

时频联合处理抑制 OFDM 系统子载波间干扰

陈微微,黄学军,朱洪波

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏南京 210003)

摘要:针对 OFDM 系统对频率偏移的敏感性,采用时频联合处理的方法,结合频域部分响应和时域加窗,减小子载波频域拖尾。采用载波干扰比(CIR)来分析时频联合处理对子载波间干扰(ICI)的影响,并且推导多子载波频域部分响应的加权系数。计算机仿真表明,只要选择适当的部分响应方式和窗形,就能加快信号频谱旁瓣衰落,从而提高 CIR,改善系统的误比特率。并且,参与部分响应子载波数越多,系统性能越好。

关键词:OFDM;频率偏移;子载波间干扰;部分响应;加窗

中图分类号:TN911.3 文献标识码:A 文章编号:1673-5439(2012)02-0019-05

Reduction of Inter-Carrier Interference in OFDM System by Time-frequency Domain Signal Processing

CHEN Wei-wei, HUANG Xue-jun, ZHU Hong-bo

(College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to reduce the sensitivity to frequency offset in OFDM system, this paper proposes a joint time-frequency scheme, in which frequency-domain partial response coding(PRC) and time-domain windowing technologies are combined to shape the system spectrum. The performance of the carrier-to-interference power ratio (CIR) is analyzed and the optimum weights for PRC are derived. Simulation results show that the proposed scheme accelerates the decline of the spectrum tails, and increases the CIR power, therefore improves the error bits ratio performance. Moreover, the more sub-carriers used in PRC, the better system performance achieved.

Key words: OFDM; frequency offset; Inter-Carrier Interference; partial response coding; windowing

0 引言

OFDM 系统载波频偏破坏子载波间的正交性,产生子载波间干扰(ICI),导致 OFDM 系统性能下降。抑制载波频偏对 OFDM 系统性能的影响是 OFDM 系统设计要解决的关键技术问题^[1-2]。最直接的思路是在接收端进行载波频偏估计和补偿,以保持子载波间的正交性。这种方法受频偏估计精度的限制,同时需要发送训练序列用于频偏估计,降低了系统的传输效率^[3-4]。通过在发送端对 OFDM 信号进行处理,减小每个子载波频域拖尾,在载波频偏时降低信号 ICI,有效地降低载波频偏对 OFDM 系

统性能的影响。文献[5-6]提出对 OFDM 信号时域加窗,减小每个子载波频域的拖尾,以降低 OFDM 对频偏的敏感。文献[7]设计了使信号频率特性平稳的窗形的一般形式。文献[8-9]提出在频域引入部分响应,通过频域信号之间的相关编码,减小每个子载波频域的拖尾。

论文首先采用文献[8-9]的方法,引入多子载波的频域部分响应。然后将频域部分响应算法与时域加窗设计相结合,采用优化的时频域联合处理来进一步减小各子载波的频域拖尾,以降低 ICI。同时文中对系统性能进行了理论分析和仿真,研究表明只要选择适当的部分响应方式和窗形,就能加快信

收稿日期:2011-10-21

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2007CB310600)、江苏省博士后基金(0902026C)资助项目

通讯作者:黄学军 电话:13851607984 E-mail:huangxj@njupt.edu.cn

号频谱旁瓣衰落,从而抑制ICI。并且随着参与部分响应子载波数的增加,这种抑制作用也逐渐增强,有效降低OFDM系统对频率偏移的敏感性。

1 系统模型

一个OFDM系统,假设要传输的信号为 $a_k \in [1, -1]$,经OFDM调制后,发送的OFDM信号可表示为^[10]:

$$s_k(t) = \sum_{l=0}^{N-1} a_l e^{j2\pi f_l t} \quad (1)$$

其中, N 为子载波数, f_l 为第 l 个子载波的频率,满足 $f_l = f_0 + \frac{l}{T_b}$, T_b 为 a_k 码元间隔。因此,任意两个子载波频率间隔满足 $f_k - f_m = \frac{k-m}{T_b}$,保证了子载波之间的正交性。

在接收端,假设存在载波频偏,用 Δf 表示,则经OFDM解调得到第 k 个接收信号为:

$$\begin{aligned} r_k(t) &= \int_0^T \exp(j2\pi\Delta ft) \sum_{l=0}^{N-1} a_l \exp(j2\pi f_l t) \exp(-j2\pi f_k t) dt \\ &= a_k \int_0^T \exp(j2\pi\Delta ft) dt + \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} a_l \int_0^T \exp[j2\pi(f_l - f_k + \Delta f)t] dt \\ &= a_k s_1(0) + \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} a_l s_1(l-k) \\ &= w_k + I_k \end{aligned} \quad (2)$$

