

# Anti-Single Path Rayleigh Fading Algorithm Based on EBPSK-MODEM

Chenmei Zhang, Lenan Wu

Radio Engineering Department of Southeast University, Nanjing Jiangsu  
Email: [chenmei\\_zhang@163.com](mailto:chenmei_zhang@163.com)

Received: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2015; accepted: Aug. 10<sup>th</sup>, 2015; published: Aug. 14<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 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

Extended Binary Phase Shift Keying (EBPSK) is an efficient modulation mode. According to the characteristic that the impacting filter based demodulator would transform the EBPSK modulating signal into impact amplitude, and the interpolation thought, two new anti-single path Rayleigh fading algorithms aimed at EBPSK-MODEM scheme are put forward, which are interpolation algorithm estimating fading factor and interpolation algorithm estimating the decision threshold. The simulation results show that the two algorithms improve the performance of EBPSK-MODEM systems to varying degrees. Among them, the performance of the interpolation algorithm estimating decision threshold is slightly better than interpolation algorithm estimating fading factor.

## Keywords

EBPSK-MODEM, Single Path Rayleigh Fading Channel, Impacting Filter, Interpolation Algorithm Estimating Decision Threshold, Interpolation Algorithm Estimating Fading Factor

---

# EBPSK-MODEM的抗单径瑞利衰落算法

张陈梅, 吴乐南

东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京  
Email: [chenmei\\_zhang@163.com](mailto:chenmei_zhang@163.com)

收稿日期: 2015年7月23日; 录用日期: 2015年8月10日; 发布日期: 2015年8月14日

## 摘要

扩展的二元相移键控(Extended Binary Phase Shift Keying, EBPSK)是一种高效调制方式, 针对冲击滤波器可将EBPSK调制信息转化为幅度冲击的特点并引入插值思想, 本文提出了两种抗单径瑞利衰落算法: 插值估计衰落因子和插值估计判决门限。仿真结果表明, 这两种算法对EBPSK-MODEM系统的性能均有不同程度改善, 其中以插值估计判决门限算法对系统的性能改善效果优于插值估计衰落因子算法。

## 关键词

EBPSK-MODEM, 单径瑞利衰落信道, 冲击滤波器, 插值估计判决门限算法, 插值估计衰落因子算法

## 1. 引言

随着信息社会迅速发展, 人们对数据传输速率的要求越来越高, 然而空中频谱资源有限, 所以需要更有效地利用频谱资源[1]。扩展的二元相移键控(Extended Binary Phase Shift Keying, EBPSK)是一种二元不对称调制[2], 具有高频谱利用率, 在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道中性能良好。

然而在高速移动环境下, 由于发射机和接收机之间的高速相对运动带来多普勒效应[3], 使得传输信道快速时变, 从而严重影响通信性能, 典型以单径瑞利衰落信道为代表。经典的抗单径瑞利衰落技术如自适应信道均衡最小均方(Least mean squares, LMS)算法、递归最小二乘(Recursion Least Square, RLS)算法等, 是基于基带的“星座图”均衡处理的, 然而 EBPSK 调制信号不同于传统的调制信号, 不易转换为传统意义上“星座图”, 所以经典的抗单径瑞利衰落方法并不适用于 EBPSK 通信系统[4]-[6]。在文献[3]提出了两种用于 EBPSK 的抗单径瑞利衰落算法: 自动跟踪判决门限算法和自动控制增益算法, 在一定程度上提升了 EBPSK 系统在瑞利衰落信道下的传输性能, 但其鲁棒性不强, 深度衰落时改善效果不明显。因此, 探索新的抗单径瑞利衰落技术对于 EBPSK 体制走向实用具有重大意义

本文首先介绍 EBPSK 调制与解调原理和单径瑞利衰落信道建模; 然后提出两种基于 EBPSK 的抗单径瑞利衰落算法: 插值估计衰落因子和插值估计判决门限; 最后对这两种算法的误码率性能进行仿真和对比分析, 结果表明, 两种算法均提升了 EBPSK 系统在单径瑞利衰落信道中的传输性能。

