

MQAM-OFDM 系统中降低峰均比与残余载波频偏同步联合算法

戈立军¹, 赵迎新¹, 傅民皓¹, 金宇昂¹, 张 冀², 吴 虹¹

(1. 南开大学信息技术科学学院, 天津 300071; 2. 96275 部队, 河南洛阳 471003)

摘 要: 针对 OFDM 系统对频偏敏感及峰均比高的问题, 提出一种用 MQAM 调制值的共轭码对残余载波频偏进行跟踪的方法, 该共轭码同时可以降低系统峰均比. 用频域 MQAM 数值的共轭来调制导频子载波以抵消相位, 降低系统的峰值功率. 同时利用这种共轭关系估计残余载波频偏引起的相位旋转, 在时域或频域进行纠正. 仿真结果表明利用这种共轭码可有效的跟踪频偏, 又使系统具有更低的峰均比.

关键词: 正交频分复用; 峰均比; 载波频率偏差; 同步

中图分类号: TN914.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 01-0168-04

Joint PAPR Reduction and Residual CFO Synchronization for MQAM-OFDM Systems

GE Li-ju¹, ZHAO Ying-xin¹, FU Min-hao¹, JIN Yu-ang¹, ZHANG Ji², WU Hong¹

(1. College of Information Technical Science, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. 96275 PLA Troops, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: A technique for the residual carrier frequency offset (CFO) tracking and the peak-to-average power ratio (PAPR) reduction in multilevel quadrature amplitude modulation (MQAM) based orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems is presented. The scheme is based on unknown pilot subcarriers modulated by the conjugate of the MQAM information data, cancelling their phases to reduce the maxim power. The conjugate code periodically inserted in the OFDM symbols allows the frequency tracking loop to estimate the phase offset using a derived formula. The simulation investigates the algorithm performance showing that the frequency can be precisely corrected and the PAPR can be reduced with several dB.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); peak-to-average power ratio (PAPR); carrier frequency offset (CFO); synchronization

1 引言

正交频分复用(OFDM)系统由于其频带利用率高、抗符号间串(ISI)扰能力强、抗频率选择性衰落能力强等诸多优点,被誉为下一代无线通信技术的核心,但同时也存在对载波频偏十分敏感和峰均比(PAPR)高等不足.载波频率偏移导致子载波间的正交性遭到破坏,从而产生子信道间干扰(ICI),大的峰均比造成信号非线性失真或对后续放大电路线性度要求极高而难以实现,这些都使系统性能大大下降^[1].

频率同步分捕获和跟踪两个阶段,同步性能好坏关键在于跟踪.已有的重发符号跟踪法^[2],性能较好但占用额外频带.循环前缀跟踪法^[3]收敛较快但其性能受循环前缀长度影响,需要较长循环前缀.差分判决反馈法^[4]和相干判决反馈法^[5],运算量较大,复杂度较高.文献^[6]通过计算星座图的相位误差反馈跟踪频偏,并复用捕获时的取复数模块,使复杂度较低.文献^[7]利用循环前缀和前导序列对某 OFDM 系统进行频率同步.在降低峰均比方面,经典的方法有部分传输序列法(PTS)^[8]

及选择映射法^[9].本文提出一种适用于 MQAM-OFDM 系统的基于共轭码的频率跟踪方法,仿真表明该方法既能对载波频率偏差进行有效的跟踪,又使系统具有较低的 PAPR,同时其运算量小,复杂度低.