其中, T 为OFDM信号时长, $s_1(l-k) = \int_0^T \exp\{j2\pi[f_l - f_k + \Delta f]t\} dt$, w_k 为解调信号, I_k 为子载波间干扰。

由式(2)中 I_k 可见,载波频偏破坏了子载波间的正交性,产生ICI。若能降低 I_k ,就能降低OFDM对频偏的敏感性,有效改善系统性能。本文研究时频联合处理抑制ICI的方法,首先对传输信号 a_k 相关编码得到 b_k ,引入子载波间频域部分响应,然后对OFDM调制后的信号进行时域加窗。采用时频联合处理后的OFDM信号可表示为:

$$s_k(t) = \sum_{l=0}^{N-1} b_l p(t) e^{j2\pi f_l t}, b_k = \sum_{i=0}^{n-1} c_i a_{k-i} \quad (3)$$

其中, n 表示采用部分响应的子载波数, $C_n = [c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n-1}]$ 为相关编码系数且 $\sum_{i=0}^{n-1} c_i^2 = 1$ 。 $p(t)$ 为

时域窗函数,采用文献[5]中改进的升余弦窗(BTRC),它的脉冲响应函数为:

$$P_{\text{btrc}}(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq |t - T/2| \leq T(1-\alpha)/2 \\ \exp\{[(-2\ln 2)/\alpha T] * [t - (1-\alpha)T/2]\} & T(1-\alpha)/2 \leq |t - T/2| \leq T/2 \\ 1 - \exp\{[(-2\ln 2)/\alpha T] * [T(1+\alpha)/2 - t]\} & T/2 \leq |t - T/2| \leq T(1-\alpha)/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, α 为滚降系数。值得注意的是,式(4)没有考虑窗函数对保护间隔的影响,因为本文主要研究OFDM的频偏问题,式(2)中假设了OFDM信号间无干扰。因此,第 k 个接收信号为:

$$\begin{aligned} r_k &= \int_0^T \exp(j2\pi\Delta ft) \sum_{l=0}^{N-1} b_l p(t) \exp(j2\pi f_l t) \exp(-j2\pi f_k t) dt \\ &= b_k s_2(0) + \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} b_l s_2(l-k) \\ &= c_k + I_k \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $s_2(l-k) = \int_0^T p(t) \exp\{j2\pi[f_l - f_k + \Delta f]t\} dt$ 。

2 实现算法和性能分析

本节采用载波干扰比(CIR)来分析时频联合处理对子载波间干扰(ICI)的影响,并且通过优化CIR推导多子载波频域部分响应的加权系数 C_n 。

由式(5)得到CIR的表达式为:

$$\text{CIR} = \frac{E[(w_k)^2]}{E[(I_k)^2]} \quad (6)$$

其中,有用信号功率为:

$$E[(w_k)^2] = E[(b_k)^2] [P(\Delta f)]^2 \quad (7)$$

子载波间干扰功率为:

$$\begin{aligned} P_{\text{ICI}} &= E[(I_k)^2] \\ &= \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^{N-1} b_l b_m P(f_l - f_k + \Delta f) P(f_m - f_k + \Delta f) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $P(f)$ 表示采用的窗函数的频谱。传统OFDM信号, $b_k = a_k$,时域窗函数为矩形窗,它的频谱为:

$$P_r(f) = \text{sinc}(fT) \quad (9)$$

因此,传统OFDM的载干比为:

$$\text{CIR} = \frac{E[(a_k)^2] P^2(\Delta f)}{\sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} P^2(f_l - f_k + \Delta f) E[(a_k)^2]}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{P_r^2(\Delta f)}{\sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} P_r^2(f_l - f_k + \Delta f)} \\
 &= \frac{\text{sinc}(\pi \Delta f)}{\sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} s^2(l - k)} \quad (10)
 \end{aligned}$$

本文采用的 BTRC 窗,它的频谱为:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{btrc}}(f) &= \text{sinc}(fT) \frac{1}{(\pi \alpha f T / \ln 2)^2 + 1} \cdot \\
 &[2\pi \alpha f T \sin(\pi \alpha f T) / \ln 2 + 2 \cos(\pi \alpha f T) - 1] \quad (11)
 \end{aligned}$$

观察式(11)可见,采用的 BTRC 窗后 OFDM 信号频谱拖尾以 f^{-3} 衰减,相比传统 OFDM 信号频谱拖尾以 f^{-1} 衰减,可见 $|P_{\text{btrc}}(f_l - f_k + \Delta f)| < |P_r(f_l - f_k + \Delta f)|$,说明时域加窗能有效降低 ICI,改善系统性能。