## 2. 基本原理

### 2.1. EBPSK 调制与解调

经典的二进制相移键控调制(Binary Phase Shift Keying, BPSK)是 0~1 对称的, 能够完全抑制载波, 但其频谱利用率低; 而 EBPSK 将 BPSK 扩展为非对称调制, 使已调波形近乎正弦波。EBPSK 调制信号波形表达式如下[2]

$$\begin{aligned} f_0(t) &= A \sin \omega_c t, \quad 0 \leq t < T \\ f_1(t) &= \begin{cases} B \sin(\omega_c t + \theta), & 0 \leq t < \tau, 0 \leq \theta \leq \pi \\ A \sin \omega_c t, & \tau \leq t < T \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $T$  为码元持续时间,  $N$  为  $T$  内的载波周期个数;  $\tau$  为键控持续时间,  $K$  为  $\tau$  内的载波周期个数且  $K \leq N$ 。EBPSK 调制信号的“0”和“1”码元波形差异小, 即  $f_0(t)$  和  $f_1(t)$  只在时段  $\tau$  内不同。一类特殊的无限冲激响应(Infinite Impulse Response, IIR)数字带通滤波器可突出这种细小差异, 称之为冲击滤波器, 由一

对共轭零点和至少两对共轭极点构成。通过其通带中心陡峭的陷波 - 选频特性, 使 EBPSK 调制信号的相位跳变转化为寄生调幅冲击, 突出待解调信号的差异[7]。本文采用的冲击滤波器是单零点 3 极点, 系统函数为

$$H(z) = \frac{z^{-2} + b_1 \cdot z^{-1} + b_0}{1 - \sum_{j=1}^6 a_j \cdot z^{-j}} \quad (2)$$

其中各系数的取值为:

$$\begin{aligned} b_1 &= -1.618092409933249 & b_0 &= 0.99990000250000044 \\ a_1 &= -4.5620074920961651 & a_2 &= 9.5862839416819483 \\ a_3 &= -11.566980661101638 & a_4 &= 8.4523528839743243 \\ a_5 &= -3.5467147693005732 & a_6 &= 0.6855154433139603 \end{aligned}$$

EBPSK 调制信号经过冲击滤波器后的波形如图 1 所示(其中  $K=2$ ,  $N=10$ ), 在码元“1”中,  $K$  个载波周期的相位跳变经过冲击滤波器后变为寄生调幅[8] [9], 然后可采用包络检波和门限判决解调出“0”和“1”。因此可直接在中频上对发送码元进行判决, 无需基带处理。

## 2.2. 单径瑞利衰落信道建模

如果发送一个余弦波, 则接收端收到的单径衰落信号是一个调幅调相波, 具有随机振幅和随机相位, 从单一频率弥散成了一个窄带频谱。因此单径衰落信号实际上为窄带随机过程, 其包络的一维统计特性服从瑞利分布, 通常又称单径瑞利衰落。一般将 Clarke 模型[10]作为单径瑞利衰落信道的数学模型, 即:

$$g(t) = g_c(t) + jg_s(t) \quad (3)$$

式中  $g_c(t) = E_0 \sum_{n=1}^N C_n \cos(w_d t \cos \alpha_n + \phi_n)$ ,  $g_s(t) = E_0 \sum_{n=1}^N C_n \sin(w_d t \cos \alpha_n + \phi_n)$ ;  $N$  为不可分辨的传播路径数目,  $w_d = 2\pi f_m$ ,  $f_m$  是最大多普勒频移,  $E_0$  是衰减常数,  $\alpha_n$ ,  $\phi_n$ ,  $C_n$  分别是第  $n$  径的随机路径到达角

