分割为 V 个数据块 $\{C_1, C_2, \dots, C_V\}$,每个数据块包含的子载波数为 $\{m_1, m_2, \dots, m_V\} (m_1 + m_2 + \dots + m_V = N)$.再利用 PTS 技术来降低 PAR 值.一般而言,大功率值的信号对 PAR 的贡献更大,同时由于分配到一个数据块中的所有信号对应的旋转因子是相同的,因此为了有效降低 PAR,首先应保证大功率信号对应的旋转因子的取值尽可能不同,也就是大功率的信号尽量避免分配到一个数据块中,最好在 V 个数据块中均匀分配.这样,一个数据块中大功率信号产生的峰值可以利用对其余数据块施加不同的旋转矢量来抵消它.按照以上功率平衡原则,每个数据块所包含的功率应该相同,而数据块包含的子载波数可以不相同. P_l^g 是需要优化的第 l 个数据块的旋转因子,其中 $g=1, 2, \dots, G (G$ 是旋转因子允许取值的最大个数^[5]).旋转后的信号经过逆快速傅里叶变换 (IFFT) 得到时域信号 $[X_1, X_2, \dots, X_N]$,串/并转换后输出.

信号 $[x_1, \dots, x_n, \dots, x_N]$ 中属于第 i 个数据块的分割矢量用 $\Lambda_i = \{\lambda_1^i, \lambda_2^i, \dots, \lambda_N^i\} (i=1, 2, \dots, V)$ 表示, $\lambda_n \in \{0, 1\}$.当 $x_n \in C_i$ 时, $\lambda_n^i = 1$;当 $x_n \notin C_i$ 时, $\lambda_n^i = 0$.第 i 个数据块包含的信号为

$$C_i = [x_1 \lambda_1^i, x_2 \lambda_2^i, \dots, x_N \lambda_N^i], \quad i = 1, 2, \dots, V \quad (2)$$

令 $\Lambda = [\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_N]^T, C = [C_1, C_2, \dots, C_V]^T, x = [x_1, \dots, x_n, \dots, x_N]$,有

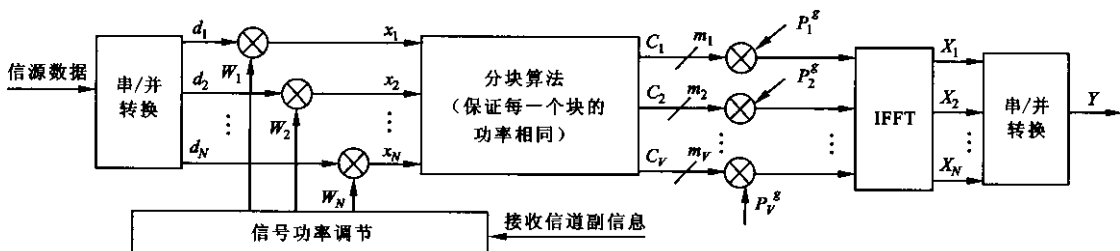


图 1 功率控制下的 OFDM 系统的发射结构(基带信号)

$$\mathbf{x} \otimes \mathbf{A} = \mathbf{C} \quad (3)$$

式中: \otimes 表示矩阵的广义点积。

子载波信号的分割满足以下条件。

(1)所有分割矢量求和的结果应该是 $1 \times N$ 的单位阵,这样便保证了分配的惟一性,任何一个信号都应属于 V 个数据块中的一个,而且信号惟一地只属于某个数据块,不可能出现在其他数据块中。

(2)令 $Z_{av} = E\left[\left|\sum_{n=1}^N x_n\right|^2\right]$ 为总信号的平均功率, $Z_i = E\left[\left|\sum_{n=1}^N x_n \lambda_n^i\right|^2\right]$ 为第 i 个数据块的平均功率,其中 $E[\cdot]$ 表示对时间求均值。通过调整分割矢量 \mathbf{A} 以保证每个数据块的功率尽可能相同。分配矢量 \mathbf{A} 的求解为

$$\mathbf{A} = \underset{\mathbf{A}}{\operatorname{argmin}}(\max |Z_{av} - Z_j|) \quad (4)$$