进一步分析时频联合处理 OFDM 系统,结合式(5),式(8)可重写为:

$$P_{\text{ICI}} = \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^{N-1} s_2(l - k) s_2^*(m - k) E(b_l b_m) \quad (12)$$

$$E[a_k a_l] = \begin{cases} E[(a_k)^2], & l = k, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \text{因此 } E[b_k b_l] =$$

$$\sum_{i=p}^{N-1} c_{i-p} c_i E[(a_k)^2], l = k \pm p, p = 0, 1, \dots, n - 1.$$

$$P_{\text{ICI}} = \sum_{i=0}^{N-1} c_i^2 \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} s^2(l - k) E(a_k^2) + 2 \sum_{p=1}^{n-1} \sum_{i=p}^{n-1} c_{i-p} c_i \cdot$$

$$\left[\sum_{\substack{l=0 \\ l \neq p}}^{N-1} (s(l - k) s^*(l - p - k)) \right] E[(a_k)^2]$$

$$= I_{\text{OFDM}} + I_{\text{PRC}} \quad (13)$$

观察式(13),第一部分 I_{OFDM} 类似传统 OFDM 的子载波间干扰,只是由于引入了时域加窗, $s(l - k)$ 的形式发生了变化。第二部分体现了多载波频域部分响应对系统性能的影响,只要取适当的相关编码系数 $\mathbf{C}_n = [c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n-1}]$,就可以使得 I_{PRC} 为负值,减小 ICI 功率。

因此,时频联合处理 OFDM 系统的载干比为:

$$\text{CIR} = \frac{P_{\text{btrc}}^2(\Delta f)}{\sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} P_{\text{btrc}}^2(f_l - f_k + \Delta f) + I_{\text{PRC}}} \quad (14)$$

从式(14)可以看出本文研究的系统 CIR 性能改善主要有两方面原因,一方面时域加窗使得载干比减小,另一方面,多载波频域部分响应能额外降低 ICI。

下面推导多子载波频域部分响应的加权系数 \mathbf{C}_n 。为了简化并且不失一般性,假设 $k = 0$,并且,因为 $s(l - k)$ 为周期函数,由式(13)得到:

$$I_{\text{PRC}} = \sum_{p=1}^{n-1} \sum_{i=p}^{n-1} c_{i-p} c_i \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq p}}^{N-1} [s(l) s^*(l - p)] E[(a_k)^2] \quad (15)$$

利用文献[10]中式(11)、(12)推导得到:

$$I_{\text{PRC}} = 16 \int_0^{1/T} P(f) \cos^2(3\pi \Delta f T / 2) / \pi^2 \sum_{p=1}^{n-1} \sum_{i=p}^{n-1} c_{i-p} c_i \frac{1}{p^2} df \quad (16)$$

观察式(15),要求得 I_{PRC} 的最小值,只要求得

$$\min(\mathbf{C}_n) = \min\left(\sum_{p=1}^{n-1} \sum_{i=p}^{n-1} c_{i-p} c_i \frac{1}{p^2}\right) = \min(\mathbf{C}_n \mathbf{R}_n \mathbf{C}_n^T) \quad (17)$$

其中,

$$\mathbf{R}_n = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{8} & \dots & \frac{1}{2(n-1)^2} \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & \dots & \frac{1}{2(n-2)^2} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{2} & 0 & \dots & \frac{1}{2(n-3)^2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{2(n-1)^2} & \frac{1}{2(n-2)^2} & \frac{1}{2(n-3)^2} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

可见,使得 ICI 最小的相关编码加权系数 \mathbf{C}_n 的取值为实对称矩阵 \mathbf{R}_n 的最小特征值所对应的特征向量。

例如:

$$\mathbf{C}_n = \begin{cases} [0.707 \ 1, -0.707 \ 1] & n=2 \\ [-0.477 \ 5, 0.737 \ 6, -0.477 \ 5] & n=3 \\ [-0.350 \ 1, 0.614 \ 4, -0.614 \ 4, 0.350 \ 1] & n=4 \\ [0.266 \ 6, -0.506 \ 2, 0.587 \ 6, -0.506 \ 2, 0.266 \ 6] & n=5 \end{cases}$$

$$\min(\mathbf{C}_n) = \begin{cases} -0.5 & n=2 \\ -0.647 \ 4 & n=3 \\ -0.701 \ 3 & n=4 \\ -0.768 \ 5 & n=5 \end{cases} \quad (18)$$