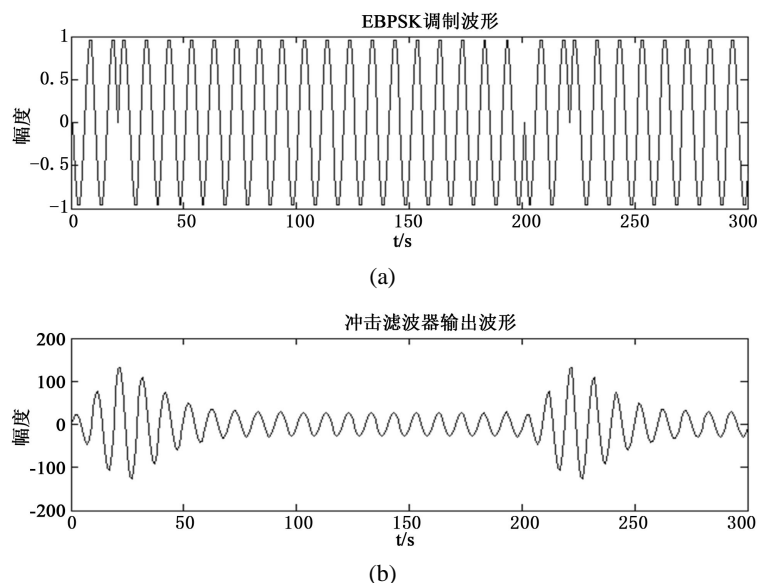


Figure 1. EBPSK waveform and filter output waveform  
图 1. EBPSK 调制波形和滤波器输出波形

度、初始相位和增益,  $\alpha_n$  和  $\phi_n$  服从  $[-\pi, \pi]$  上均匀分布且相互独立。由贝尔实验室的 William Jakes 提出的 Jakes 模型对 Clarke 模型进行了简化, 使得 Clarke 模型的收敛运算速度加快, Jakes 模型[11]目前已被许多标准化组织接受, 应用也最为广泛。Jakes 假定具有相等功率的  $N$  个到达波的到达角满足  $[0, 2\pi)$  上的均匀分布, Jakes 模型生成的第  $k$  次瑞利衰落的表达式由式(4)给出:

$$T_k(t) = \sqrt{\frac{1}{2N_0+1}} \left\{ 2 \sum_{n=1}^{N_0} (\cos \beta_n + j \sin \beta_n) \cos(\omega_m \cos \alpha_n t) + \sqrt{2} \cos(\omega_m t) \right\} \quad (4)$$

其中:  $\omega_m$  是最大多普勒频移,  $N = 4N_0 + 2$ ,  $\alpha_n = 2\pi n/N$ ,  $\beta_n = \pi n/(N_0 + 1)$ , 本文采用 Jakes 仿真模型[10]来对单径瑞利衰落信道建模。由于单径瑞利衰落信道的影响, EBPSK 信号的幅度和相位受到干扰, 而 EBPSK 特殊的冲击解调方式将相位跳变转变为寄生幅度跳变, 使得单径瑞利衰落干扰转化为冲击滤波后信号包络的起伏, 如图 2 所示, 其中 EBPSK 调制信号参数为  $f_c = 5 \text{ MHz}$ ,  $K = 2$ ,  $N = 20$ ; 单径瑞利衰落信道最大多普勒频移  $f_m = 50 \text{ Hz}$ 。

### 3. 抗单径瑞利衰落算法

单径瑞利衰落信道严重干扰了 EBPSK 系统的通信性能, 所以要采用一定措施来抵抗单径瑞利衰落干扰。文献[3]提出了自动控制增益算法和自动跟踪判决门限两种算法, 都对 EBPSK 系统在瑞利衰落信道中的传输性能有所改善。但是当衰落频繁且幅度出现较大波动时, 两种算法在包络波谷出现局部信噪比恶化, 导致突发误码。所以本文引入插值思想, 提出两种新的抗单径瑞利衰落算法: 插值估计衰落因子算法和插值估计判决门限算法。