2 信号模型

OFDM 是一种特殊的多载波通信方案,其基本思想是将高速串行的数据码流转变为 N 路并行的低速数据码流,然后线性调制到等频率间隔的 N 个相互正交的子载波上同时进行传输.对于包含 N 个子载波的 OFDM 系统来说,经过快速傅立叶逆变换(IFFT)得到的功率归一化复基带子信号^[1]为:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \exp\left(\frac{2\pi jnk}{N}\right) \quad (1)$$

$n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, 其中 $s(k)$ 表示第 k 个子载波上的调制信号,对于 MQAM-OFDM 系统其为 QAM 的映射值.与单载波系统相比,由于 OFDM 符号由多个独立的经过调制的子载波信号相加而成,这样的合成信号就有可能产生比较大的峰值功率,由此会带来较大的峰值平均功

率比,简称峰均比^[1],定义为:

$$PAPR(\text{dB}) = 10\lg \frac{\max\{|x(n)|^2\}}{E\{|x(n)|^2\}} \quad (2)$$

其中 $x(n)$ 表示经过 IFFT 运算之后所得到的输出信号. 对于包含 N 个子信道的 OFDM 系统来说,当 N 个子信号以相同的相位求和时,所得到的信号的峰值功率就会是平均功率的 N 倍,因而基带信号的最大峰均比可以为 $10\lg N$.

发端 IFFT 后,

$$x_N(m) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} s(k) e^{j(2\pi/N)mk}, m=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

加循环前缀后, $\mathbf{X} = [X_L \quad X_N]$, 经过信道后,

$$y(l) = x(l) e^{j(2\pi/N)l\epsilon} + n(l), l=0,1,\dots,N+L-1 \quad (4)$$

其中 ϵ 为归一化频偏. 收端去 CP 后,

$$y_N(m) = x_N(m) e^{j(2\pi/N)(m+L)\epsilon} + n(m), m=0,1,\dots,N-1 \quad (5)$$

FFT 后,

$$\begin{aligned} r(i) &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} y_N(m) e^{-j(2\pi/N)mi}, i=0,1,\dots,N-1 \\ &= \frac{1}{N} e^{j(2\pi/N)L\epsilon} \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \sum_{m=0}^{N-1} e^{j(2\pi/N)m(k-i+\epsilon)} \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} n(m) e^{-j(2\pi/N)mi} \\ &= \frac{1}{N} e^{j(2\pi/N)L\epsilon} s(i) \sum_{m=0}^{N-1} e^{j(2\pi/N)m\epsilon} \\ &\quad + \frac{1}{N} e^{j(2\pi/N)L\epsilon} \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^{N-1} s(k) \sum_{m=0}^{N-1} e^{j(2\pi/N)m(k-i+\epsilon)} \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} n(m) e^{-j(2\pi/N)mi} \\ &= s(i) \frac{\sin(\pi\epsilon) e^{j\pi\epsilon(N+2L-1)/N}}{N \sin(\pi\epsilon/N)} \\ &\quad + \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^{N-1} s(k) \frac{\sin(\pi(\epsilon+k-i)) e^{j\pi[2L\epsilon+(N-1)(\epsilon+k-i)]/N}}{N \sin(\pi(\epsilon+k-i)/N)} \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} n(m) e^{-j(2\pi/N)mi} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中第一项为第 i 个子载波的有用信号,第二项为其他子载波的干扰,即 ICI,第三项为高斯白噪声干扰.

第 i 个子载波的幅度衰减为 $\frac{\sin(\pi\epsilon)}{N \sin(\pi\epsilon/N)}$, 信干比^[10]为

$$\begin{aligned} SIR &= \frac{E \left[\left| s(i) \frac{\sin(\pi\epsilon) e^{j\pi\epsilon(N+2L-1)/N}}{N \sin(\pi\epsilon/N)} \right|^2 \right]}{E \left[\left| \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^{N-1} s(k) \frac{\sin(\pi(\epsilon+k-i)) e^{j\pi[2L\epsilon+(N-1)(\epsilon+k-i)]/N}}{N \sin(\pi(\epsilon+k-i)/N)} \right|^2 \right]} \\ &= \frac{\left| \frac{\sin(\pi\epsilon)}{\sin(\pi\epsilon/N)} \right|^2}{\left| \sum_{k=1}^{N-1} \frac{\sin(\pi(\epsilon+k))}{\sin(\pi(\epsilon+k)/N)} \right|^2} \end{aligned} \quad (7)$$

当频偏很小时,幅度衰减近似为 1,信干比近似无穷大,此时可以忽略幅度衰减和 ICI;当频偏较大时,幅度衰减和 ICI 都较为严重,需对其进行补偿.

