

联合子载波关闭与时域加窗降低 OFDM 系统 ICI

石成锋, 文 鸿, 任 松, 黎 彪

(湖南工业大学 计算机学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对 OFDM 系统的载波间干扰问题, 提出了一种关闭子载波联合时域加窗的解决方法, 并通过仿真比较了关闭子载波、时域加窗和关闭子载波联合时域加窗 3 种不同方法的功率谱密度、星座图和误码曲线。仿真结果表明, 通过关闭对应频段的子载波并选择合适的窗函数及滚降因子, 可以降低传输信号的带外能量辐射, 加快功率谱密度旁瓣衰减, 减小载波间的相互干扰, 有效降低 OFDM 对频率偏移的敏感性, 提高系统的误码性能。

关键词: OFDM; 关闭子载波; 时域加窗; ICI

中图分类号: TW761

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)03-0071-05

Joint Sub-Carrier Closure Combined with Time-Domain Windowing to Reduce ICI in OFDM System

SHI Chengfeng, WEN Hong, REN Song, LI Biao

(College of Computer Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the problem of the inter-carrier interference (ICI) found in OFDM system, a proposal has thus been made of sub-carriers closure combined with time-domain windowing, followed by a simulation comparison between the power spectral density, constellation diagram and bit error curves of three different methods of closed sub-carriers, time-domain windowing and sub-carrier closure combined time-domain windowing. The simulation results show that the closure of the corresponding band sub-carriers and the selection of the appropriate window function and the roll-off factors help to reduce the external energy radiation of transmission signals, speed up the sidelobe attenuation of the power spectral density, decrease the mutual interference between carriers, effectively reduce the sensitivity of OFDM to frequency offset, and improve the BER performance of the system.

Keywords: OFDM; sub-carrier closing; time-domain windowing; ICI

1 研究背景

正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 是一种特殊的多载波调制 (multi-

carrier modulation, MCM), 可以很好地抵抗无线信道的频率选择性衰落^[1], 抑制多径效应和窄带上的射频干扰。相对于单载波传输系统, OFDM 对频率偏差更加敏感。OFDM 系统的多载波特性和信道

收稿日期: 2017-12-27

基金项目: 湖南省教育厅开放基金资助项目 (15K035), 湖南工业大学研究生创新基金资助项目 (CX1604)

作者简介: 石成锋 (1990-), 男, 湖北黄冈人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为无线网络,

E-mail: 1271832937@qq.com

通信作者: 文 鸿 (1981-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事下一代宽带无线通信网络方面的教学与研究, E-mail: wenhhut@163.com

时变性决定了其对信道中子载波的正交性有严格要求,频率偏差会造成子载波间的干扰(inter-carrier interference, ICI)。同时,由于对频率偏差的敏感性,OFDM系统的定时抽样要求较高,增加了系统实现的难度。

如何减少频率偏差造成的载波间干扰引起了相关科研工作者的极大关注,并已经提出了如下相关解决方法:子载波间干扰自消除算法^[2]、时域加窗算法^[3]、均衡算法等^[4]。子载波间干扰自消除算法的思想是,在相邻的子载波间插入相反的数据符号信息,用于抵消相邻载波间的相互干扰,这种方法的缺陷是在信道信噪比较高的时候性能改善效果不够理想。时域加窗算法利用窗函数特性改善信号的频域特性,以减少子载波频谱带外能量辐射,进而达到降低子载波间干扰的目的^[5],但是这种方法的改善程度有限。均衡算法中引入了均衡算子,通过迫零法或者最小均方误差法降低载波间的相互干扰,但是该算法的复杂度较高,放大了噪声^[6]。

本文重点研究了关闭部分子载波联合时域加窗的方法以降低OFDM系统的载波间干扰,其中,窗函数选用升余弦窗函数。并且通过仿真比较了关闭子载波、时域加窗和联合子载波关闭与时域加窗3种不同方法的功率谱密度(power spectral density, PSD)、星座图、误码曲线,以验证联合关闭子载波与时域加窗方法的有效性,结果表明该方法可以加快旁瓣的衰减,减少带外能量辐射,降低ICI干扰。

