

MIMO-OFDM 系统中接收窗函数的性能比较

郑维珺, 何 晨

(上海交通大学电子工程系, 上海 200240)

摘要:窗函数已被广泛地应用于多输入多输出-正交频分复用系统的接收端, 以降低系统对频率偏移的灵敏性, 减小载波间干扰, 改进接收机, 提高系统性能。该文将矩形窗、升余弦窗、优于升余弦窗和二阶连续窗以时域加窗的方式应用于 MIMO-OFDM 系统接收机, 并通过理论分析和计算机仿真就各窗函数对系统性能的影响进行了比较分析。

关键词:多输入多输出-正交频分复用; 频率偏移; 接收窗; 载波间干扰

Performance Comparison of Receiver Windows for MIMO-OFDM System

ZHENG Wei-jun, HE Chen

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

【Abstract】 Windowing has been widely used to improve receiver of Multi-Input and Multi-Output Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (MIMO-OFDM) system, which can suppress frequency offset that reduces Inter-Carrier Interference(ICI). In this paper, kinds of windows, including rectangular, raised cosine, better-than raised cosine and second order continuous window, are plunged into a MIMO-OFDM receiver in time domain to impact ICI. Performance of these windows is studied both by theoretical analyses and computer simulation.

【Key words】 Multi-Input and Multi-Output Orthogonal Frequency-Division Multiplexing(MIMO-OFDM); frequency offset; receiver window; Iner-Carrier Interference(ICI)

多输入多输出-正交频分复用(Multi-Input and Multi-Output Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, MIMO-OFDM)技术作为新一代无线通信系统的关键技术, 具有抗多径干扰能力强、系统容量大、传输速率和频谱利用率高等特点。将加窗技术应用于MIMO-OFDM系统的接收端, 可以降低OFDM系统对载波频偏的灵敏度, 抑制ICI, 提高系统性能^[1]。在实际OFDM系统中, 发送端加窗只能用来减少OFDM系统的带外辐射, 文献[2]的方法并不能有效地降低ICI。接收端加窗则可以有效地抑制ICI。接收端在OFDM解调之前, 将窗函数作用于原始信号和循环前缀中未被干扰的部分, 为保证没有载波频偏时无载波间干扰, 窗函数必须满足Nyquist准则。现有的文献已经提出了多种窗函数。文献[3]中给出了矩形窗、升余弦窗和一种优于升余弦的窗函数的时域表达式, 文献[4]提出一类时域二阶多项式Nyquist窗函数。本文将上述几种窗函数以接收端时域加窗的方法应用于MIMO-OFDM系统接收端, 并通过计算机仿真分析对比各窗函数的优劣, 以及窗函数对系统性能的影响。

1 信号模型和窗函数

在 MIMO-OFDM 系统接收端, 假设忽略噪声的影响, 将任一根接收天线的接收信号表示为

$$y(t) = e^{j(2\pi\Delta f t + \theta)} \sum_{k=0}^{N-1} b_k e^{j2\pi f_k t} \quad -T_g \leq t \leq T_u \quad (1)$$

其中, Δf 和 θ 分别为载波频率偏移和相位偏移; b_k 为第 k 个数据符号值; f_k 表示第 k 个子载波的频率, N 为子载波数; T_g 和 T_u 分别为保护间隔长度和数据符号的长度。

假设窗函数的能量为 1, 滚降系数为 α , 如下分别给出

时限矩形窗(rec)、升余弦窗(RC)、优于升余弦窗(BTRC)和二阶连续 Nyquist 窗(SOCW)的时域表达式:

$$w_{\text{rec}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{T_u} & 0 \leq |t| \leq \frac{T_u}{2} \\ 0 & |t| > \frac{T_u}{2} \end{cases} \quad (2)$$

$$w_{\text{RC}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{T_u} & 0 \leq |t| \leq \frac{T_u(1-\alpha)}{2} \\ \frac{1}{2T_u} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi}{\alpha T_u} \left(|t| - \frac{T_u(1-\alpha)}{2} \right) \right] \right\} & \frac{T_u(1-\alpha)}{2} \leq |t| \leq \frac{T_u(1+\alpha)}{2} \\ 0 & |t| \geq \frac{T_u(1+\alpha)}{2} \end{cases} \quad (3)$$

$$w_{\text{BTRC}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{T_u} & 0 \leq |t| \leq \frac{T_u(1-\alpha)}{2} \\ \frac{1}{T_u} e^{(-2\ln 2 / \alpha T_u)(|t| - (T_u(1-\alpha)/2))} & \frac{T_u(1-\alpha)}{2} \leq |t| \leq \frac{T_u}{2} \\ \frac{1}{T_u} \left\{ 1 - e^{(-2\ln 2 / \alpha T_u)((T_u(1+\alpha)/2 - |t|)} \right\} & \frac{T_u}{2} \leq |t| \leq \frac{T_u(1+\alpha)}{2} \\ 0 & |t| \geq \frac{T_u(1+\alpha)}{2} \end{cases} \quad (4)$$