#### 3.1. 插值估计衰落因子算法

由 2.2 节可知, 在单径瑞利衰落信道下, EBPSK 经过冲击滤波器后信号波形包络会出现起伏波动, 其表示为数学表达式:

$$y(t) = a(t) \cdot x(t) \quad (5)$$

其中  $x(t)$  为未经过单径瑞利衰落信道的 EBPSK 冲击滤波输出信号,  $y(t)$  为单径瑞利衰落信道下 EBPSK

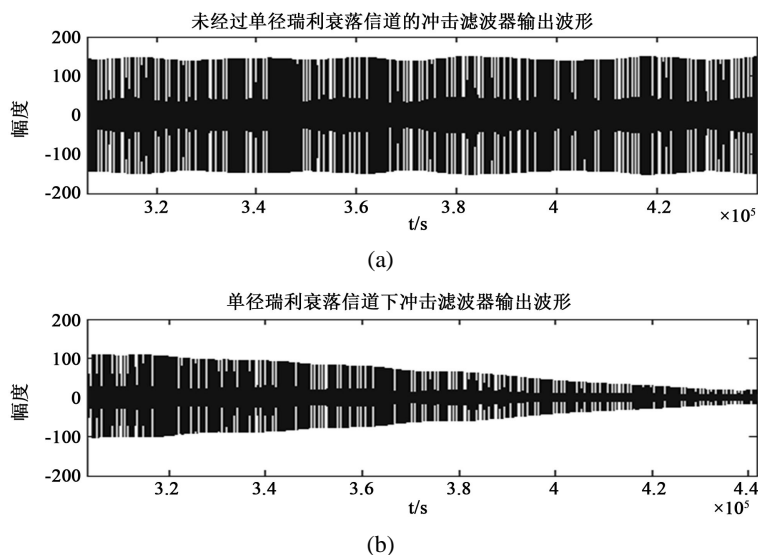


Figure 2. The waveform of EBPSK after impacting filter  
图 2. EBPSK 调制信号经过冲击滤波器后的波形

冲击滤波信号,  $a(t)$  是衰落起伏因子, 是 EBPSK 信号干扰经过单径瑞利衰落信道和冲击滤波后的信号包络起伏。

记码元“1”冲击幅度最高点的位置为  $dek$ , 然后取每个发送码元冲击波形中  $dek$  位置的幅度值, 将式(5)变为:

$$y(n) = a(n)x(n) \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6)$$

如果已知  $a(n)$ , 可以根据接收样本  $y(n)$ , 算出  $x(n)$ 。然而传统的信道估计根据前段的发送训练序列估计  $a(n)$  不可行, 主要原因是  $a(n)$  是一个时变量。所以本文引入插值思想来估计  $a(n)$ 。

插值是一种重要的离散函数逼近方法, 主要通过函数在有限个点处的取值, 估算出函数在其它点处的近似值。常用的插值方法有线性插值、三次样条插值和立方插值。为了便于硬件实现和适应快速时变瑞利衰落信道, 所以本文采用简单快速的线性插值方法: 设已知函数  $y = F(z)$  在自变量  $z_1$  与  $z_2$  处的函数值为  $F(z_1)$  与  $F(z_2)$ , 为了计算在自变量  $z(z_1 < z < z_2)$  处的函数值  $F(z)$ , 可以假定坐标平面上 3 点  $(z_1, F(z_1))$ ,  $(z_2, F(z_2))$  和  $(z, F(z))$  在一条直线上, 利用公式  $F(z) = F(z_1) + (z - z_1) \times (F(z_2) - F(z_1)) / (z_2 - z_1)$  来计算  $F(z)$ 。根据线性插值原理, 插值估计衰落因子算法的主要步骤为:

1) 在发送码元中, 间隔  $k$  个插入训练码元“1”即  $s_T(1:k:N) = 1$ , 其中  $s_T(n)$  为发送码元序列。

2) 在接收端, 根据  $x(1:k:N)$  和  $y(1:k:N)$ , 计算得到  $a(1:k:N) = y(1:k:N) / x(1:k:N)$ , 然后采用线性插值估计  $a(n)$ 。 $x(1:k:N)$  和  $y(1:k:N)$  分别为训练码元的 EBPSK 调制信号通过和未通过单径瑞利衰落信道的冲击滤波器后冲击幅度值序列。

