

The Application of Pulse Shaping in CDMA Communication System Based on PSWF

Ninglong Zhu^{1,2}, Haiyue Li¹, Yingshan Li¹

¹College of Electronic Information and Optical Engineering of Nankai University, Tianjin

²Unit 91404 of PLA, Qinhuangdao Hebei

Email: zhuninglong@mail.nankai.edu.cn, haiyueli@mail.nankai.edu.cn, yingsl1122@nankai.edu.cn

Received: Jun. 11th, 2016; accepted: Jun. 27th, 2016; published: Jun. 30th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Proper pulse shaping is useful for reducing Multiple Access Interference (MAI) in CDMA system. In this paper, several prolate spheroidal wave functions (PSWF) are selected as the shaping pulses for CDMA communication system, further analyzed and compared with traditional pulses to improve system performance. Theoretical analysis and Matlab simulation results show that PSWF_4 and PSWF_3 which are proposed in our paper have better system performances compared with other traditional pulses in the power limited condition.

Keywords

Code Division Multiple Access (CDMA), Pulse Shaping, Prolate Spheroidal Wave Functions (PSWF), Bit Error Rate (BER), Throughput

PSWF函数在CDMA系统脉冲整形中的应用

朱宁龙^{1,2}, 李海月¹, 李英善¹

¹南开大学电子信息与光学工程学院, 天津

²中国人民解放军91404部队, 河北 秦皇岛

Email: zhuninglong@mail.nankai.edu.cn, haiyueli@mail.nankai.edu.cn, yingsl1122@nankai.edu.cn

收稿日期: 2016年6月11日; 录用日期: 2016年6月27日; 发布日期: 2016年6月30日

摘要

适当的脉冲整形对降低码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)通信系统中的多址干扰(Multiple Access Interference, MAI)具有良好的效果。本文针对这一问题,提出将椭圆球面波函数(Prolate Spheroidal Wave Functions, PSWF)引入CDMA系统进行脉冲整形,通过理论分析和Matlab仿真,与常规波形进行了对比,研究了该函数对CDMA系统通信性能的优化情况。理论分析和仿真结果均证明:在能量有限条件下,本文提议的PSWF_4、PSWF_3具有比其他常规波形更优的通信性能。

关键词

码分多址, 脉冲整形, 椭圆球面波函数, 误码率, 吞吐量

1. 引言

CDMA 通信系统中广泛存在着 MAI [1]。MAI 的存在会直接影响到系统的误码性能和吞吐量, 甚至对整个通信系统的容量造成极大影响。

适当的脉冲整形可以改善传输信号的频谱性能[2]。这种改善对于 CDMA 系统非常重要, 因为它使得系统可以在一个给定的带宽内使用较长的扩频码, 或者在相同的条件下容纳更多的用户。CDMA 系统广泛采用相关接收机, 这种技术使得 MAI 的方差既与整形脉冲的能量有关, 又与整形脉冲的形状自身相关。因此, 研究不同整形脉冲对于 CDMA 系统性能的影响具有非常重要的意义[3] [4]。而 PSWF 可在时域范围和频域范围内都近似带限。这一优良特点使得它在脉冲整形中的应用成为可能[5]-[7]。

本文针对这一问题, 提出将 PSWF 函数引入 CDMA 系统作为整形脉冲, 通过理论分析和 Matlab 仿真, 与常规波形进行对比, 研究该函数对 CDMA 系统检测性能的优化情况。理论分析和仿真结果均证明: 在能量有限条件下, 具有更大时间带宽积因子的 PSWF 波形对应的 CDMA 系统通信性能更优。

2. CDMA 系统

直接序列扩频 CDMA(Direct sequence CDMA, DS-CDMA)系统利用不同的地址码来区分不同的用户, 接收端可以利用这种差别, 从接收信号准确地分离出所要传输的有用信息。图 1 所示为 DS-CDMA 系统简单框图。

由图 1 可知, 在发射端经过基带调制和直接序列扩频后的不同用户信号进行叠加, 相加后的信号经过脉冲整形进行传输。接收端, 经过 Rake 接收, 匹配滤波, 然后进行解扩, 最后经基带解调和抽样判决, 恢复出原始信息。

DS-CDMA 系统利用不同用户之间的正交性来区分用户, 而实际应用中, 这种正交性不会那么严格, 这种不完全正交产生的干扰叫做多址干扰(MAI)。单个用户时 MAI 很小, 可以忽略不计, 但当用户增多时, MAI 就会越来越明显, 并影响到系统的误码率和吞吐量, 对系统容量产生极大影响。

为了克服 MAI 对 CDMA 通信系统的影响, 进一步优化 CDMA 数字通信系统的传输性能。我们试图找到更加恰当的脉冲波形, 通过脉冲整形改善传输性能, 满足系统对传输的更高要求。传统的整形脉冲有: 矩形、半正弦、三角波、升余弦等。

3. PSWF 波形

PSWF 最早由 Slepian 和 H. O. Pollark 等人在上世纪 60 年代提出, 其带通形式的积分定义如式(1) [8]:

