

# OFDM 系统中抑制带外泄漏的算法研究

程 韧, 冷娟华

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘 要:**主要讨论了 OFDM 系统中抑制其带外功率辐射的算法。OFDM 技术在无线环境下具有很高的频谱利用率和很强的抗多径干扰能力,但其带外功率辐射也是很大的。本文提出了一种基于加窗处理的算法,通过加入升余弦窗函数或者是 Blackman 窗函数,可以有效降低其带外功率辐射,且所带来的误比特率也没有较大的变化。

**关键词:**OFDM 系统;功率谱密度;保护间隔;升余弦窗函数

**中图分类号:**TN914.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)05-0054-03

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)系统,是一种并行的数据传输系统,由频率上等间隔的  $N$  个子载波所构成。每个子载波分别调制 1 路独立的数据信息,调制之后  $N$  个子载波的信号相加同时发送。通过选择载波间隔,使这些子载波在整个符号周期上保持频谱的正交特性,各子载波上的信号在频谱上相互重叠,而接收端利用子载波之间的正交特性,可以无失真的恢复出发送信号。近年来,OFDM 系统已经越来越得到人们的关注,其原因在于 OFDM 存在诸多的优点,如其频谱利用率较高,实现简单,并且具有抗窄带干扰的能力。目前,欧洲的 HIPERLAN/2 标准和 IEEE 的 802.11a 标准就采用了 OFDM 技术在 5 GHz 频段实现 54 Mbps 数据传输。在固定线路传输应用中,OFDM 也被 ADSL 和 HDSL 系统所采纳。由于 OFDM 系统可以有效的对抗时间扩散信道和窄带干扰的影响,因此 OFDM 也出现在一些电力线通信的研究当中。

## 1 OFDM 功率谱密度分析

在 OFDM 系统中,一个 OFDM 符号是包括多个经过调制的子载波的合成信号。其中,每个子载波都可以受到相移键控 (PSK) 或者是正交幅度调制 (QAM) 符号的调制,并且每个子载波之间满足正交性,即:

$$f_i = f_0 + i/T \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中,  $T$  表示 OFDM 符号的宽度,  $f_0$  是发送载波的基本频率。

取  $rect(t) = 1(0 \leq t \leq T)$ , 则从  $t=0$  开始的 OFDM 符号可表示为

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i rect(t) \exp(j2\pi f_i t) \quad (2)$$

OFDM 信号的功率谱密度  $S(f)$  为信号的自相关函数  $R(\lambda)$  的傅立叶变换,即:

$$S(f) = \int R(\lambda) e^{-j2\pi f \lambda} d\lambda \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} R(\lambda) &= E\{s(t+\lambda)s^*(t)\} = \\ &E\{rect(t+\lambda)rect(t)\} \sum_{i=0}^{N-1} E(|d_i|^2) \exp(j2\pi f_i \lambda) = \\ &\bar{R}(\lambda) \sum_{i=0}^{N-1} E(|d_i|^2) \exp(j2\pi f_i \lambda) \end{aligned} \quad (4)$$

收稿日期:2004-05-14

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:程 韧(1961-),女,陕西西安人,副教授,主要从事通信与信息处理技术研究。

这里,  $|d_i|^2 = 1$ ,  $\bar{R}(\lambda) = \frac{1}{T} \int_0^T \text{rect}(t + \lambda) \text{rect}^*(t) dt$ 。由于自相关函数的傅里叶变换就是信号的功率谱密度,将式(4) 带入式(3) 中,得到:

$$S(f) = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{N-1} \{S_a[\pi(f-f_i)T]\}^2 \tag{5}$$

图1 所示为子载波个数  $N = 64$  时,OFDM 信号的归一化的功率谱密度图。

从 OFDM 信号的功率谱密度图中可以看出,其带外功率谱密度衰减比较慢,即带外辐射功率比较大。因此,为了让带宽之外的功率谱密度下降的更快,则需要对 OFDM 符号采用“加窗”技术<sup>[1]</sup>。对 OFDM 符号“加窗”使符号周期边缘的幅度值逐渐过渡到零。根据时域相乘等效于频域卷积的原理,经过加窗的 OFDM 符号的频谱等于原始 OFDM 符号频谱与窗函数频谱的卷积,因此其带外频谱特性主要是由两者之间频谱宽度较大的信号来决定,也就是加入的窗函数的频谱来决定。因此,选择窗函数的原则就是:其频谱特性比较好,而且非恒定信号幅度部分也不能过长,避免对更多个时域采样信号造成影响。