$$w_{\text{SOCW}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{T_u} & 0 \leq |t| \leq \frac{T_u(1-\alpha)}{2} \\ \frac{1}{T_u} [1 - x(-|t| \frac{2}{\alpha T_u} + \frac{1}{\alpha})] & \frac{T_u(1-\alpha)}{2} \leq |t| \leq \frac{T_u}{2} \\ \frac{1}{T_u} x(|t| \frac{2}{\alpha T_u} - \frac{1}{\alpha}) & \frac{T_u}{2} \leq |t| \leq \frac{T_u(1+\alpha)}{2} \\ 0 & |t| \geq \frac{T_u(1+\alpha)}{2} \end{cases} \quad (5)$$

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (60372076); 上海市重大科技攻关项目“第四代移动通信关键技术研究”(03DZ15010)

作者简介:郑维珺(1982-), 女, 硕士研究生, 主研方向: MIMO-OFDM系统信道估计, 均衡技术; 何晨, 教授、博士生导师

收稿日期:2007-01-15 **E-mail:** merinancy@sju.edu.cn

在 SOCW 窗函数表达式中 $x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2$ ，且满足 $a_0 = 0.5$ ， $a_2 = -0.5 - a_1$ ，对于给定的滚降系数，可以通过调节二项式系数改变窗函数的形状和性能。由以上窗函数的时域表达式容易看出，当滚降系数 $\alpha = 0$ 时，RC、BTRC 以及 SOCW 都退化为矩形窗，且各窗函数的过渡带为：矩形窗为陡截断，升余弦窗以三角函数滚降，优于升余弦窗以 e 指数滚降，而 SOCW 则以二次函数滚降。

2 ICI 及系统性能比较分析

2.1 ICI 分析

对经过加窗的接收信号采样并进行 OFDM 解调，则有

$$z_m = \int_{-T_u(1+\alpha)/2}^{T_u(1+\alpha)/2} y(t) w_r(t) e^{-j2\pi f_m t} dt =$$

$$b_m e^{j\theta} \int_{-T_u(1+\alpha)/2}^{T_u(1+\alpha)/2} w_r(t) e^{j2\pi \Delta f t} dt +$$

$$e^{j\theta} \sum_{k=0, k \neq m}^{N-1} b_k \int_{-T_u(1+\alpha)/2}^{T_u(1+\alpha)/2} w_r(t) e^{j2\pi(f_k - f_m + \Delta f)t} dt =$$

$$b_m e^{j\theta} W_r(-\Delta f) + e^{j\theta} \sum_{k=0, k \neq m}^{N-1} b_k W_r\left(\frac{m-k}{T_u} - \Delta f\right) \quad (6)$$

其中， $w_r(t)$ 为接收窗函数； $W_r(f)$ 为其傅里叶变换； α 为窗函数的滚降系数。式(6)中第 1 项为接收信号期望值，第 2 项即为 ICI 项，它不仅与输入信号的相对位置 $m-k$ 有关，还要受到频率偏移 Δf 的影响。接收窗函数的作用就在于，通过加权滤波在尽量保持期望接收信号不被削弱的同时，减小 ICI 干扰项的影响，提高接收信号的精度，改善接收机性能。因此，不同形状的窗函数，若其保持期望接收信号和减小 ICI 干扰项的能力越强，则窗函数的性能越好。假设发送的数据符号是相互独立、均值为 0、方差为 1 的序列，则期望接收信号和 ICI 项的功率可分别表示为

$$\sigma_m^2 = E\{|b_m|^2\} |W_r(\Delta f)|^2 = |W_r(\Delta f)|^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{ICI_m}^2 = \sum_{k=0, k \neq m}^{N-1} \sum_{l=0, l \neq m}^{N-1} E\{b_k b_l^*\} W_r\left(\frac{m-k}{T_u} - \Delta f\right) W_r^*\left(\frac{m-l}{T_u} - \Delta f\right) =$$

$$\sum_{k=0, k \neq m}^{N-1} \left| W_r\left(\frac{m-k}{T_u} - \Delta f\right) \right|^2 \quad (8)$$

从而期望接收信号与 ICI 项的功率比为

$$SIR = |W_r(\Delta f)|^2 / \sum_{k=0, k \neq m}^{N-1} \left| W_r\left(\frac{m-k}{T_u} - \Delta f\right) \right|^2 \quad (9)$$

