

文章编号:1671-6833(2011)03-0099-04

NC-OFDM 系统中加窗技术研究

杨守义, 孙晓延, 张延彬, 齐 林

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:在非连续 OFDM (NC-OFDM) 系统中, 授权用户会受到感知用户带外泄漏功率的干扰. 为了在保护授权用户通信性能的前提下高效利用机会频谱, 采用时域加窗的方法, 研究了不同窗函数下感知用户对授权用户的干扰问题, 分析了窗函数参数、授权用户频谱位置和频谱占用率等系统参数对加窗技术抑制带外干扰性能的影响, 并给出了 NC-OFDM 系统中最优窗的类型. 仿真结果表明: 针对不同的授权用户频谱位置和频谱占用率参数, 时域加窗的方法均可有效降低感知用户对授权用户的干扰.

关键词: NC-OFDM; 认知无线电; 加窗技术

中图分类号: TN919

文献标志码: A

0 引言

随着无线通信的飞速发展, 所需要的无线频谱资源越来越多, 当前频谱资源已显得越来越缺乏. 认知无线电提供了一种按伺机的方式共享和利用频谱的手段, 可以有效地解决这一问题^[1-2]. NC-OFDM 是认知无线电主要的数据传输方式, 它在传统 OFDM 基础上进行改进, 关闭处于激活状态的授权用户所对应的子载波, 感知用户利用非连续的空闲子载波进行通信. 因此, 在 NC-OFDM 系统中, 除了要考虑系统的自身性能要求外, 还要尽可能降低感知用户对带内授权用户的相对干扰功率.

文献[3]指出, 感知用户对授权用户的干扰是 NC-OFDM 系统中相互干扰的主要方面, 并提出采用加窗技术可以降低这种干扰. 文献[4]采用 Dolph-Chebyshev 窗有效降低了感知用户对授权用户的干扰, 但其缺点是牺牲了一定的子载波正交性, 尽管采用预处理可以改善这种现象, 却降低了频谱效率. 文献[5]采用 SOCW 窗抑制感知用户对授权用户的干扰, 但仅针对固定的授权用户频谱位置和占用率进行了研究. 而在实际的认知无线电系统中, 处于激活状态的授权用户所出现的位置是随机的, 且其频谱占用率可能随时间而变化, 因此笔者研究了在不同的授权用户频谱位置及频谱占用率下, 不同窗函数对感知用户旁

瓣干扰的抑制性能. 笔者首先给出了 5 种不同类型的 Nyquist 窗和加窗 NC-OFDM 信号的旁瓣泄漏对授权用户频带的干扰功率表达式, 通过仿真分析, 给出了不同授权用户频谱位置及频谱占用率下的干扰功率变化曲线, 并得出了 NC-OFDM 系统中最优窗的类型.

1 加窗 NC-OFDM 系统分析

1.1 加窗 NC-OFDM 符号模型

同 OFDM 系统类似, 在 NC-OFDM 系统中, 每个 NC-OFDM 符号亦由多个经过调制的子载波信号组合而成. 每个子载波在一个 NC-OFDM 符号周期内都包含整数倍个周期, 且相邻子载波间相差 1 个周期, 由此来满足子载波间的正交性. 假定一个 NC-OFDM 符号的宽度为 T_s , 包括 FFT 有效积分时间 T_u 和保护间隔 T_g , 而加窗后的 NC-OFDM 符号持续时间为 $(1 + \alpha)T_s$, α 为滚降因子. 因此允许相邻符号间在滚降部分有重叠, 其结构如图 1 所示.

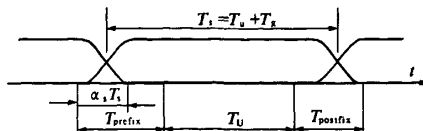


图 1 加窗后的 NC-OFDM 符号结构

Fig. 1 Structure of the windowed NC-OFDM signal

收稿日期:2010-12-10;修订日期:2011-02-16

基金项目:教育部重点研究资助项目(208083)

作者简介:杨守义(1965-),男,河南商丘人,郑州大学教授,博士生导师,研究方向为宽带无线通信,E-mail:iesyyang

@zzu.edu.cn.