2 联合子载波关闭与时域加窗的OFDM系统模型

图1所示为关闭子载波联合时域加窗的OFDM系统框图。

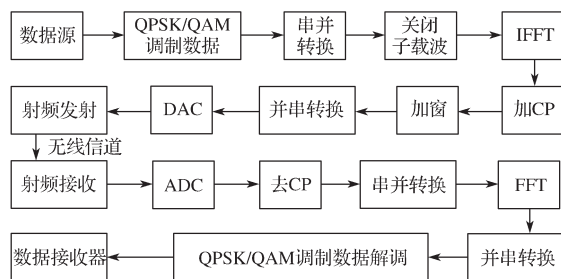


图1 关闭子载波联合时域加窗的OFDM系统框图

Fig. 1 Block diagram of OFDM system with closed sub-carriers combined with time-domain windowing

OFDM系统将传输信号的信道分成若干个正交子信道,基带信号经过调制后,将串行信号转换成

并行信号在信道中传输,并且通过逆快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)处理以保证信道间的正交性,加入循环前缀以使时延扩展小于保护间隔,减少多径衰落。之后,将并行的数据转换成串行数据,进行数模变换后传输到射频发送端,在接收端执行相反的过程即将信号解调出来。一个OFDM符号可以表示为

$$s(t) = \text{Re} \left[\sum_{i=0}^{N-1} d_i \text{rect} \left(t - \frac{T_s}{2} \right) \exp(j2\pi f_i t) \right], 0 \leq t \leq T_s. \quad (1)$$

式中: N 为子载波个数;

T_s 为每个OFDM符号的周期;

d_i 为第 i 个子通道上传送的符号;

f_i 为第 i 个子通道上的载波频率,且

$$f_i = f_0 + \frac{i}{T_s}, i = 0, 1, 2, \dots, N-1;$$

$\text{rect}(t)=1, |t| \leq T_s/2$, 表示矩形函数。

OFDM符号的传输对于正交性要求很高,子载波的正交性被破坏,会影响接收端的解调,造成载波间干扰。每个OFDM符号中都包含非零子载波信号,接收端会同时出现该OFDM符号的时延信号,因而在快速傅里叶变化(fast fourier transform, FFT)有延时的第二子载波之间的周期个数之差不再是整数,所以当接收机对第一子载波进行解调时,第二子载波会对此造成干扰。同理,当接收机对第二子载波进行解调时,会受到第一子载波的干扰^[7]。由于多径时延的存在,空闲的保护间隔进入FFT的积分时间内,导致积分时间内不能包含整数个波形,破坏了子载波间的正交性,造成ICI。待传输的无线信号经过信道编码交织后,接着经过16QAM(quadrature amplitude modulation)调制,关闭对应频段的子载波,经过IFFT处理后加入循环前缀,进一步保证了子载波间的正交性,降低了系统的子载波间干扰。但关闭太多子载波会影响系统的传输效率,故本研究选择关闭第180~190这10个子载波,保证在降低ICI的同时不影响系统的传输效率。

关闭子载波后,相邻的子载波旁瓣仍有能量辐射到已关闭的载波频段位置,因而关闭子载波降低ICI的程度是有限的^[8]。在A/D(analog to digital)转换之前引入窗函数能进一步加深频谱旁瓣的衰减程度,减少带外能量辐射造成的ICI。由于OFDM系统为多载波信号传输系统,其频谱分量很多,频谱特征复杂,选取升余弦窗作为窗函数,其频谱泄露和波动相对其他窗函数都较小^[9]。

将 IFFT 模块输出信号中的循环前缀抽样值插入传输的每个 OFDM 信号头部, 把循环后缀的取样值插入 OFDM 信号的尾部, 再将加入保护间隔序列的 OFDM 信号与升余弦窗函数相乘; 将得到的信号与前面所提的正交频分复用信号, 在 βT_s 时间区间内进行取样值叠加, 形成了待传输的信号, 选用的升余弦窗函数如下^[10]:

$$w(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 + \cos \frac{(t - T_s) \pi}{\beta T_s} \right], & 0 \leq t < \beta T_s; \\ 1, & \beta T_s \leq t < T_s; \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \frac{(t - T_s) \pi}{\beta T_s} \right], & T_s \leq t \leq (1 + \beta) T_s. \end{cases} \quad (2)$$

β 为升余弦窗函数的滚降系数, 不同的滚降系数会对系统产生不同的性能影响。一方面, β 取值越大, 功率谱密度的旁瓣衰减得越快, 子载波间的干扰越小; 另一方面, 滚降系数越大, 传输的 OFDM 信号插入的循环前缀和循环后缀的时间间隔越小, 这样会加大系统的时延扩展与码间串扰, 严重影响通信质量。故本研究选取 β 为 1/30。