图 1、图 2 分别给出了不同接收窗函数在滚降系数 α 为 1 时的 ICI 功率和 SIR 曲线。

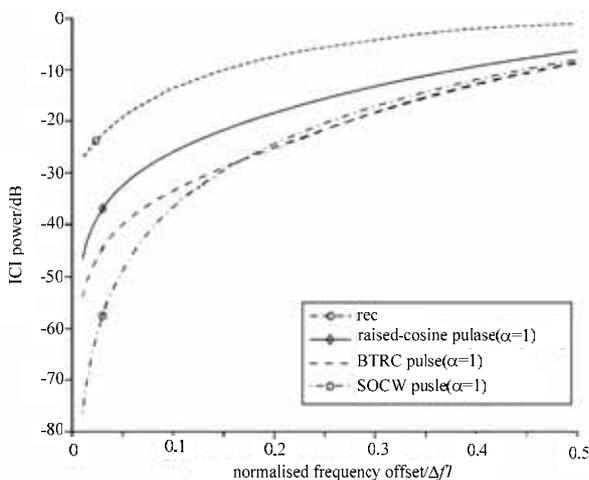


图 1 矩形窗、升余弦窗、优于升余弦窗和 SOCW 的 ICI 功率

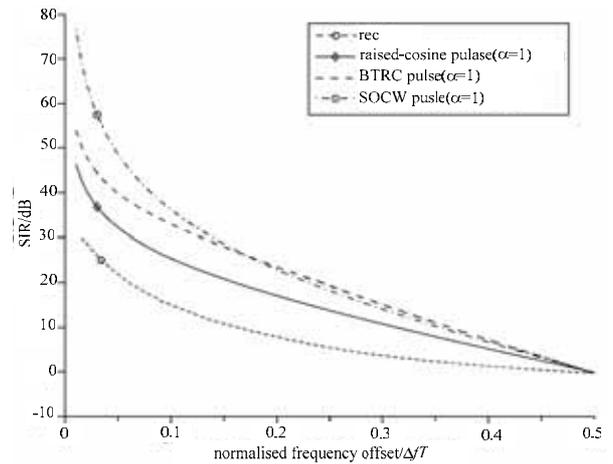


图 2 矩形窗、升余弦窗、优于升余弦窗和 SOCW 的 SIR

可以看出，升余弦窗、优于升余弦窗和 SOCW 对抗 ICI 的性能都优于矩形窗，而优于升余弦窗和 SOCW 的性能又明显比升余弦窗好。此外，在归一化频率 $\Delta f T$ (其中 T 为数据符号长度) 较小时，SOCW 可以达到最小的 ICI 功率和最大的 SIR 值，而随着归一化频率变大，SOCW 和优于升余弦窗的性能渐趋相似。从仿真模拟结果看，在滚降系数为 1 时，当归一化频率为 0.05 时，采用 SOCW 作为接收窗函数，相比于优于升余弦窗、升余弦窗和矩形窗，可以分别获得约 10 dB、15 dB 和 25 dB 的增益；而当归一化频率为 0.3 时，采用优于升余弦窗作为接收窗函数，相比于 SOCW，升余弦窗和矩形窗，可以分别获得约 2 dB、8 dB、15 dB 的性能增益。此外，对于 SOCW，可以相应于不同的滚降系数选择不同的二项式系数，改善窗函数性能。

2.2 系统性能比较分析

在 MIMO-OFDM 系统接收机中引入窗函数后，可以通过系统误码率(BER)的对比，比较各窗函数对系统性能的影响。本文采用如下的方法统计系统 BER，假设第 k 个子信道的 BER 为 $P_b(k)$ ，并统计 L 个连续 OFDM 符号的平均 BER 作为系统 BER：

$$P_b' = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P_b(k), P_b = \sum_{l=0}^{L-1} P_b' \quad (10)$$

其中， P_b' 为一个 OFDM 符号的平均 BER； P_b 为由 L 个连续 OFDM 符号统计出的系统 BER。

图 3 比较了 MIMO-OFDM 系统在不同多普勒频偏情况下，分别将矩形窗(rec)、升余弦窗(RC)、优于升余弦窗(BTRC)和基于二阶多项式 Nyquist 窗(SOCW)作用于系统接收端后，系统的误码率。仿真采用二入二出的天线分集，并假设不同发送、接收天线对之间相互独立，但具有相同的分布。系统采用文献[5]中的仿真参数，采用 QPSK 调制，在接收端对接收信号进行时域加矩形窗、升余弦窗、优于升余弦窗和 SOCW 的处理，窗函数的滚降系数设定为 $\alpha = 1/3$ ，采用倍长 DFT 解调。假设信道符合 ITU 的徒步 A 信道模型和车载 A 信道模型，对应的用户移动速度分别为 $V = 3$ km/h 和 $V = 120$ km/h。

从图中可以看出，对不同的多普勒频移(用户移动速度)，接收端窗函数的引入都可以在不同程度上降低系统的误码率，改善系统性能。而各窗函数相比，矩形窗的性能较差，二阶连续的 Nyquist 窗函数的性能较优，在相同误码率时，

(下转第 114 页)