3 联合算法

在 OFDM 系统中,若所有子载波相位相同,经过 IFFT 后叠加起来产生极大的峰值,从而造成大的峰均比.我们在子载波中加入相位相反的共轭码来避免出现所有子载波同相位的情况,这样相当于用一部分频带利用率来换取峰均比的降低,在某些对频带或速度要求不是很高的情况下可以有效的降低峰均比,减小功放设计的复杂度.设 OFDM 系统子载波数为 N , N 个子载波上传输的数据为 $\mathbf{S} = [s(0), s(1), \dots, s(N-1)]$, 其中的 P 个为共轭符号, $P < N/2$, 另 $N-P$ 个为 QAM 映射后的有用数据.从 $N-P$ 个有用数据中选 P 个并分别取共轭即形成 P 个共轭码.此方法中 P 个有用 QAM 值的选取与其共轭码在子载波中的位置可根据需要来设计,其对于降峰均比效果是一样的.图 1 所示为把共轭码都加在符号末尾的一种构成情况,其中

$$s(i) = \begin{cases} s(i), & 0 \leq i \leq N-P-1 \\ \text{conj}(s(i-N+P)), & N-P \leq i \leq N-1 \end{cases} \quad (8)$$

S(0)	S(1)	S(2)	...	S(N-P-1)	S(0)	S(1)	...	S(P-1)
------	------	------	-----	----------	------	------	-----	--------

图 1 加入共轭码的 N 个子载波数据

频偏捕获阶段频偏较大,频域补偿式(6)中的幅度衰减和 ICI 比较复杂,不易实现,所以捕获一般都在时域进行,例如 MLE 法^[11]、导频辅助法^[12].捕获阶段已经把频偏控制在很小的范围内,所以由前文分析可知跟踪时可以近似认为没有幅度衰减及子载波间干扰或把它们当做噪声处理.传统的跟踪方法常利用承载已知常数信息的导频子载波,这里我们用所设计的共轭码作导频来进行频率跟踪,从而达到既降峰均比又有效进行频率跟踪的目的.由式(6)

$$r(k) = s(k) e^{j\Delta\theta} \quad (9)$$

其中, $\Delta\theta = \frac{(N+2L-1)\pi\epsilon}{N}$ 为子载波相位偏移,故可以通过估计此偏移量来跟踪残余频偏.

方便起见,我们按图 1 所示加共轭码方式对跟踪方法予以分析说明.由式(9)

$$r(i) r(N-M+i) = s(i) s(N-M+i) e^{j2\Delta\theta} \quad (10)$$

两边取相位,得

$$\begin{aligned} &\text{angle}(r(i) r(N-M+i)) \\ &= \text{angle}(s(i) s(N-M+i) e^{j2\Delta\theta}) \\ &= \text{angle}(s(i) s(N-M+i)) + 2\Delta\theta = 2\Delta\theta \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{所以, } \Delta\theta = \frac{1}{2} \text{angle}(r(i) r(N-M+i)) \quad (12)$$

对一个符号内的 M 对共轭码进行相位估计,可把式(12)进一步变形,得

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} \text{angle} \left(\sum_{i=0}^{M-1} r(i)r(N-M+i) \right) \quad (13)$$

利用式(13)对每个符号估计一次相位偏差,然后依次进入环路滤波器进行平滑噪声处理,其结果分 $\cos$ 与 $\sin$ 两路构成 $e^{j-\Delta\theta}$ 在频域与接收数据相乘来对其进行反馈纠正. 频域补偿仅适用于归一化频偏很小的情况. 若归一化频偏较大,时域补偿是比较好的方法,可以只在时域进行纠正或者时域加频域联合纠正. 根据相位偏差反推出归一化频偏并在 FFT 前根据式(5)相应的进行相位线性旋转相乘操作.