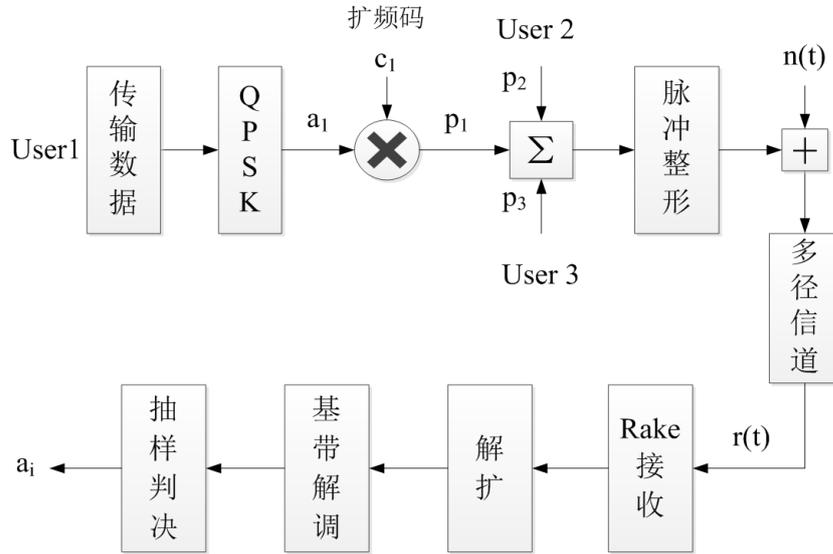


Figure 1. DS-CDMA system

图 1. DS-CDMA 系统框图

$$\int_{-T_s/2}^{T_s/2} \psi_i^p(c, \tau) \left[\frac{\sin \Omega_H(t-\tau)}{\pi(t-\tau)} - \frac{\sin \Omega_L(t-\tau)}{\pi(t-\tau)} \right] d\tau = \psi_i^p(c, t) \lambda_i(c), t \in (-\infty, +\infty) \quad (1)$$

式中, 参数 $\lambda_i(c)$ 表示 PSWF 函数 $\psi_i^p(c, t)$ 的能量集中度因子, i 为阶数; $\Omega = \Omega_H - \Omega_L$ 是角频率带宽; c 为时间带宽积因子, 且满足 $c = T_s \Omega / 2$ 。

PSWF 可以在时域持续时间有限的条件下, 满足在近似带限的频率范围内最大化集中频域的能量。这一优良特性使得它在脉冲整形中的应用成为可能。

但 PSWF 函数为积分形式, 它的闭式解很难求取。这在实际分析和研究过程中显得十分不方便。在文献[9]中, 作者通过计算机仿真得到了 $c = 1.2\pi$ 、 1.6π 、 2π 、 3π 时的计算机仿真波形, 如图 2 所示。

在文献[10]中, 作者给出了图 2 几种波形的近似解析表达式, 用于理论分析和研究, 各表达式如式(2)~式(5)。

1) 99%BW, $WTc = 1.2$:

$$\psi_c(t) = \sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi t}{T_c}\right) u(t) \quad (2)$$

2) 99.9%BW, $WTc = 1.6$:

$$\psi_c(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T_c}\right) \right] u(t) \quad (3)$$

3) 99%BW, $WTc = 2$:

$$\psi_c(t) = k_1 \operatorname{sinc} \left(4 \left(\frac{t - T_c/2}{T_c} \right) \right) u(t) \quad (4)$$

4) 99%BW, $WTc = 3$:

$$\psi_c(t) = k_2 \operatorname{sinc} \left(6 \left(\frac{t - T_c/2}{T_c} \right) \right) u(t) \quad (5)$$