在 t_0 时刻, 加入升余弦窗后 OFDM 信号的表达式为

$$s_k(t) = \text{Re} \left\{ w(t - t_0) \sum_{i=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} d_{i+N(k+0.5)} \cdot \exp \left[j 2 \pi \left(f_c - \frac{i+0.5}{T_s} \right) (t - t_0 - T_{\text{pre}}) \right] \right\}, \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_s + \beta T_s. \quad (3)$$

式中: T_{pre} 为循环前缀保护间隔;

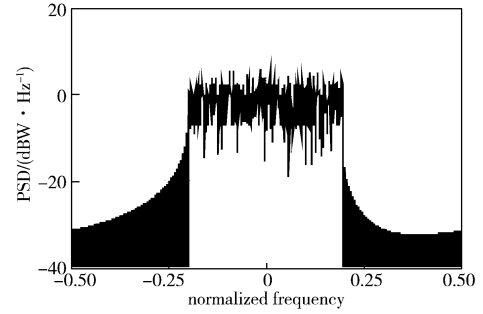
$T_s + \beta T_s$ 为加窗后的 OFDM 符号长度, 相邻的符号间有 βT_s 个符号重叠。

为了满足子载波间的正交性, 设定窗函数的 IFFT 在 $1/T_s$ 、 $2/T_s$ 等处的取值为零, 将窗函数与加入循环前缀的 OFDM 符号相乘, 滤除 $0 \sim t_0$ 阶段的信号频谱, 这样得到的 $s_k(t)$ 信号幅频特性更平坦, 旁瓣衰减进一步加快, 对其它子载波的能量辐射减少, 降低了 OFDM 系统载波间的干扰。

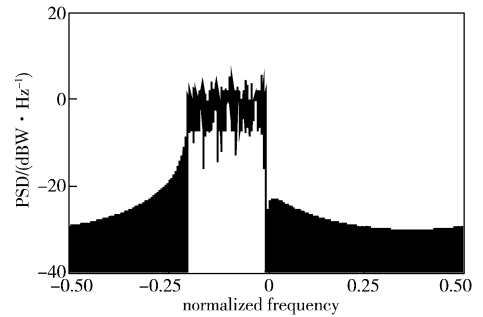
3 仿真与分析

以下通过仿真对 OFDM 信号进行分析, 设定 FFT 的点数为 512 个, 原始载波数为 500 个, 每个子载波所含的符号数为 50 个。本系统采用 16QAM 调制, 通过仿真得到 OFDM 系统信号的功率谱密度

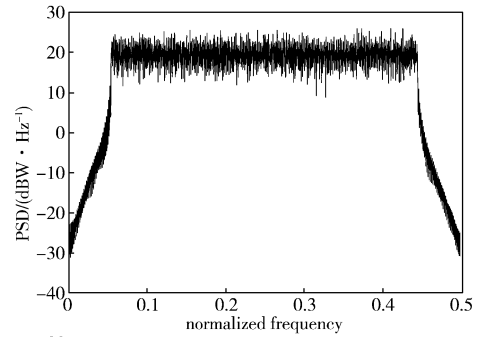
图, 如图 2 所示。其中, 图 2a 为未作处理的原始 OFDM 信号的功率密度, 图 2b 为关闭中心频率附近第 180~190 个子载波的信号功率谱密度, 图 2c 为加升余弦窗信号的功率谱密度, 图 2d 为关闭子载波联合时域加窗的信号功率谱密度。