观察式(18)发现在取得最佳的相关编码系数 \mathbf{C}_n 时,能使 I_{PRC} 为负值,从而使式(13)中 ICI 功率减小,并且,频域部分响应子载波数越多,ICI 越小,系统性能更好。

3 仿真结果

利用计算机仿真比较传统 OFDM 以及时频联

合处理 OFDM 系统。假设有 200 个子载波,每个子载波有 1 000 个码元,FFT 点数为 512,BTRC 窗滚降系数为 0.5。

图 1、图 2 分别是传统 OFDM 系统和时频联合处理的 OFDM 系统(两个子载波部分响应)的频谱图。实际上整个 OFDM 信号的频谱是各个子载波频谱叠加的总和,因此只要观察整体频谱就能看出每个子载波信号的旁瓣衰落情况。比较图 1、图 2 发现,采用时频联合处理的 OFDM 信号的旁瓣衰落明显加快,必然能抑制 ICI,降低系统对频偏的敏感性。

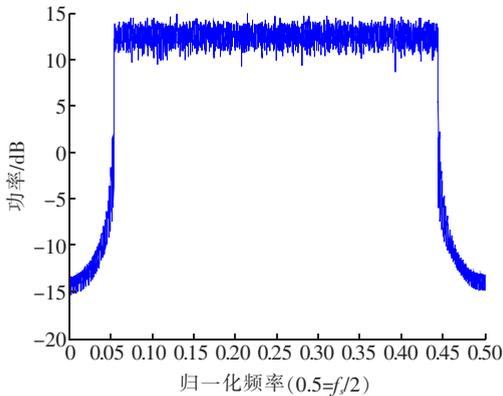


图 1 传统 OFDM 系统频谱

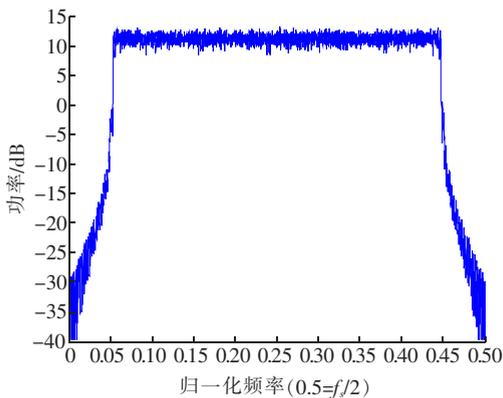


图 2 时频联合处理 OFDM 系统信号频谱

图 3 比较了传统 OFDM 系统和时频域联合处理系统的载干比特性。观察图 3 发现,传统 OFDM 系统在不同的频偏下,CIR 最低,采用本文研究的时频域联合处理的 OFDM 系统载干比有明显提升,再一次证明了时频域联合处理的优势。同时,随着频域部分响应子载波个数(即部分响应级数 n)的增加,CIR 逐渐变大。假设要求载干比保持 20 dB 以上,传统 OFDM 系统允许的最大频率偏移量为 7%,二至五级频域部分响应的时频联合处理系统允许的最大频偏量分别为 16%、19%、20% 和 25%,性能明显提升。但值得注意的是,频域部分响应子载波数增加,计算的复杂度也将随之增加,在实际的运用中可

以根据不同需要在系统性能和计算复杂度上折中。

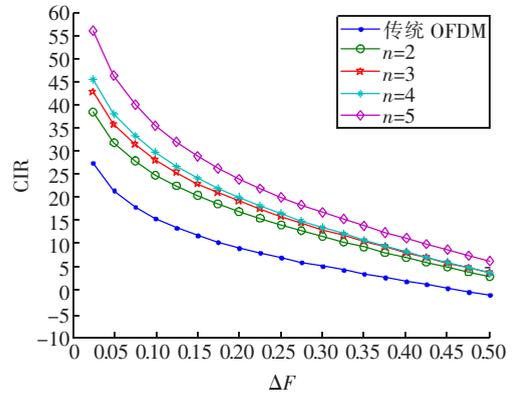


图 3 载干比(CIR)比较(n 表示部分响应级数)

图 4 通过计算机仿真,比较了传统 OFDM 与本文时频联合处理的系统误比特率。部分响应编码会导致错误传播,克服误码扩散常用的方法有两种:一是在发送端引入差分预编码,二是在接收端采用维特比译码的方法^[11]。对本文中 $n=1$ 的情况下,预编码可以采用差分编码实现。但对于多信号间的部分响应($n>1$ 的情况),预编码很难实现。因此本文采用文献[12]的方法,在接收端设计了维特比译码器,对 OFDM 解调后的信号进行维特比译码,以消除频域部分响应编码导致的错误传播。