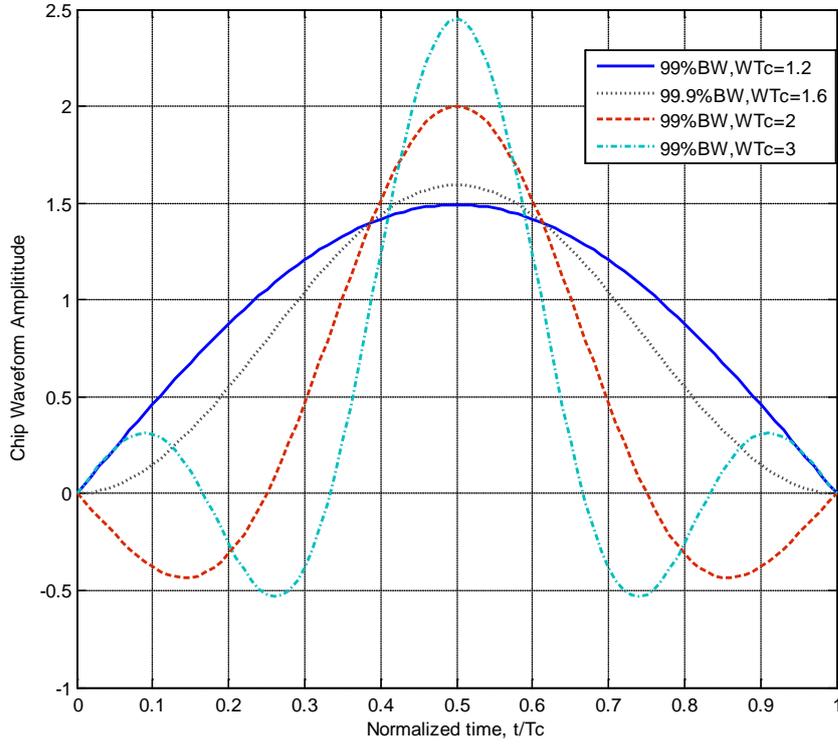


Figure 2. PSWF simulation waveform
图 2. PSWF 函数仿真波形

其中, k_1 和 k_2 为幅度归一化常数, $k_1 = 2.052$, $k_2 = 2.4917$ 。

本文引用上述 PSWF 波形的表达式, 用来与常规波形进行比较分析和研究。

4. 波形比较研究

4.1. 误码率比较

假设 K 个用户的 DS-CDMA 系统采用 QPSK 调制, 根据文献[3], 其系统 SNR 可表示为如式(6):

$$SNR = \frac{\left[E[Z_1^Q(t)] \right]^2}{\text{var}[Z_1^Q(t)]} = \frac{2E_b}{N_0 + 4(K-1)E_b \frac{M_c}{N}} = \frac{1}{\left(\frac{2E_b}{N_0} \right)^{-1} + 2(K-1) \frac{M_c}{N}} \quad (6)$$

其中, E_b 为单位比特能量, N_0 为噪声功率谱密度, K 为用户个数, N 为单位比特内的 chip 个数。 M_c 是波形的相关性指标, 不同波形的相关性不同。

部分相关性指标反映的是不同码片之间的正交性, M_c 越小, 反映的是码片之间的正交性越好, 即不同码元之间产生的码间干扰就会越低, 这对于 DS-CDMA 系统来说意味着系统误码性能的提升。

整形脉冲的部分相关性指标定义为:

$$M_c = \frac{1}{T_c^3} \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{R}_{\psi_c}(f)|^2 df = \frac{1}{T_c^3} \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi_c(f)|^4 df \quad (7)$$

其中 $\psi_c(f)$ 为整形脉冲的频域表达式。

根据公式(6)可以发现, 在相同的 E_b/N_0 条件下, 对于相同的用户数 K , SNR 的大小仅与 M_c/N 相关, 而 M_c/N 反映的是信号的波形形状。也就是说, 不同形状的整形脉冲通过相关函数 M_c 对系统的 SNR

产生影响,进而影响到系统的误码性能,并且, M_c/N 的值越小,系统 SNR 越大,对应的系统误码率 P_b 也就越小。

本文针对能量有限条件,研究不同整形脉冲对系统检测性能的影响。为了保证波形形状,首先要对整形脉冲进行归一化,即满足式(7)和式(8):

时域:

$$\int_0^{T_c} \psi_c^2(t) dt = T_c \quad (8)$$

频域:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi_c(f)|^2 df = T_c \quad (9)$$

为了保证能量有限条件,限制不同波形的 T_c 均为 1。在式(8)和式(9)的条件下,整形脉冲的能量均为 1,满足要求。同时,为了公平,要求不同波形对应系统具有相同的比特速率 R_b ,即相同的比特周期 T 。由于 T_c 均为 1,根据 $T = NT_c$ 可知,不同系统的 N 也相同。因此,不同系统的 SNR 将只与系统的 M_c 相关。

根据以上分析,只需比较不同整形脉冲的 M_c 值, M_c 数值越小,DS-CDMA 系统的误码率性能越好。

这里选择六种波形进行对比,其中常规波形两个,PSWF 波形四个。

常规波形为:三角波和升余弦波。两种常规波形经过幅度归一化后表达式为:

1) 三角波:

$$\psi_c(t) = \sqrt{3} \left[1 - \frac{2|t - \frac{T_c}{2}|}{T_c} \right] u(t) \quad (10)$$

2) 升余弦:

$$\psi_c(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T_c}\right) \right) u(t) \quad (11)$$

PSWF 波形选择 PSWF_1($WT_c = 1.2$)、PSWF_2($WT_c = 1.6$)、PSWF_3($WT_c = 2$)、PSWF_4($WT_c = 3$) 四种。

表 1 所示为按照 M_c 公式计算得到的各波形 M_c 值的大小。由表可知, M_c 的大小顺序由大到小依次为: PSWF_1 > 三角波 > 升余弦(PSWF_2) > PSWF_3 > PSWF_4。根据以上分析,采用相应波形的 DS-CDMA 系统的 SNR 的大小顺序依次为: PSWF_4 > PSWF_3 > PSWF_2(升余弦) > 三角波 > PSWF_1,对应的系统误码性能优劣顺序从优到劣依次应为: PSWF_4、PSWF_3、PSWF_2(升余弦)、三角波、PSWF_1。由于升余弦波形是常规波形中性能最优的波形,也就是说 PSWF_3 和 PSWF_4 波形具有比上述常规波形更好的误码率性能。