3) 最后计算得到  $x(n) = y(n) / a(n)$ , 用于门限判决从而得到解调信号。

为了精确估计  $a(n)$ , 要求间隔  $k$  值越小越好, 如图 3 所示, 其中线性插值估计的归一化均方误差为  $-42.998$  dB,  $a(n)$  的估计值和实际值基本一致。

### 3.2. 插值估计判决门限算法

单径瑞利衰落信道使得 EBPSK 调制信号的冲击滤波输出包络出现起伏, 尤其在深度衰落时起伏较明显, 从而影响门限判决, 出现突发误码。插值估计衰落因子算法是一种均衡方式, 校正已失真的波形, 使其恢复到未受瑞利衰落干扰的状态。而插值估计判决门限算法则是利用已失真波形, 自动调整判决门

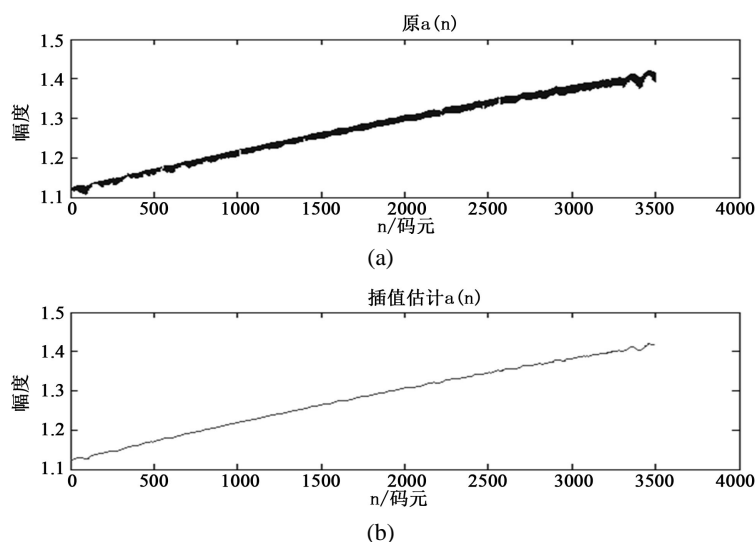


Figure 3. Interpolation estimation  $a(n)$   
 图 3. 线性插值估计衰落因子  $a(n)$  对比

限, 跟踪包络起伏。同样引入 3.1 节提到的线性插值, 对发送码元间隔  $k$  个插入训练码元, 利用训练码元得到不同时刻的判决门限值, 其中判决门限是码元“0”和码元“1”的冲击幅度的均值, 所以设置训练码元为两个相邻的码元“0”和“1”, 从而达到判决门限实时跟踪包络起伏的效果。插值估计判决门限算法主要思路如下:

- 1) 在发送码元中, 间隔  $k$  个插入相邻两个训练码元“1”和“0”即  $s_T(1:k:N)=1$  和  $s_T(2:k:N)=1$ , 其中  $s_T(n)$  为发送码元序列。
- 2) 在接收端, 根据接收到的  $y(1:k:N)$  和  $y(2:k:N)$  (分别为训练码元“1”和“0”的 EBPSK 调制信号经过冲击滤波器后冲击幅度值序列), 进行线性插值估计, 得到  $y_{(1)}(n)$  和  $y_{(0)}(n)$ 。
- 3) 根据  $y_{(1)}(n)$  和  $y_{(0)}(n)$ , 计算  $(y_{(1)}(n)+y_{(0)}(n))/2$  得到判决门限  $T(n)$ , 最后利用实时判决门限进行门限判决, 得到解调信号。

根据上述思路步骤仿真得到线性插值估计的实时门限, 如图 4 所示, 插值估计的判决门限  $T[n]$  基本跟踪上了 EBPSK 衰落起伏信号  $y(n)$  (在式(6)中提到)。