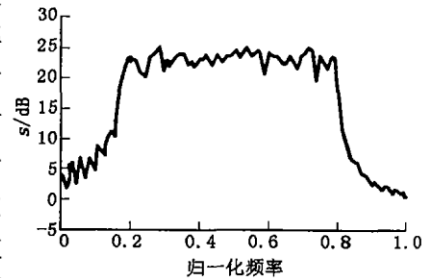


图1 OFDM 信号的功率谱密度图 ( $N = 64$ )

为了保证在接收端能够准确的恢复出原信号,在发送端,除了添加循环前缀外,另外还增加了额外的保护间隔,这个保护间隔也是采用了 OFDM 信号的循环扩展。通过增加额外的保护间隔,可以保证非恒定信号幅度部分不会落入 FFT 的时间区域内。这样,在接收端,在精确同步的前提下,就可以去除窗函数,取出所需要的时域信号,通过 FFT 恢复出发送端所发送的数据。通常采用的一类窗类型就是升余弦函数<sup>[2-3]</sup>,其定义如下:

$$w(t) = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \cos(\pi + t\pi/(\beta T_s)) & 0 \leq t \leq \beta T_s \\ 1.0 & \beta T_s \leq t \leq T_s \\ 0.5 + 0.5 \cos(t - T_s)\pi/(\beta T_s) & T_s \leq t \leq (1 + \beta)T_s \end{cases} \tag{6}$$

其中,  $T_s$  表示加窗前的符号长度,而加窗后符号的长度应该为  $(1 + \beta)T_s$ ,从而允许相邻的符号间存在有相互覆盖的区域。这个区域的长度是由滚降系数来决定的,也就等于循环前后缀的长度。经过加窗后的 OFDM 符号见图 2。而加入升余弦窗函数之后的 OFDM 信号的功率谱密度为

$$S(f) = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{N-1} \left| \frac{\sin(\pi(f-f_i)T_s)}{\pi(f-f_i)T_s} * \frac{\cos[\pi\beta(f-f_i)T_s]}{1-4\beta^2[(f-f_i)T_s]^2} \right|^2 \tag{7}$$

这里,引入的另外一种窗函数就是 Blackman 窗函数,其定义如下:

$$\omega(t) = \begin{cases} 0.42 - 0.5 \cos(\frac{2\pi t}{T_b}) + 0.08 \cos(\frac{4\pi t}{T_b}) & 0 \leq t \leq T_b \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \tag{8}$$

其中,  $T_b$  为额外所加的循环前后缀的长度与 OFDM 信号的长度之和。

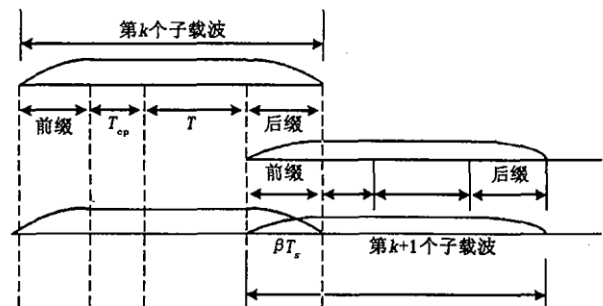


图2 经过加窗后的 OFDM 符号

## 2 仿真结果

图3 给出了当子载波个数  $N = 256$ , 升余弦窗函数的滚降系数  $\beta$  不同的情况下,仿真所得到的 OFDM 符号的功率谱密度图,其中,滚降系数分别为 0、0.025、0.05、0.1。从图3 可看出:  $\beta$  值越大,带外辐射功率下降的也就越快。