4.2. 吞吐量比较

对于 DS-CDMA 系统,当用户的数量 k 超过 DS-CDMA 的系统容量 C 时,由于过载,数据包就会发生丢失。为了考量系统发送数据的能力,在 DS-CDMA 系统中,定义系统的吞吐量(Throughput)为:单位时间段内成功接收到的平均数据块个数。如果用系统容量进行归一化,则可得到归一化吞吐量。其定义式如式(12):

$$T = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S k P_k P_{cor}(k) \quad (12)$$

Table 1. M_c value of wave forms under the condition of limited energy
表 1. 能量有限条件下各波形的 M_c 值

波形	M_c
PSWF_1	0.2928
三角波	0.2691
升余弦	0.24
PSWF_2	0.24
PSWF_3	0.1303
PSWF_4	0.0851

其中, $P_{cor}(k)$ 为包含 N_d 个数据比特的数据块传输成功的接收概率, 定义为: $P_{cor}(k) = [1 - P_e(k)]^{N_d}$, $P_e(k)$ 为 k 个用户同时出现时的平均误比特率, N_d 是每个传输成功的数据块所包含的比特数目。同时, P_k 为在传输的数据块中包含 k 个用户的概率, 若给定通信速率 G 服从泊松分布, 则其定义为:

$$P_k = \left[\frac{G^k}{S!} \right] \cdot \exp(-G), \quad k = 1, 2, \dots, S \quad (13)$$

若给定通信速率 G 服从二项分布, 则其定义为:

$$P_k = \binom{S}{k} \left[\frac{G}{S} \right]^k \left[1 - \frac{G}{S} \right]^{S-k} \quad (14)$$

其中, S 是系统容量, 即系统所能容纳的最大用户数。本文仅对通信速率 G 服从二项分布的情况讨论研究。

由 DS-CDMA 系统的归一化误码率定义式可以看出, 在系统容量 S 和通信速率 G 都给定的情况下, P_k 相当于已经给定, 对某个特定 DS-CDMA 系统, N_d 也是给定的, 因此只需求得系统中同时存在不同个用户时的误比特率 P_k , 根据以上公式便可通过计算得出 DS-CDMA 系统的归一化吞吐量。

5. 仿真结果和分析

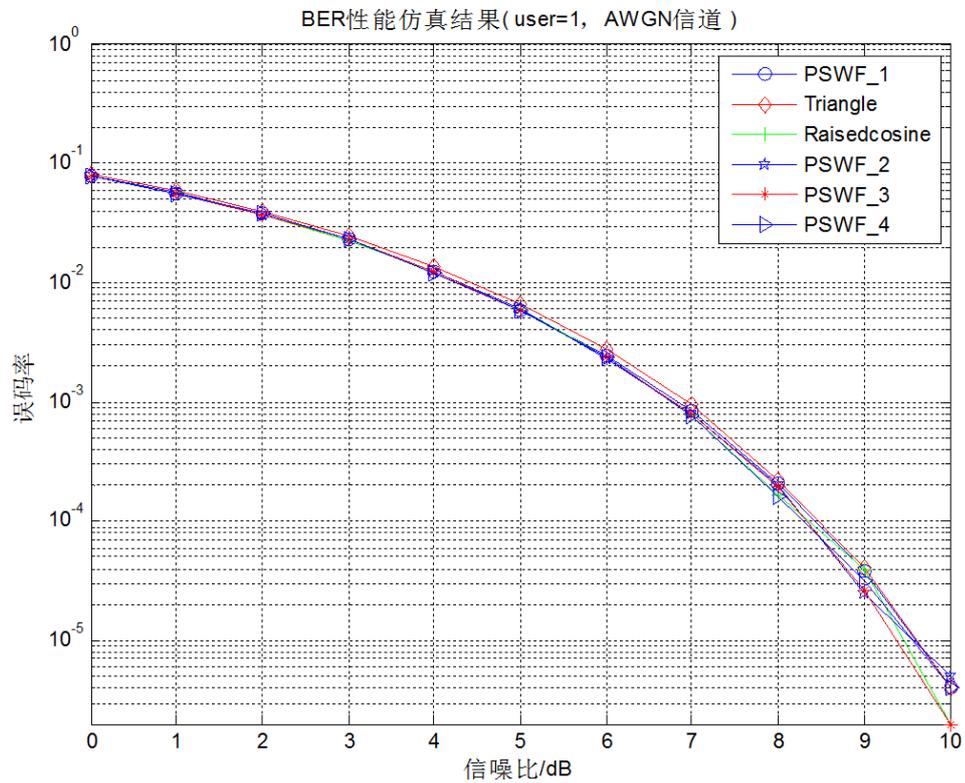
为了验证第 3 节关于误码率的比较结果, 并进一步研究 Throughput 性能, 本节在能量有限条件下, 通过对不同整形脉冲对应的 DS-CDMA 系统进行 Matlab 仿真, 研究系统误码率和吞吐量性能的变化情况。