通过上面的分割技术,保证了每个数据块包含的功率尽可能相同。对 V 个数据块,引入旋转因子 P_j^g 来减小 PAR 值,旋转后的信号再经过逆快速傅里叶变换调制到 N 个子载波上,并串转换后得到输出信号 Y 。信号的峰值功率与均值功率之比 β 定义为

$$\beta = \max[|Y|^2]/E[|Y|^2] \quad (5)$$

式中: $\max[X]$ 表示 X 中的最大值。为了准确描述 PAR 值,需要对信号 Y 进行过抽样,过抽样率为 $4^{[4,5]}$ 。

通过调整旋转矩阵的取值使系统的 PAR 最小,旋转矩阵的最优值 $\{\hat{P}_1, \hat{P}_2, \dots, \hat{P}_V\}$ 由下式给定。

$$\{\hat{P}_1, \hat{P}_2, \dots, \hat{P}_V\} = \underset{(P_1^g, P_2^g, \dots, P_V^g)}{\operatorname{argmin}} \left(\max \left| \sum_{j=1}^V P_j^g C_j \right| \right) \quad (6)$$

$g = 1, 2, \dots, G$

和传统方法一样,旋转矩阵需要传输到接收端,以便能恢复出原始信号。旋转矢量空间的大小与传统的均匀分割法相同,本文的复杂度只是在传统方法的基础上增加了一个数据块功率计算环节。

2 系统性能

对于每一个子载波,在接收端由于信道的非理想和频率偏移,子载波间的正交性受到破坏。对于子信道 i ,信道干扰 I_i 为其他信号在子信道 i 上的干扰 T_i 加上白色高斯噪声 A

$$I_i = T_i + A \quad (7)$$

当子载波数 N 足够大时,近似可得

$$T_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_j^i (x_j)^2 \lambda_j \approx \sum_{j=1}^N \alpha_j^i (d_j W_j)^2 \lambda_j \quad (8)$$

式中: α_j^i 是子信道 j 上的信号功率对子信道 i 的干扰因子; λ_j 是子信道 j 的无线链路增益。

子信道 i 的信干比为

$$\gamma_i = \frac{(d_i W_i)^2 \lambda_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_j^i (d_j W_j)^2 \lambda_j + A} \approx \frac{(d_i)^2 W_i^2 \lambda_i}{\sum_{j=1}^N \alpha_j^i (d_j W_j)^2 \lambda_j + A} \quad (9)$$

系统的误码率主要由链路性能较差的子信道决定。由于采用了功率控制,因此可通过调解发射端功率因子 W_i 的值,使接收端子信道 i 的信干比 γ_i 等于目标信干比 γ_0 。

假设信道属于慢变信道,在一定时间内信道参数几乎不变化。当 N 很大时, T_i 近似为与子信道 i 无关的常数 T ,即认为所有子信道都有相同的干扰,则式(9)可以简写为

$$\gamma_i = \frac{(d_i)^2 W_i^2 \lambda_i}{T + A} \quad (10)$$

按照中心极限定理,当子载波数 N 较大时,信号 Y 的实部和虚部遵循高斯分布,信号的幅度服从瑞利分布,功率 P 服从自由度为 2 的中心 χ^2 分布,其密度函数为 $\rho_p(y) = \exp(-y)$,其互补累积分布函数(CCDF)为

$$\eta(P > P_0) = \int_{P_0}^{+\infty} \exp(-y) dy = \exp(-P_0) \quad (11)$$

式中: P_0 是功率门限。在 OFDM 符号周期内的 Q 个采样值中,每个采样值的功率都小于 P_0 的概率分布为 $(1 - \exp(-P_0))^Q$,则 OFDM 符号周期内的 Q 个采样值当中每个采样点的功率与均值功率之比 $\hat{\beta}$ 都大于给定 PAR 门限 β_0 的互补累积分布函数(CCDF)

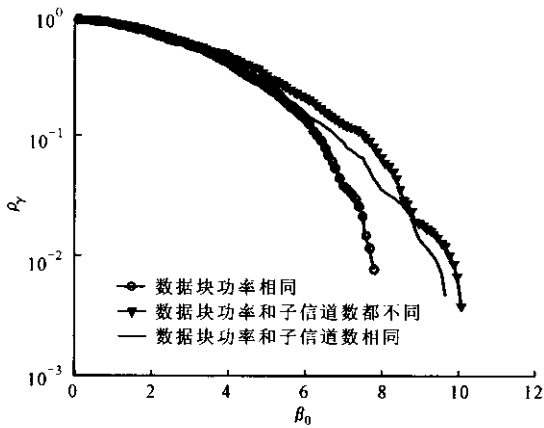
$$\rho_\gamma = \rho_\gamma(\hat{\beta} > \beta_0) = 1 - (1 - \exp(-\beta_0))^Q \quad (12)$$