图1中 T_{prefix} 为循环前缀,为得到与加窗前同等的对抗符号间干扰性能, T_{prefix} 必须延长,同时还需要一个循环后缀 T_{postfix} ,且 T_{postfix} 满足 $T_{\text{postfix}} > \alpha T_s$,以保证 NC-OFDM 符号内的正交性。

1.2 窗函数描述

为保持各子载波间的正交性,在 NC-OFDM 系统时域加窗时通常采用 Nyquist 窗,笔者采用了 RC 窗、BTRC 窗、SOCW 窗、Franks 窗和 Double-jump 窗 5 种 Nyquist 窗。其时域表示式见文献[5-8]。

在 5 种窗函数中,RC 窗、BTRC 窗和 SOCW 窗为连续滚降窗,Franks 窗和 Double-jump 窗为非连续滚降窗。当 $\alpha = 0$ 时,RC 窗、BTRC 窗、SOCW 窗、Franks 窗和 Double-jump 窗均退化为矩形窗。随着 α 的增大,窗函数边沿的过渡越平缓,其带外功率衰减速度越快,对干扰的抑制性能也越好。对窗函数的时域表达式进行傅里叶变换,即可得到窗函数的频域表达式。

1.3 NC-OFDM 信号对授权用户的干扰分析

感知用户对授权用户的干扰主要是由 NC-OFDM 信号的旁瓣造成的。由于每个 NC-OFDM 符号在其周期 T_s 内包含多个非零的子载波,每个子载波上传输的信号又可以看作是一个非归零矩形信号,因此每个 NC-OFDM 符号的频谱可以看作是周期为 T_s 的矩形脉冲的频谱与一组位于各个子载波频率上的 δ 函数的卷积。

每个子载波的功率谱密度表示如下^[9]:

$$P(f) = R_s |W(f)|^2 \quad (1)$$

式中: $R_s = 1/T_s$ 为符号速率; $W(f)$ 为窗函数的频谱。从式(1)中可以看出子载波的功率谱密度仅与符号速率和窗函数的频谱有关。

对于一个包含 N 个子载波的 OFDM 系统,其功率谱密度可表示如下:

$$\Phi_{\text{ofdm}}(f) = R_s \sum_{k=0}^{N-1} |W(f - k\Delta f)|^2 \quad (2)$$

式中: Δf 为相邻子载波的频率间隔。假定某时刻与授权用户占用频段相对应的子载波范围为 $[a, b]$,则感知用户对应的 NC-OFDM 信号功率谱密度表示为:

$$\Phi_{\text{nc-ofdm}}(f) = R_s \left[\sum_{k=0}^{a-1} |W(f - k\Delta f)|^2 + \sum_{k=b}^{N-1} |W(f - k\Delta f)|^2 \right] \quad (3)$$

因此,定义感知用户对授权用户的相对干扰功率为 $\Phi_{\text{nc-ofdm}}(f)$ 在授权用户频段 $[a, b]$ 上的积

分:

$$P_{R \rightarrow L} = \int_a^b \Phi_{\text{nc-ofdm}}(f) df \quad (4)$$

上式表明,授权频段越宽,即相对应的积分区间越大,干扰也越大,因此引入一个平均相对干扰功率“密度” $\bar{P}_{R \rightarrow L}$ 即将 $P_{R \rightarrow L}$ 对授权频谱带宽 A 做归一化:

$$\bar{P}_{R \rightarrow L} = \frac{1}{A} P_{R \rightarrow L} \quad (5)$$

2 仿真与分析

仿真中假定 NC-OFDM 系统总的子载波数为 N ,与授权用户对应的子载波范围为 $[a, b]$,频段占用率为 r ,则 $b = a + rN$ 。此时(5)式可重写为

$$\bar{P}_{R \rightarrow L} = \frac{1}{A} \int_a^{a+rN} R_s \left[\sum_{k=0}^{a-1} |W(f - k\Delta f)|^2 + \sum_{k=b}^{N-1} |W(f - k\Delta f)|^2 \right] df$$