4 仿真结果

为检验算法的性能,设计一正交频分复用基带系统:100个有用信息子载波,12个导频子载波,32QAM和128点FFT,信道编码是RS(31,27)码.帧长64个OFDM符号,包括一个空符号和一个PN序列,循环前缀长度为37.本系统在加性高斯白噪声下对算法性能进行研究.

4.1 系统 PAPR 性能仿真

图2所示为本系统12个导频选用未知共轭码及传统已知固定数据的OFDM信号功率累积分布曲线(CCDF),它反映了信号峰均比大于一定门限的概率.从图中可看出使用共轭子载波对降低系统峰均比有一定效果,在大于一定门限概率为 10^{-4} 时,可将峰

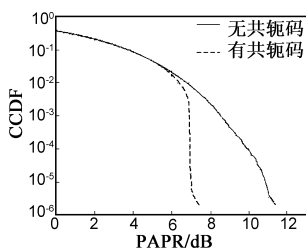


图2 CCDF曲线

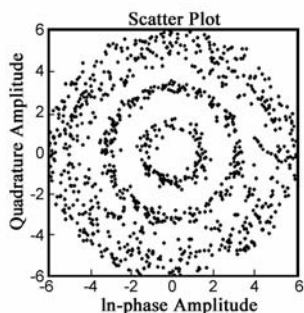


图3 跟踪前

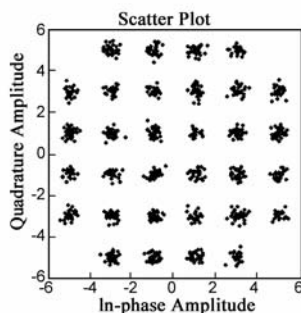


图4 跟踪后

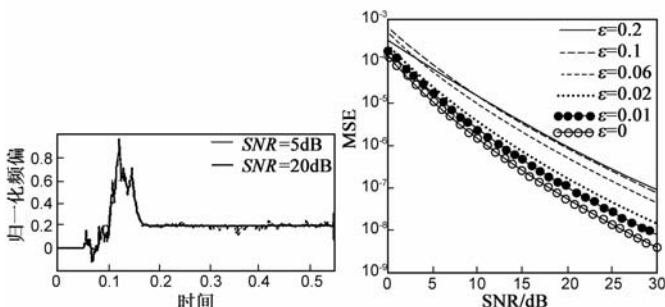


图5 收敛抖动情况

图6 均方误差曲线

均功率比降低约3dB.

4.2 载波频率跟踪性能仿真

为减小系统复杂度,这里我们采用只在时域纠正来进行跟踪,仿真时适当设置环路滤波器增益因子.图3和图4所示为25dB、归一化频偏0.02条件下跟踪前后星座图.从图中可以看出未采用频率跟踪算法时,OFDM符号的子载波受到ICI影响,星座点产生弥散,且所有符号受频偏影响其相位偏差随符号序号线性增加,从而弥散的星座点不断旋转,形成圆环.经过频率跟踪,消除了频偏的影响,弥散的圆环恢复成正确的32QAM星座点.

图5所示为归一化频偏0.02,不同信噪比下,本跟踪法收敛抖动情况比较.可以看到,在5dB的低信噪比下,环路稳定后收敛抖动仍比较小,跟踪稳定性较好.图6所示为不同归一化频偏下,跟踪后剩余频偏的均方误差曲线.可以看出,无论频偏较大还是较小,跟踪精度都比较高.20dB频偏0.02时,MSE可达 10^{-7} 量级.