3 仿真与结果

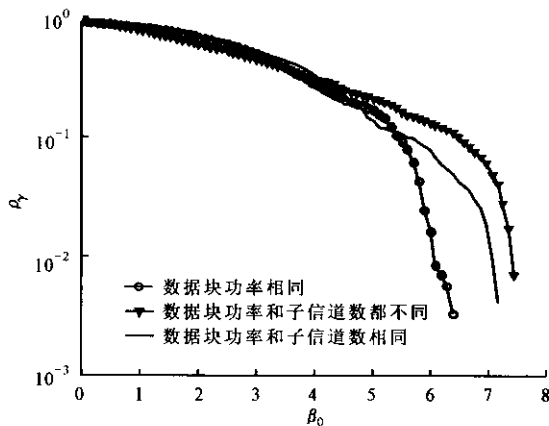
为了验证功率平衡分割方法在功率控制下的 OFDM 系统降低 PAR 的有效性,认为链路增益 λ_i 由两部分组成,即 $\lambda_i = h_i q_i$,其中 h_i 为路径损失,路径损失指数取为 2.8, q_i 为服从均值为 0、方差 δ^2 为 1 和 0.5 的对数正态分布。子信道干扰因子取相同的值 $\alpha_j^i = 0.01$ 。采用 QPSK 调制,子信道数 $N=64$, $G=4$, $V=8$ 。考虑 3 种情况下的 CCDF 特性:①本文提出的数据块功率平衡方法;②数据块功率不相同,

按照线性递增变化,而且数据块包含的子信道个数也不相同;③传统的均匀分割数据方法,即每个数据块所包含的子信道个数相同,但是功率不同。

图2描述了 $4N=256$ 个采样点的PAR的互补累积分布函数 ρ_γ 与给定PAR门限 β_0 的关系,从图中可以看出采用不同的分割方法,CCDF的性能是不同的,数据块功率平衡分割方法的PAR值最小,传统的均匀分割法次之,功率线性变化分割法的性能最差。当 $\delta^2=1$ 时,本文提出的方法的PAR值比传统的均匀数据分割法减小了2 dB;当 $\delta^2=0.5$ 时,本文提出的方法的PAR值比传统的均匀数据分割法减小了0.8 dB。



(a) $\delta^2=1$



(b) $\delta^2=0.5$

图2 采用不同的分割方法时的 ρ_γ 与 β_0 的关系

对于本文提出的均衡分配功率算法,图2b的PAR值小于图2a的PAR值,这是由于图2a子信道的链路增益处于深度衰落的概率大于图2b的,为了满足误码率要求,图2a中大功率信号出现的概率

大于图2b。当信号功率的变化范围过大时,要保证数据块功率的均衡,其难度明显增大,有时几乎是不可能的。在图2b的仿真环境中,子数据块的功率均衡度要好于图2a,所以图2b的PAR值小于图2a的PAR值。当 δ^2 变小时,两种分割方法的差别会进一步减小;当 $\delta^2=0$ 时,两种方法的结果相同。

4 结论

在实际的OFDM系统中,采用功率控制以保证系统的误码率性能,采用功率平衡准则下的PTS技术来降低系统的PAR。把 N 个子载波分为 V 个数据块,每个数据块包含有相同的功率,而数据块中的子载波数可以不同,这时PAR值最小。本文提出的基于功率平衡准则下的分割技术与传统的分割技术相比较,PAR值能减小0.8~2 dB。

参考文献:

- [1] Popovic B M. Spreading sequences for multicarrier CDMA systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(6): 918-926.
- [2] Miletic I, Dimitrijevic B, Nikolic Z. Performance of OFDM DS-SS in fading channels [A]. TELSIKS'99, Nis, Yugoslavia, 1999.
- [3] Sathananthan K, Tellambura C. Coding to reduce both PAR and PICR of an OFDM signal [J]. IEEE Communications Letters, 2002, 6(8): 316-318.
- [4] Krongold B S, Jones D L. PAR reduction in OFDM via active constellation extension [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2003, 49(3): 258-268.
- [5] You Y H, Jeon W G. Low-complexity PAR reduction schemes using SLM and PTS approaches for OFDM-CDMA signals [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(2): 284-289.
- [6] Eetvalt P V, Wade G, Tomlinson M. Peak to average power reduction for OFDM schemes by selective scrambling [J]. Electronics Letters, 1996, 32(21): 1963-1964.
- [7] Davis J A, Jedwab J. Peak-to-main power control and error correction for OFDM transmission using Golay sequences and Reed-Muller codes [J]. Electronics Letters, 1997, 33(4): 267-268.
- [8] Jang J, Lee K B. Transmit Power Adaptation for Multiuser OFDM Systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(2): 171-178.

(编辑 刘杨)