5.1. 误码率仿真

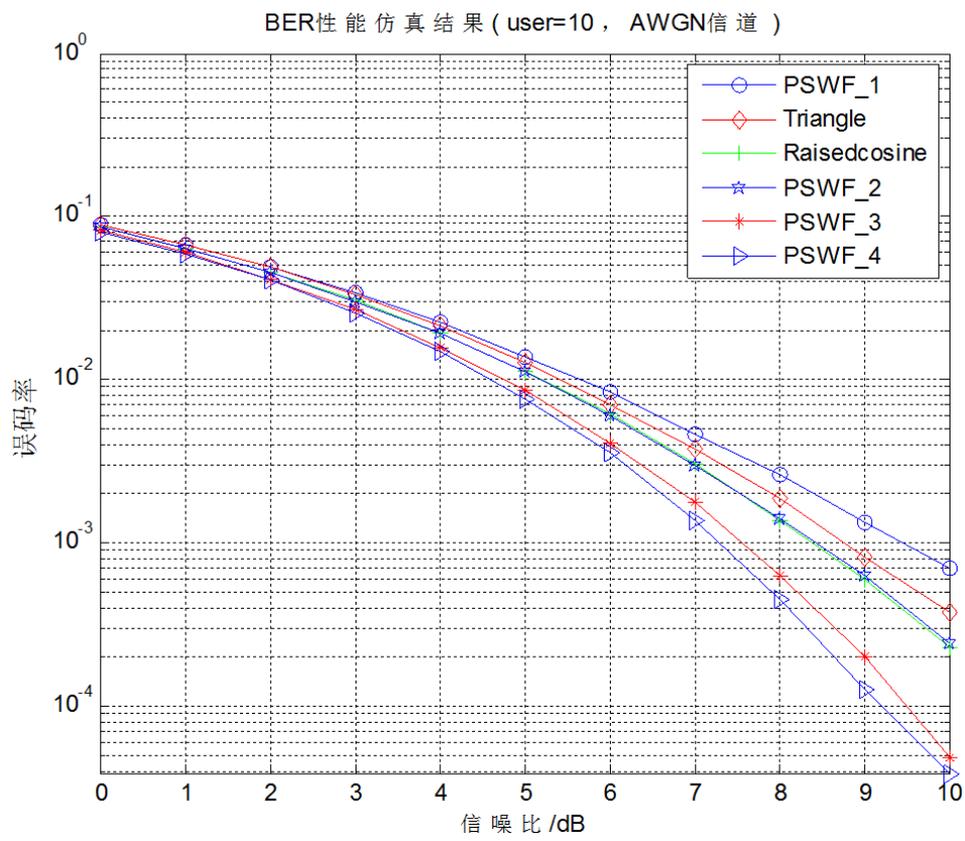
仿真主要参数为: DS-CDMA 系统, QPSK 调制, Gold 码(码长为 31)扩频, 用户数选择 user = 1, user = 10, user = 30 三种情况, 信道选择 AWGN 信道和 Rayleigh 信道两种, 采用 Rake 接收机。

由图 3 可知, 在 AWGN 信道下, 对于单用户情况, 采用四种不同整形脉冲的 DS-CDMA 系统的误码率性能几乎一样。对于多用户情况, 无论是 user = 20 还是 user = 30, 系统误码率性能的优劣顺序从优到劣均为: PSWF_4、PSWF_3、PSWF_2(升余弦)、三角波、PSWF_1, 并且, 随着 user 个数的增加, 各波形之间的误码率差距越来越大, 也就是说, 系统的检测性能差别越来越大, 这与多用户下 MAI 对 DS-CDMA 系统误码率影响的理论分析是吻合的。另外, 对于 PSWF 波形, 时间带宽积因子越大, 对应的系统误码率性能越好。