5 结论

本文提出一种适用于MQAM-OFDM系统的基于共轭码的频率跟踪方法,既可以对载波频率偏差能够进行有效的跟踪,又使系统PAPR降低.在频域将MQAM映射值取共轭并插入其中组成一个符号进行IFFT,通过相位抵消有效的减小系统峰值功率来降低峰均比.同时利用符号共轭关系估计相位偏移从而得到归一化频偏并在时域或频域进行跟踪.结果表明只在时域纠正即可获得很好的性能,信噪比20dB、归一化频偏0.02时,均方误差为 1.0×10^{-7} ,同时可使系统PAPR降低若干dB.

参考文献:

- [1] 佟学俭,罗涛. OFDM移动通信技术原理与应用(第一版)[M]. 北京:人民邮电出版社,2003,6:1-82.
- [2] Moose P H. A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction[J]. IEEE Trans on Communications, 1994, 42(10): 2908-2914.
- [3] Zhenhong L, Mammela A. An all-digital frequency synchronization scheme for OFDM systems[A]. Proceedings of 8th IEEE Int Symp Personal, Indoor and Mobile Radio Communications [C]. Piscataway, Nj, USA: IEEE, 1997. 327-331.
- [4] Luise M, Reggiannini R. Carrier frequency acquisition and tracking for OFDM systems[J]. IEEE Trans on Communications, 1996, 44(11): 1590-1598.
- [5] Xiaodong L, Ritcey J A. Maximum-likelihood estimation of OFDM carrier frequency offset for fading channels[A]. Proceedings of 31st Asilomar Conf Signals, Systems and Computers[C]. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Comp Soc, 1997. 57-

61.

- [6] 吴虹,袁佳杰,等.一种低复杂度的无导频 OFDM 系统载波频率偏移的同步方法[J].电子学报,2007,35(7):1357 – 1359.

Wu Hong, Yuan Jia-jie, et al. A low-complex and non-pilot-aided carrier frequency offset synchronization method for OFDM systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(7): 1357 – 1359. (in Chinese)

- [7] 吴虹,梁裕民,等.特高频/甚高频频段 OFDM 系统同步技术的算法改进及仿真[J].电子学报,2007,35(12):2384 – 2388.

Wu Hong, Liang Yu-min, et al. Algorithm improvement and simulation of synchronization technology of OFDM system within VHF/UHF frequency band[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(12): 2384 – 2388. (in Chinese)

- [8] Wang L, Cao Y. Sub-optimum PTS for PAPR reduction of OFDM signals[J]. Electronics Letters, 2008, 44(15): 921 – 922.

- [9] Seung Hee Han Jae Hong Lee. Modified selected mapping technique for PAPR reduction of coded OFDM signal[J]. IEEE Trans. on Broadcasting, 2004, 50(3): 335 – 341.

- [10] Zhao Y, Haggman S G. Sensitivity to Doppler shift and carrier frequency errors in OFDM systems-The consequences and solutions[A]. In Proc. IEEE 46th Vehicular Technology Conf. [C]. Atlanta, GA, Apr. 28 – May 1, 1996: 1564 – 1568.

- [11] Van de Beek J J, Sandell M, Borjesson P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems[J]. IEEE Trans

on Signal Processing, 1997, 45(7): 1800 – 1805.

- [12] 秦升平,尹长川,等.一种新的 OFDM 系统载波频率偏移估计和跟踪方案[J].电子与信息学报,2006,26(10): 1569 – 1574.

Qin Sheng-ping, Yin Chang-chuan, et al. A novel carrier frequency offset estimation and tracking scheme for OFDM[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2006, 26(10): 1569 – 1574. (in Chinese)

作者简介:



戈立军 男,1984年生,天津人,博士,南开大学,研究方向为 OFDM 及 MB-OFDM-UWB 系统同步技术.

E-mail: nankaixuezi@mail.nankai.edu.cn



吴虹 女,1967年生,天津人,教授,博导,南开大学,研究方向为无线通信技术.

E-mail: wuhong@nankai.edu.cn