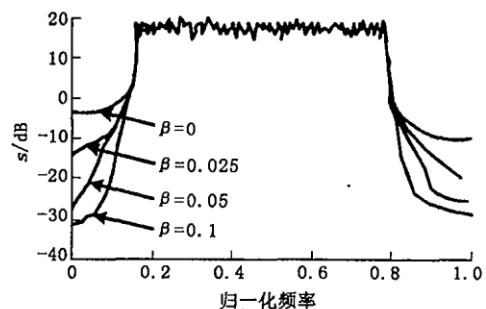


图3 升余弦窗函数对 OFDM 信号功率谱密度的影响

图4 所示加入升余弦窗函数以及 Blackman 窗函数后,所得到的 OFDM 系统的功率谱密度图。从图中可以看出,Blackman 窗函数可以大大的降低带外功率辐射。当然,由于 Blackman 窗

函数的非恒定信号幅度部分过长,使之有可能会落入到 FFT 的时间长度  $T$  内,破坏了子载波之间的正交性,从而有可能会带来 ICI 和 ISI,对信号造成极大的影响,使信号的误码率急剧恶化。因此在接收端需要去掉 Blackman 窗,而这又带来了一个新的问题,即同步问题。

为了能够实现有效的同步,这里采用了基于前导序列的符号同步算法。也就是说,在发送端,首先发送几组 PN 序列,对其进行 IFFT 运算,得到时域信号而将其发射出去。在接收端,由于所发送的 PN 序列已知,因此可以利用 PN 序列的强自相关性实现 OFDM 信号的符号同步。从仿真中发现,利用前导序列可以在低信噪比信道中实现精确的同步,从而在接收端可以除去 Blackman 窗函数对信号的影响,从而较好的恢复出数据。

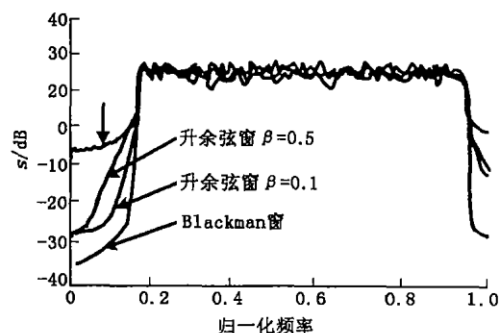


图4 加窗后的功率谱密度图

### 3 结束语

通过对 OFDM 信号的功率谱密度进行分析,发现其带外功率辐射较大。本文提出了一种基于加入窗函数的算法。该算法通过加入某一类窗函数,使得符号周期边缘的幅度值逐渐降低,从而降低其带外功率辐射。仿真结果表明,只要能够实现精确的帧同步,在接收端才可以除去窗函数对信号的影响,从而可以最大限度的减少带外功率辐射,并且由其所带来的误码率才不会恶化。总之,选择窗函数的原则就是:其频谱特性比较好,而且其非恒定幅度信号部分也不能过长,避免对更多个时域采样信号造成影响。

#### 参考文献:

- [1] Mattias Lampe, Hermann Rohling. Reducing Out-of-Band Emissions Due to Nonlinearities in OFDM Systems[J]. IEEE Trans. On Commu, 1999, 45(11): 2255 - 2259.
- [2] Jayalath A D S, Tellambura C. Reducing The Out of Band Radiation of OFDM Using An Extended Guard Interval[J]. IEEE Trans. On Commu, 2001, 47(3): 1149 - 1154.
- [3] Pavli M, Kuchenbecker H P. On The Reduction of The Out-of-Band Radiation of OFDM Signals[J]. IEEE ICC, 1998, 36(10): 1304 - 1308.

(编辑: 门向生)

## An Algorithm of Reducing Out-of-band Emissions of OFDM Based on GI

CHENG Ren, LENG Juan-hua

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

**Abstract:** In this paper an algorithm of reducing out-of-band emissions of OFDM based on GI is proposed. OFDM has better bandwidth efficiency and increased robustness to multi-path fading in wireless environment, but the out-of-band emissions of it are high. The algorithm based on guard interval can reduce the out-of-band emissions effectively by using the raised cosine windows. Of course the BER of systems change in a small range, which has been proved by the result of computer simulation.

**Key words:** OFDM systems; power spectral density; guard interval; raised cosine windows