可见,感知用户对授权用户的干扰与窗函数 $W(f)$ 、授权用户频谱位置 $[a, b]$ 和频谱占用率 r 等参数有关。所以,下面将通过仿真详细分析上述参数变化对干扰功率的影响。

2.1 授权频谱位置对干扰功率的影响

假设总子载波数为 $N = 128$,授权用户频谱占用率 $r = 10/128$ 。相对干扰功率 $P_{R \rightarrow L}$ 随 5 种 Nyquist 窗的滚降因子 α 的变化曲线如图 2(a)(b)(c)所示。图 2(a)(b)(c)中, $[a, b]$ 分别为 $[11, 20]$, $[60, 69]$, $[109, 118]$,对应频谱池的前端、中间和末端。

图 2 表明,在授权用户的频谱占用率一定的情况下,授权用户处于频谱池中间时,感知用户对授权用户的相对干扰功率要比授权用户处于两端时的相对干扰功率要大,其主要原因是感知用户与授权用户的距离越远,其在授权用户处的频谱旁瓣也就越小,当授权用户处于频谱池中间时,对其影响较大的频谱旁瓣要比处于两端时的多。

其次,对比图 2(a)、(b)、(c)还可以看出,授权用户的频谱位置仅对非连续滚降窗,如 Double-jump 窗和 Franks 窗下的相对干扰功率影响较大,而对连续滚降窗 RC 窗、SOCW 窗、BTRC 窗影响不大,这主要是因为非连续滚降窗的频谱旁瓣分布在一个很宽的频谱范围内,而连续滚降窗的频谱旁瓣则衰减速度很快。第三,从图 2(a)(b)(c)均可看出,随着窗函数滚降因子 α 的增加,RC 窗、SOCW 窗、BTRC 窗和 Franks 窗下的相对干扰功率均逐渐下降,只有 Double-jump 窗下的相对

干扰功率却不降反而有所上升,原因是随着 α 的增加,RC窗,BTRC窗,SOCW窗和Franks窗的旁瓣都有所减小,但Double-jump窗的旁瓣大小却有所增加,如图3(a)(b)所示。

最后,从图2还可看出,适当增大 α ,可大幅降低感知用户对授权用户的相对干扰功率,但是当 $\alpha > 0.2$ 时,再继续增大 α 相对干扰功率的下降速度则明显降低。考虑到随着 α 的增大,符号