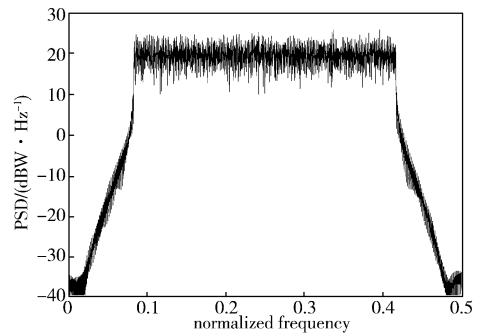
a) 原始信号



b) 关闭子载波



c) 加窗



d) 关闭子载波联合加窗

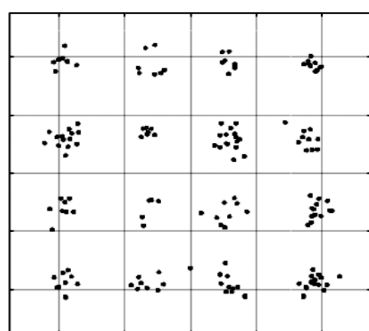
图 2 仿真所得 OFDM 信号的功率谱密度

Fig. 2 Power spectral density of the simulated OFDM signals

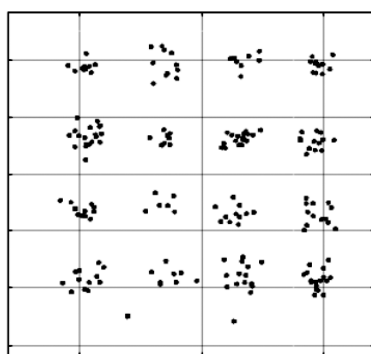
从图 2b 可知, 关闭第 180~190 这 10 个子载波

后, OFDM 信号频谱的主瓣和旁瓣宽度均变窄, 频谱旁瓣的衰减加快, 衰减幅度由 17 dBW/Hz 增加到 24 dBW/Hz, 衰减幅度变化较大, 说明图 2b 旁瓣的功率辐射比图 2a 小。从图 2c 可以看出, 加升余弦窗函数后, 旁瓣由主瓣的 20 dBW/Hz 下降到 -28 dBW/Hz, 较未加窗的衰减幅度有较大的提升。观察图 2d 可知, 关闭子载波联合时域加窗的旁瓣由 20 dBW/Hz 衰减到 -40 dBW/Hz, 相对于关闭子载波或加窗, 其边沿下降速度更快。以上分析说明, 采取关闭子载波联合时域加窗方法, 发射信号的带外功率辐射大幅度减小, 有效降低了系统 ICI。

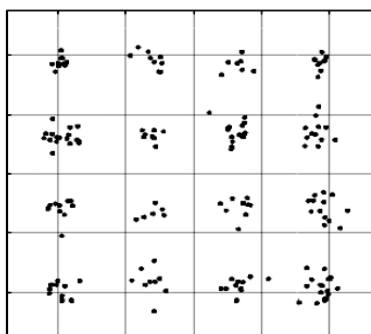
图 3 为 OFDM 系统信号的星座图, 其中, 图 3a 为未作改进的原始 OFDM 信号星座图, 图 3b 为关闭部分子载波的信号星座图, 图 3c 为加入升余弦窗的信号星座图, 图 3d 为关闭子载波联合时域加窗的信号星座图。



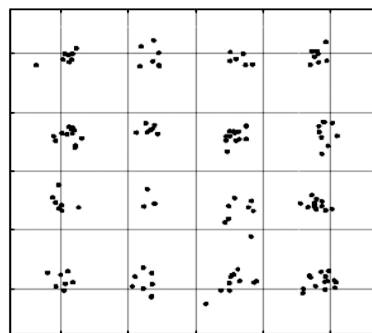
a) 原始信号



b) 关闭子载波



c) 加窗



d) 关闭子载波联合加窗

图 3 OFDM 系统信号的星座图

Fig. 3 OFDM system signal constellation

由图 3 所示星座图可以看出此时的系统性能, 在对应的点上, 图 2a 的星座图受噪声影响较大, 与理想情况下的矢量点偏离较远, 误码率也较高。图 2b 的星座点分布较为集中, 说明关闭子载波后系统性能有了一定改善。比较两图可以看出, 在相同的系统参数下, 关闭中心频率附近的子载波可以加快旁瓣的衰减, 降低系统中的 ICI。

从图 3c 和 3d 所示星座图可以看出, 图 3c 和 3d 较图 3a 和 3b 的星座点分布更为集中, 并且图 3d 比图 3c 的效果更好, 说明关闭子载波联合时域加窗方法比单独关闭子载波或者时域加窗使系统稳定性更高, 抗噪声能力更强。

图 4 为高斯加性白噪声信道下的系统误码曲线, 由图 4 可以很直观地看出信噪比 (signal-noise ratio, SNR) 和误码率 (bit error rate, BER) 之间的关系, 当单独关闭子载波或加窗后, 系统的误码率较之前的 OFDM 系统有了一定的改善。关闭子载波联合时域加窗后, 系统的误码性能有很大改善, 系统性能最好, 随着 SNR 的增加, 误码率进一步降低, 可见, 关闭子载波联合时域加窗可以很好地改善系统的信噪比和误码率问题。