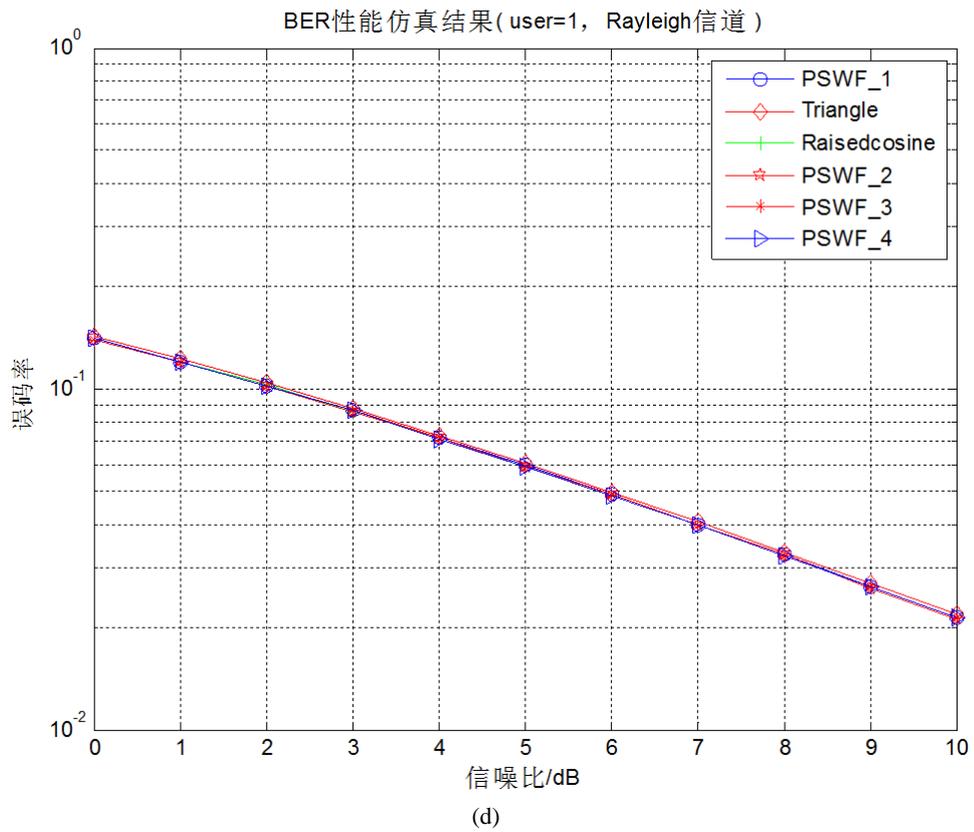
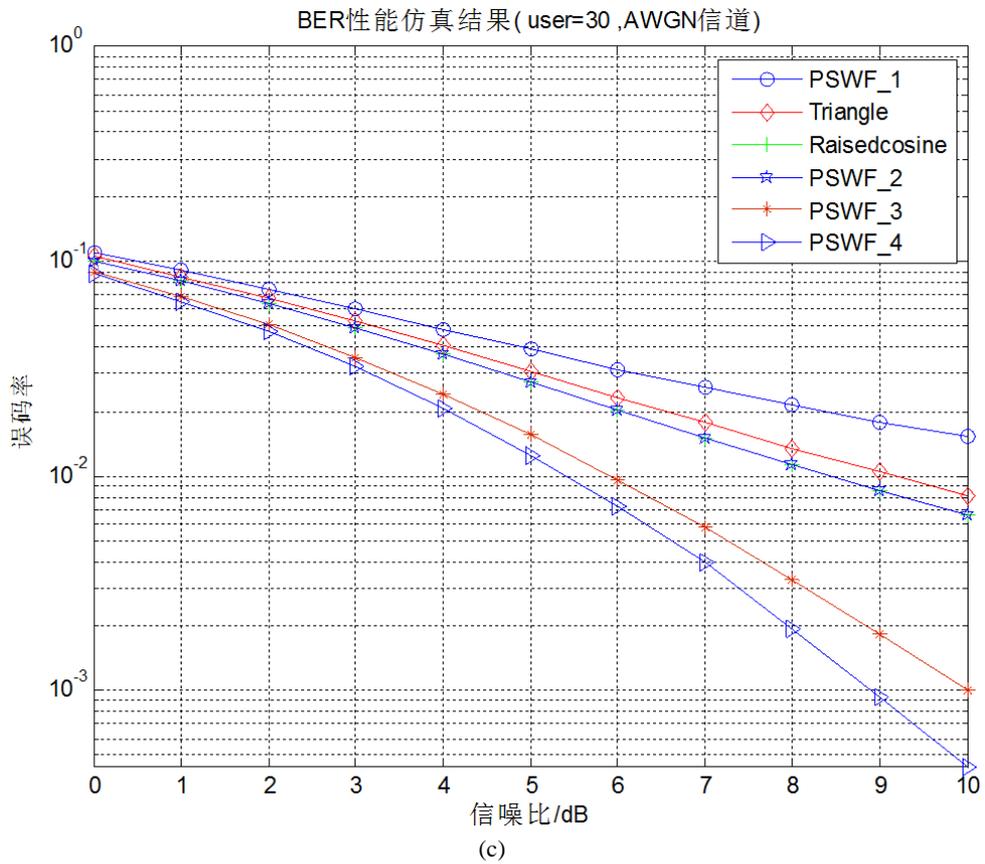
由图 3 可知, 在 Rayleigh 信道条件下, 无论单用户情况还是多用户情况, 采用不同整形波形的系统误码率性能顺序和 AWGN 信道情况完全一致。不同的是, 同等条件下, Rayleigh 信道情况的误码率更大,



(a)



(b)