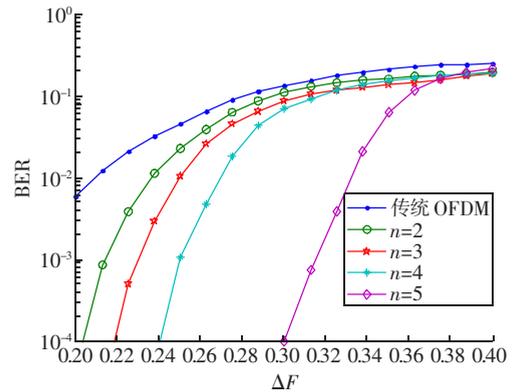


图 4 误比特率比较

观察图 4 发现,假设要求误比特率数量级为 10^{-2} ,传统 OFDM 系统允许的最大频率偏移量为 21%,而二至五级频域部分响应的时频联合处理系统允许的最大频率偏移量分别为 24%、25%、27% 和 33%,性能有很大程度的改善。由图 3、图 4 表明,无论是数值计算还是计算机仿真都证明本文采用的时频域联合处理方式能有效抑制 OFDM 系统的 ICI,降低系统对频偏的敏感性。

4 结论

本文针对 OFDM 系统对频率偏移的敏感性,采

用时频联合处理的方法,结合频域部分响应和时域加窗,达到抑制子载波间干扰(ICI)的目的。文章采用载波干扰比(CIR)分析时频联合处理对ICI的影响,并且推导了多子载波频域部分响应的加权系数。无论是数值计算还是计算机仿真都证明本文采用的时频域联合处理方式能有效抑制OFDM系统的ICI,降低系统对频偏的敏感性。并且,参与部分响应子载波数越多,系统性能越好。

参考文献:

- [1] POLLET T, BLADEL M V, MOENECLAHEY M. BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and wiener phase noise [J]. IEEE Trans on Commun, 1995, 43(2/4): 191 - 193.
- [2] MOOSE P H. A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction [J]. IEEE Trans on Commun, 1994, 42(10): 2908 - 2914.
- [3] ZHAO Yuping. BER Analysis of OFDM Communication Systems with Inter-carrier Interference [C] // International Conference on Communication Technology. Beijing, 1998: 22 - 24.
- [4] AHN J, LEE H S. Frequency domain equalization of OFDM signal over frequency nonselective Rayleigh fading channels [J]. Electron Lett, 1993, 29(16): 1476 - 1477.
- [5] ARMSTRONG J. Analysis of new and existing methods of reducing inter-carrier interference due to carrier frequency offset in OFDM [J]. IEEE Trans on Commun, 1999, 47: 365 - 369.
- [6] TAN Peng, BEAULIEU N C. Reduced ICI in OFDM Systems Using the "Better Than" Raised-Cosine Pulse [J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(3): 135 - 137.
- [7] MAHAM B, JRUNGNES A. ICI reduction in OFDM by using maximally flat windowing [C] // IEEE International Conference on Signal Processing and Communications. 2007: 1039 - 1042.
- [8] ZHAO Yuping, LECLERCQ J D. Inter-carrier Interference Compression in OFDM Communication Systems by Using Correlative Coding [J]. IEEE Communications Letters, 1998, 2(8): 214 - 216.

- [9] JAYAKUMARI J, PILLAI S S. Interference Analysis of Partial Response Coded OFDM Signals [J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2008, 3(4): 363 - 367.
- [10] LI Y G, CIMINI L J. Bounds on the interchannel interference of OFDM in time-varying impairments communications [J]. IEEE Trans on Commun, 2001, 49: 401 - 404.
- [11] PROAKIS J G. Digital Communications [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001: 565 - 570.
- [12] FORNEY G D. Maximum-Likelihood Sequence Estimation of Digital Sequences in the Presence of Intersymbol Interference [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1972, 18(3): 363 - 378.

作者简介:



陈微微(1987 -),女,浙江嘉兴人。南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生。研究方向为移动通信与无线技术。

黄学军(1967 -),男,安徽天长人。南京邮电大学通信与信息工程学院副教授。主要研究方向为现代无线通信理论和技术。

朱洪波(1956 -),男,江苏扬州人。南京邮电大学副校长,物联网研究院院长,教授,博士生导师。主要研究方向为泛在无线通信与物联网技术、宽带无线通信、无线通信中的电磁兼容。

(本文责任编辑:胡长贵)