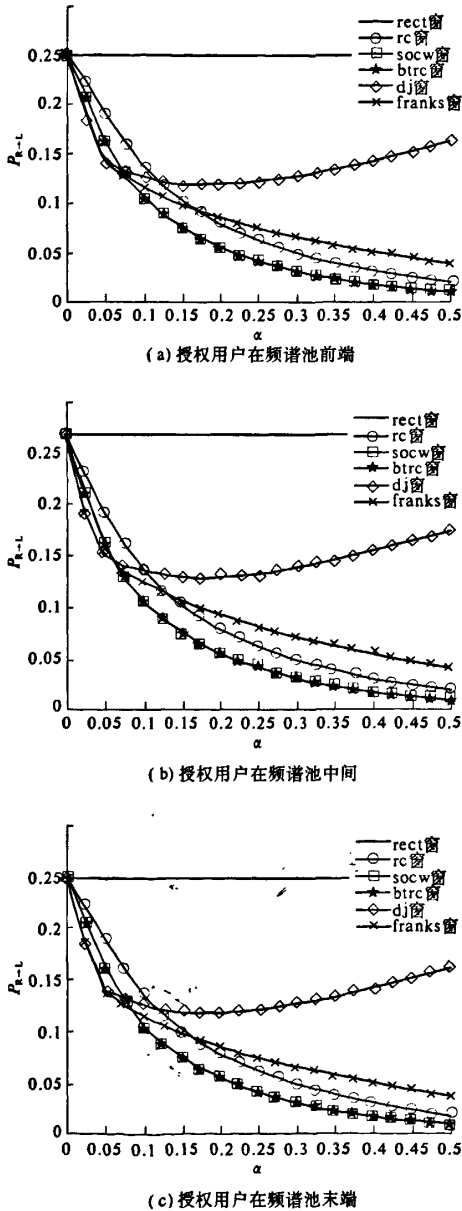
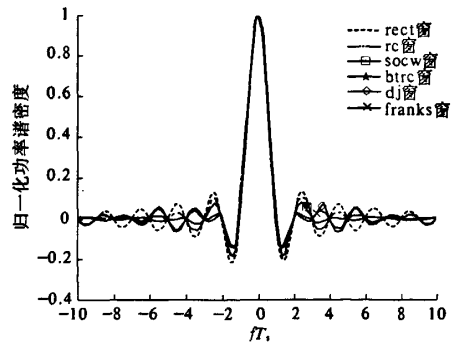
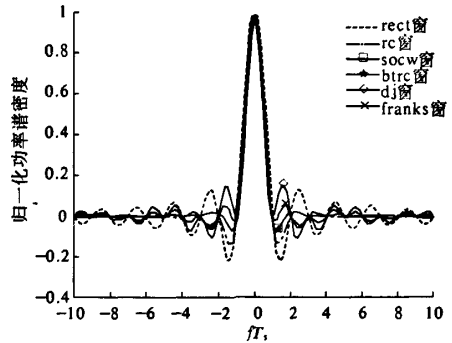


图2 授权用户频谱位置不同时 P_{R-L} 与滚降因子 α 的关系
Fig.2 Impact of α on P_{R-L} in different locations of the licensed users



(a) $\alpha=0.2$ 时5种窗函数的频谱



(b) $\alpha=0.5$ 时5种窗函数的频谱

图3 5种窗函数的频谱

Fig.3 The frequency spectra of five different window functions

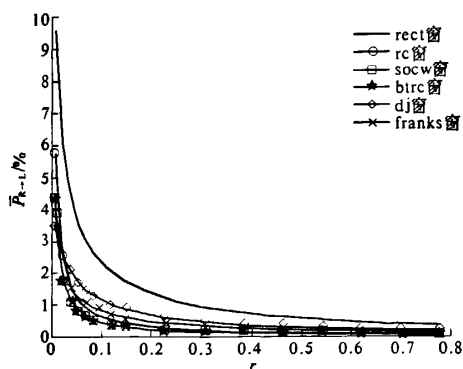
的保护间隔会相应地减小,将大大降低符号对时延扩展的容忍度。因此, α 的选择应折衷考虑。在下面的仿真中,选择 $\alpha=0.2$ 。

2.2 频谱池占用率对干扰功率的影响

5种窗函数下,平均相对干扰功率密度 \bar{P}_{R-L} 随授权用户频谱占用率 r 的变化曲线如图4所示。

由图4可见,频谱占用率 r 越大,则感知用户对授权用户的 \bar{P}_{R-L} 越小,这是因为, r 越大,说明处于激活状态的授权用户的频段越宽,感知用户能够使用的频段就越窄,其产生的干扰也就越小。结合图3(a)与图4可以看出,只有当授权用户的频谱占用率 r 很小,如 $r=1/128 \sim 2/128$ 时,第一旁瓣小的非连续滚降窗Double-jump窗和Franks窗的性能要优于第一旁瓣稍大的连续滚降窗RC窗、BTRC窗和SOCW窗,当授权用户的频谱占用率 r 增大时,则BTRC窗和SOCW窗的性能最优,RC窗次之,Franks窗和Double-jump窗的性能最差。这个结果同图2一致。