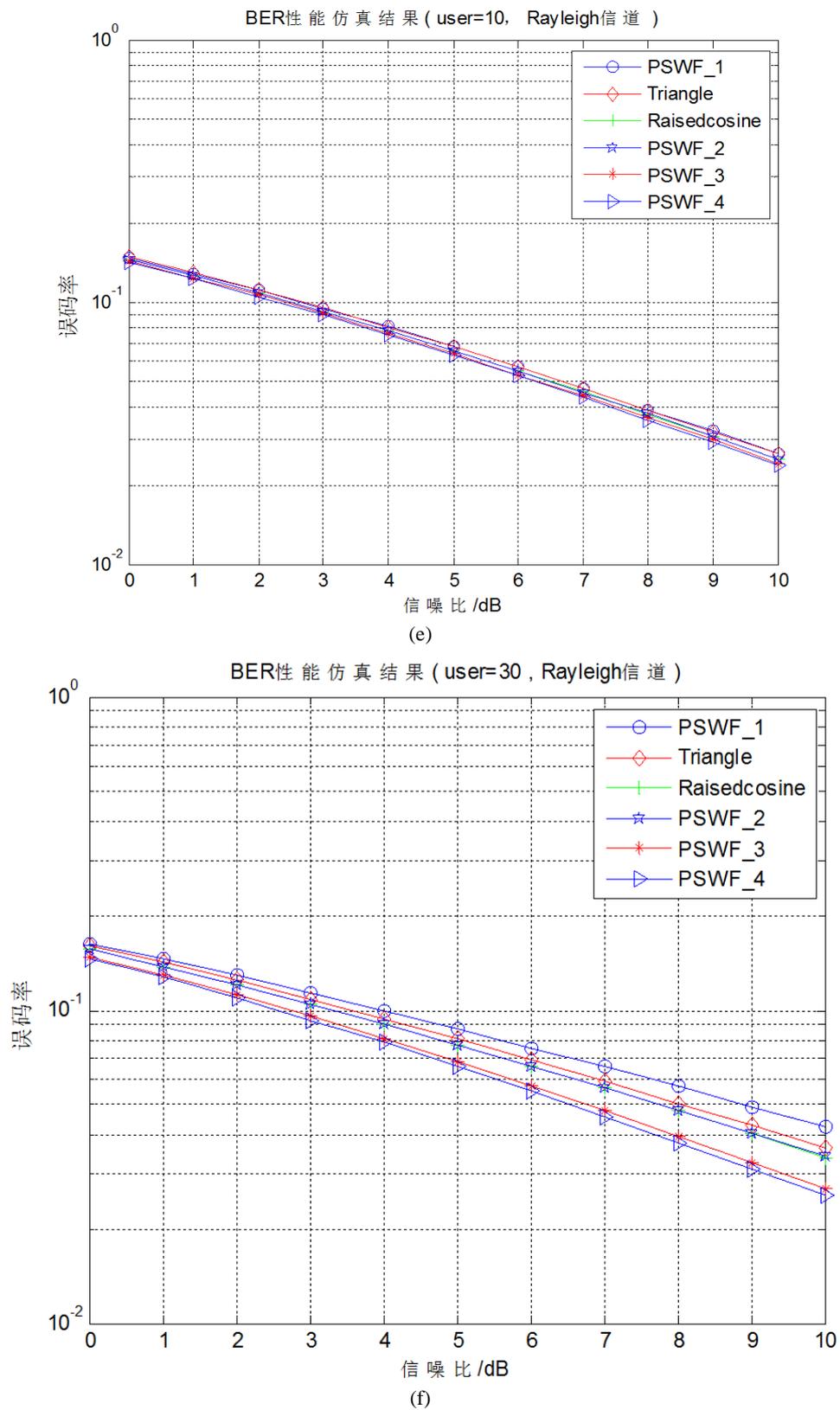


Figure 3. BER simulation results (a) (b) (c) is under AWGN channel, (d) (e) (f) is under Rayleigh channel
 图 3. 误码率性能仿真结果(a) (b) (c) 为 AWGN 信道环境, (d) (e) (f) 为 Rayleigh 信道环境

不同波形之间的误码率性能差距更小。

5.2. Throughput 仿真

仿真参数为：DS-CDMA 系统，Gold 码扩频， $N = 127$ ， $N_d = 42$ ， $L = 3$ ，Rayleigh 信道，Rake 接收，接收分集数分别为 2 和 3。仿真结果如图 4。

由图 4 可知，在 Rayleigh 信道下的 DS-CDMA 系统，无论接收分集数 $M = 2$ 还是 $M = 3$ 时，系统吞吐量的大小顺序从大到小均为：PSWF_4、PSWF_3、PSWF_2(升余弦)、三角波、PSWF_1。并且，随着 M 值的增大，相同整形脉冲情况下，系统的吞吐量变大。由此可见，在 Rayleigh 信道下的 DS-CDMA 系统吞吐量性能与误码率性能的顺序完全相同，且当接收分集数越多时，系统吞吐量性能越好。对于 PSWF 波形，由仿真结果可知，时间带宽积因子越大，系统吞吐量性能越好。

6. 结束语

本文针对 CDMA 系统面临的多址干扰问题，首先从理论上分析了能量有限情况下整形脉冲对 DS-CDMA 系统性能的影响，提出了将椭圆球面波函数 PSWF 作为整形脉冲。与其他常规波形进行比较，分析得出了 PSWF_4、PSWF_3 波形比其他常规波形对 DS-CDMA 系统性能的提升更大的结论。进一步通过 Matlab 仿真验证了如下结论：在 AWGN 信道和 Rayleigh 信道环境中，不同用户数情况下，PSWF_4、PSWF_3 波形比其他常规波形具有更优的误码率性能，在 Rayleigh 信道环境中，不同分集数条件下，PSWF_4、PSWF_3 具有比其他常规波形更优的 Throughput 性能。