在插值估计判决门限算法和插值估计衰落因子算法中, 间隔  $k$  值的选择非常重要, 当信道衰落起伏波动趋势小, 并且变化缓慢时,  $k$  可选择较大值, 既能满足一定信息传输速率同时保证 EBPSK 解调性能。但当衰落频繁且幅度波动较大时, 为了保证 EBPSK 系统能正常通信, 需牺牲信息传输速率, 使  $k$  值尽量小(3~5 左右)。所以实用中,  $k$  值需要在 EBPSK 系统解调性能和信息传输速率之间进行折中。

#### 4. 仿真结果

通过仿真实验来验证上述抗单径瑞利衰落算法的性能, 并与自适应门限判决[12], 自动增益控制[3]及自动跟踪判决门限[3]的性能进行对比。仿真参数如下: EBPSK 参数: 除了特别说明外, EBPSK 信号调制参数一般均为  $\theta = \pi$  和  $A = B = 1$ , 为简单起见, 载波频率选取  $f_c = 5$  MHz, 为了使 EBPSK 具有良好的频谱特性和解调性能[13], 设置  $K = 2$  和  $N = 20$ ; 插值估计衰落因子和插值估计判决门限参数: 线性插值估计, 间隔  $k = 4$ ; 单径瑞利衰落信道参数: 最大多普勒频移  $f_m = 50$  Hz; 仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可得, 在单径瑞利衰落信道中, 自适应门限判决方法[12]的误码率约为 0.2, 基本无法解调。其它 4 种抗单径瑞利衰落算法都对 EBPSK 的解调性能有所改善。其中插值估计判决门限算法最好, 插值估计衰落因子算法略次之, 自动控制增益系统算法劣于插值估计衰落因子方法, 自动跟踪判决门限算法最差。自动跟踪判决门限算法[3]的解调性能鲁棒性不强, 在深度衰落处, 门限无法完全跟踪包络起伏从

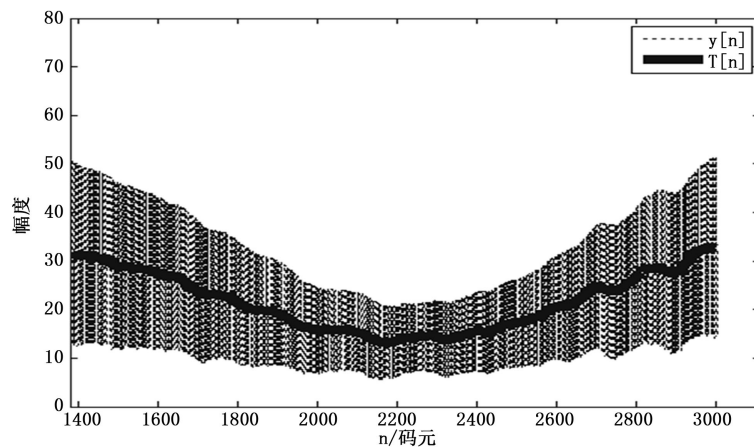


Figure 4. Interpolation estimation decision threshold tracking

图 4. 插值估计判决门限跟踪情况



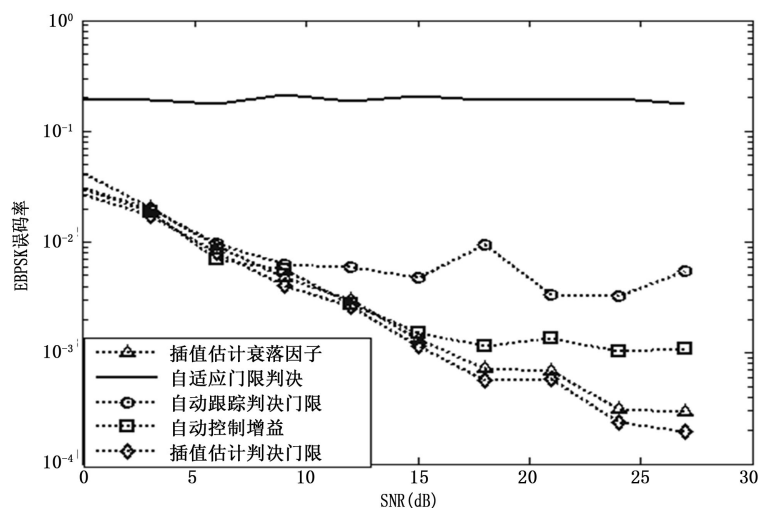


Figure 5. Performance comparison of EBPSK system with different resistance to single path Rayleigh fading