结合图2~4的仿真结果可以看出,当 $\alpha=0.2$ 时,Double-jump窗和Franks窗的第一旁瓣要

图4 5种窗函数下 \bar{P}_{R-L} 与 r 的关系Fig.4 Impact of r on \bar{P}_{R-L} with the employment of different window functions

小于RC窗、BTRC窗和SOCW窗,但这两种窗函数赋形下的相对干扰功率却大于RC窗、BTRC窗和SOCW窗。另外,当 $\alpha=0.5$ 时,Franks窗的第一旁瓣要小于RC窗的第一旁瓣,而 $\alpha>0.175$ 时,Franks窗下的相对干扰功率也大于RC窗。可见,感知用户对授权用户的相对干扰功率不仅与窗函数的第一旁瓣有关,还与其它旁瓣的衰减速度有关,因此在考虑NC-OFDM系统加窗时,应综合考虑窗函数的第一旁瓣与其他旁瓣的衰减速度。

3 结论

笔者研究了不同窗函数下NC-OFDM系统中感知用户对授权用户的干扰问题。仿真并分析了窗函数参数、授权用户频谱位置及频谱占用率等系统参数对加窗技术抑制干扰性能的影响。仿真结果表明,只有非连续滚降Nyquist窗对授权用户的频谱位置敏感,且最优窗函数参数的选择与授权用户频谱占用率有关。该结论对加窗NC-OFDM系统的参数设计有重要作用。此外,加窗技术与保

护载波相结合也能够进一步降低感知用户对授权用户的干扰,这还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] WEISS T, JONDRAL F. Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency [J]. Communications Magazine, 2004, 42 (3):8-14.
- [2] DEVROYE N, VU M, TAROKH V. Cognitive radio networks [J]. Signal Processing Magazine, 2008, 25 (6):12-23.
- [3] WEISS T, HILLENBRAND J, KROHN A, et al. Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems [C]//IEEE Vehicular Technology Conference. New York:IEEE press,2004:1873-1877.
- [4] SEYEDI A. Windowed OFDM for spectrum Agile Radios [C]//IEEE Global Telecommunications Conference. New York:IEEE press,2006:1-5.
- [5] YANG Ziyuan, ZHANG Haixia, YUAN Dongfengfeng, et al. A novel Nyquist window for OFDM-based cognitive radio systems [C]//The Third International conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-5.
- [6] FRANKS L. Further results on Nyquist's problem in pulse transmission [J]. IEEE Transaction on Communication Technology, 1968, 16(2):337-340.
- [7] MULLER - WEINFURTER S H. Optimum Nyquist windowing in OFDM receivers [J]. IEEE Transactions on communications, 2001, 49(3):417-420.
- [8] PENG Tan, BEAULIEU N C. Reduced ICI in OFDM system using the "Better Than" Raised - Cosine pulse [J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(3):135-137.
- [9] LIU C, LI F. Spectrum modelling of OFDM signals for WLAN [J]. Electronics Letters, 2004, 40(22):1431-1432.

The Research on Windowing in Non-continuous OFDM Systems

YANG Shou-yi, SUN Xiao-yan, ZHANG Yan-bin, QI Lin

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In non-continuous orthogonal frequency division multiplexing (NC-OFDM) system, the licensed users suffer out-of-band (OOB) interference from the rental users. In order to protect the licensed users' performance while efficiently exploiting the spectrum resources, a time-domain windowing techniques is suggested in studying the out-band interference of rental users under different windows, and the corresponding interference suppression performance is analyzed under the parameters of window functions, location and band occupancy of the licensed users. Moreover, the optimized window type is presented. The simulation results show that the time-domain windowing techniques can effectively reduce rental users' interference to the licensed users for different location and band occupancy of licensed users.

Key words: NC-OFDM; cognitive Radio; windowing technology