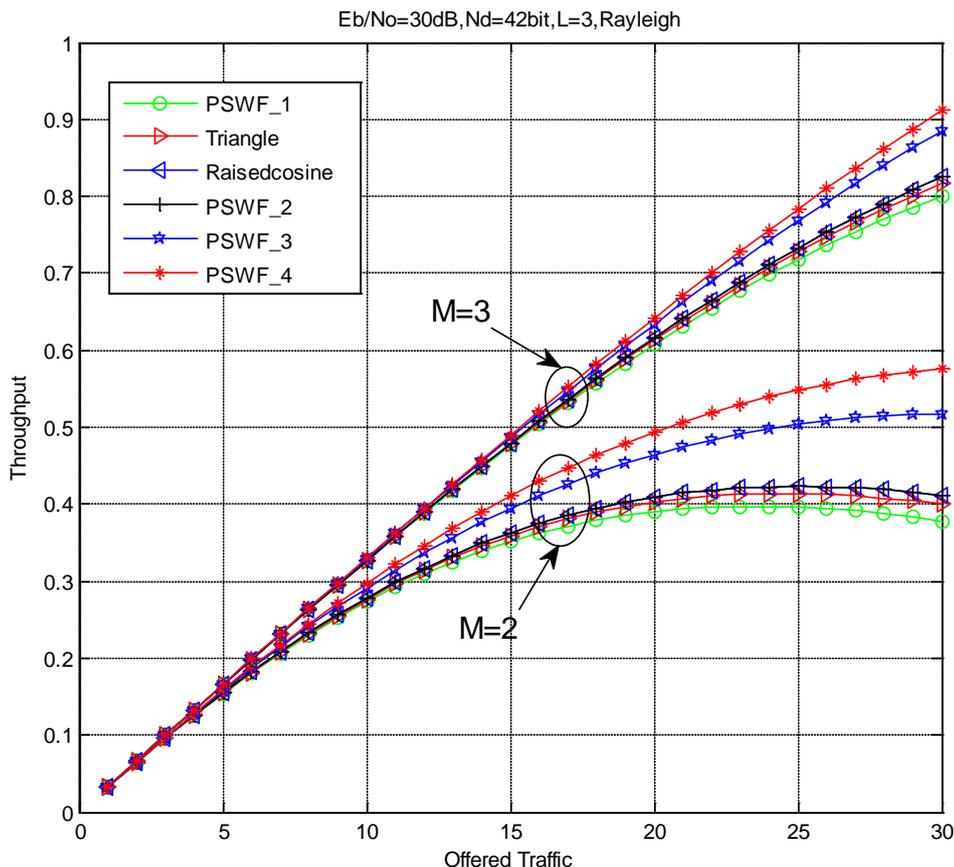


Figure 4. BER simulation results (a) (b) (c) is under AWGN channel, (d) (e) (f) is under Rayleigh channel
图 4. 误码率性能仿真结果(a) (b) (c) 为 AWGN 信道环境，(d) (e) (f) 为 Rayleigh 信道环境

综上所述, 在 CDMA 多用户通信中, 在能量有限情况下, PSWF_4、PSWF_3 具有比其他常规波形更优的检测性能, 可以有效降低多址干扰的影响。

基金项目

天津市应用基础及前沿研究计划项目 BE026011。

参考文献 (References)

- [1] Viterbi, A.J. (1995) CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication. Addison-Wesley, Reading.
- [2] 曹志刚, 钱亚生. 现代通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 215-216.
- [3] Landolsi, M.A. and Stark, W.E. (1999) DS-SSMA Chip Waveform Design for Minimal Interference Under Bandwidth, Phase, and Envelope Constraints. *IEEE Transactions on Communications*, **47**, 1737-1746.
<http://dx.doi.org/10.1109/26.803509>
- [4] Gao, W., Cho, J.H. and Lehnert, J.S. (2002) Chip Waveform Design for DS/SSMA Systems with a Periodic Random Spreading Sequences. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **1**, 37-45.
<http://dx.doi.org/10.1109/7693.975443>
- [5] Jitsumatsuy, K. (2008) Prolate Spheroidal Wave Functions Induce Gaussian Chip Waveforms. 2008 *IEEE International Symposium on Information Theory*, Toronto, 6-11 July 2008, 1363-1367.
- [6] Slepian, D. and Pollak, H.O. (1961) Prolate Spheroidal Wave Functions, Fourier Analysis and Uncertainty. *The Bell System Technical Journal*, **40**, 43-64. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1961.tb03976.x>
- [7] 赵志勇, 王红星, 刘锡国. 正交椭圆球面波函数脉冲调制方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2331-2335.
- [8] Sastry, K.L.A. and Prasad, R. (1991) Throughput Analysis of CDMA with DPSK and BPSK Modulation and Diversity in Indoor Radio Channels. *3rd IEEE Conference on Telecommunications*, **1**, 90-94.
- [9] Floch, J.-J., Antreich, F. and Issler, J.-L. (2010) Comparison of Different Chip Pulse Shapes for DS-SSMA Systems. *Position Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2010 *IEEE/ION*, Indian Wells, 4-6 May 2010, 918-926.
- [10] Hamamuram, H.J. (2008) Spectral Efficiency of Orthogonal Set of Truncated MC-SSMA Signals Using Discrete Prolate Spheroidal Sequences. *WCNC 2008 Proceedings in IEEE Communications Society*, Las Vegas, 31 March-3 April 2008, 980-984.

再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>