图 5. EBPSK 系统不同抗单径瑞利衰落算法性能对比

而出现误码。然而改进的插值估计判决门限算法能克服自动跟踪判决门限算法的不足,提升了 EBPSK 系统解调性能。在信噪比 SNR=24 dB 时,4 种抗衰落算法误码率分别为  $2.2 \times 10^{-4}$ ,  $3 \times 10^{-4}$ ,  $1.2 \times 10^{-3}$  和  $3 \times 10^{-3}$ , 表明本文提出的插值估计判决门限算法和插值估计衰落因子算法在 EBPSK 系统中抗单径瑞利衰落的优越性。

## 5. 结束语

本文提出两种抗单径瑞利衰落算法用于提升 EBPSK 系统在高速移动环境下的传输性能。误码率对比仿真结果表明,相比于已有的基于 EBPSK 抗单径瑞利衰落算法,本文所提出的两种算法的抗单径瑞利衰落性能均有了一定的提升,其中插值估计判决门限算法最好。以后可借助本文算法,进一步研究基于 EBPSK 的多径衰落信道解调算法。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(No.61271204); 国家十二五科技支撑计划资助项目(No.2012BAH15B00)。

## 参考文献 (References)

- [1] 吴乐南 (2013) 试论独占加共享的频谱划分模式. *电波科学学报*, **4**, 28.
- [2] 吴乐南 (2007) 超窄带高速通信进展. *自然科学进展*, **10**, 143-149.
- [3] 常虹 (2012) 基于 EBPSK 调制的短波变速通信系统. 硕士学位论文, 东南大学, 南京.
- [4] 姚誉, 吴乐南, 常虹 (2013) 基于二元相移键控体制的短波信道快速估计. *电波科学学报*, **3**, 003.
- [5] 姚誉, 高峻, 吴乐南 (2014) 基于双频 EBPSK-MODEM 的雷达通信机研究. *电子与信息学报*, **8**, 1786-1791.
- [6] 宋文慧, 吴乐南 (2013) 用于 EBPSK 系统的多径信道小波变换线性均衡器. *东南大学学报: 自然科学版*, **1**, 12-16.
- [7] 冯慢, 高鹏, 吴乐南 (2010) 超窄带调制信号的特殊滤波分析与仿真. *东南大学学报(自然科学版)*, **2**, 227-230.
- [8] 冯慢 (2008) 高效调制的关键问题研究. 博士学位论文, 东南大学, 南京.
- [9] Wu, L.N. and Feng, M., Qi, C.H. and He, F. (2011) Recent patents on ultra narrow band modulations. *Recent Patents on Signal Processing*, **1**, 36-47. <http://dx.doi.org/10.2174/2210686311101010036>

- [10] 邬民莺, 夏志忠 (2003) Clarke 模型的 MATLAB 仿真. *通信技术*, **7**, 35-39.
- [11] 杨浩, 桑林 (2012) 瑞利衰落信道 Jakes 模型的研究与性能分析. *现代电信科技*, **8**, 26-28.
- [12] 吴乐南, 应鹏魁 (2010) 扩展的二元相移键控调制解调器. 发明专利号: ZL2010 20649416.2.
- [13] Zhu, R.X. and Wu, L.N. (2007) Nonlinear geometric feature equalizers based on minimum bit error rate criterion for EBPSK communications. *Proceedings of SPIE*, Wuhan, 10-11 November 2007.  
<http://dx.doi.org/10.1117/12.773760>