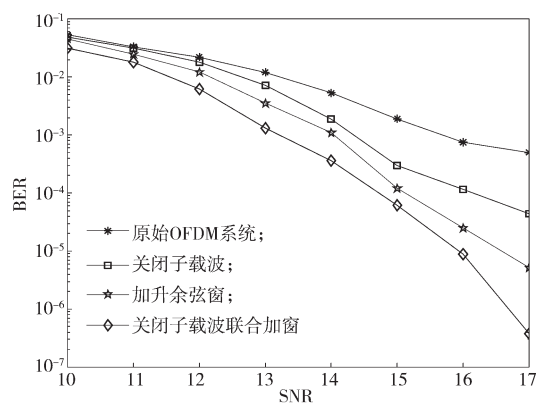


图 4 误码率和信噪比曲线

Fig. 4 Curves of the bit error rate and signal-to-interference ratios

4 结语

针对 OFDM 系统的子载波间干扰问题, 本文提出了一种关闭子载波联合时域加窗的解决方法, 以实现降低 OFDM 系统载波间干扰并改善系统误码性能的目标。

在串并变换之后关闭中心频率附近的 10 个子载波, 并经过 IFFT 处理、加循环前缀、加窗、并串转换、DAC, 最后将 OFDM 信号通过射频发射到无线信道中。且根据载波数和传输信道中的符号数等系统参数决定采用升余弦窗及其滚降系数。仿真研究表明, 关闭子载波联合时域加窗方法同单一的关闭子载波或时域加窗方法相比, 其效果更好, 能加大旁瓣的衰减, 系统的误码性能和稳定性也较好。且仿真结果验证了关闭子载波联合时域加窗函数能有效降低 OFDM 系统的 ICI。

参考文献:

- [1] 王 薇, 殷勤业, 穆鹏程. 高移动环境下利用无线信号空域特征实现 OFDM 系统的 ICI 消除 [J]. 通信学报, 2015, 36(8): 76-82.
WANG Wei, YIN Qinye, MU Pengcheng. Inter-Carrier Interference Cancellation Using Spatial Characteristics for High-Mobility OFDM Communication Systems[J]. Journal on Communications, 2015, 36(8): 76-82.
- [2] 郑刘娟. OFDM 系统中载波间干扰自消除算法研究 [J]. 信息通信, 2014(5): 16-17.
ZHENG-LIU Juan. Research on Self-Elimination Algorithm of Inter-Carrier Interference in OFDM Systems [J]. Information & Communications, 2014(5): 16-17.
- [3] 孙梦飞. 加窗技术对协同 OFDM 系统 ICI 性能的改进 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
SUN Mengfei. Windowing Technology Improves the ICI Performance of Cooperative OFDM System[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [4] 赵海军, 贺春林, 蒲 斌. OFDM 系统中基于状态空间模型的 ICI 抑制均衡算法 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2016, 38(6): 859-865.
ZHAO Haijun, HE Chunlin, PU Bin. An Equalization Algorithm Based on State Space Model for ICI Inhibition in OFDM System[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2016, 38(6): 859-865.
- [5] 邸 敬, 李翠然. 降低 OFDM 系统 ICI 间干扰的时域加窗算法 [J]. 自动化与仪器仪表, 2014(2): 128-130.
DI Jing, LI Cuiran. Time-Domain Windowing Algorithm to Reduce ICI in OFDM Systems[J]. Automation and Instrumentation, 2014(2): 128-130.
- [6] RAHMATALLAH Y, MOHAN S. Peak-to-Average Power Ratio Reduction in OFDM Systems: A Survey and Taxonomy[J]. IEEE Communs Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1567-1592.
- [7] WANG Y C, LUO Z Q. Optimized Iterative Clipping and Filtering for PAPR Reduction of OFDM Signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 9(1): 33-37.
- [8] LI Haibo, JIANG Tao, ZHOU Yang. An Improved Tone Reservation Scheme with Fast Convergence for PAPR Reduction in OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2011, 57(4): 902-906.
- [9] 黄 敏, 李兵兵. 基于整体最小二乘的联合信道估计及 OFDM 信号检测算法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1448-1453.
HUANG Min, LI Bingbing. Joint Channel Estimation and OFDM Signals Detection Based on Total Least Square[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(6): 1448-1453.
- [10] 于云昊, 穆晓敏, 杨守义, 等. 时域加窗算法降低 OFDM 系统 ICI 性能研究 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(19): 83-86.
YU Yunhao, MU Xiaomin, YANG Shouyi, et al. Research to Reduce OFDM System ICI Performance with Time-Domain Windowing Algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(19): 83-86.

(责任编辑: 廖友媛)