

# 瑞利衰落信道下扩频通信系统抗多径干扰性能研究\*

## Anti-Multipath Capability in Spread Spectrum Communication System over Rayleigh Fading Channels

张平华,朱运航

ZHANG Ping-hua, ZHU Yun-hang

(湖南信息职业技术学院信息工程系,湖南长沙 410200)

(Department of Information Engineering, Hunan College of Information, Changsha, Hunan, 410200, China)

**摘要:** 在一种新的实用瑞利衰落信道下,存在加性高斯白噪声,对直接序列扩频(DSSS)通信系统抑制码片内、外多径干扰的能力进行理论分析与计算机仿真。证实扩频通信系统在多径瑞利衰落信道中传输时能有效地克服多径衰落;在多径衰落信道较强的条件下,与提高扩频增益相比,增加扩频码的码长对于提高移动通信系统的抗多径衰落性能更加有效,但是扩频增益并非越高越好,需合理选取。

**关键词:** 通信系统 误比特率 扩频增益 多径衰落

中图分类号:TN914.42 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2012)04-0341-04

**Abstract:** Firstly, the effects of multipath fading with time delay shorter or longer than one chip interval on direct sequence spread spectrum (DSSS) are mathematically and experimentally researched in multipath Rayleigh Fading channels. Secondly, under the software environment of MATLAB/Simulink, the relationship curves of the bit error rate (BER) and the signal-to-noise ratio (SNR) of DSSS communication systems are presented. Simulation results indicate that DSSS system can efficiently overcome multipath fading in multipath Rayleigh Fading channels. The spreading gain is not the higher the better, so that it must be chosen reasonably. In addition, compared with improving the spreading gain, increasing the PN code length is more effective on improving the anti multipath fading performance of the whole communication system.

**Key words:** communication systems, bit error rate (BER), spreading gain, multipath fading

当前很多军民用通信均采用扩频通信系统的通信方式,其中以直接序列扩频技术应用最广。扩频通信方式被广泛采用的主要原因之一是它对干扰,尤其是对于移动通信中较棘手的多径干扰有很强的抑制能力。近年来,直扩通信理论和方法都有了较快的发展,文献[1]通过CDMA的仿真发现增加码长和提高信噪比(SNR)可以加强单元带宽的传输速率。文献[2,3]模拟仿真发现直扩通信可以有效解决多径衰落对通信系统的影响。文献[4]研究扩频通信多径瑞利

衰落信道扩频增益、扩频码(PN)码长、多频勒频移等特性,仿真证实了在多径瑞利衰落信道下,扩频通信系统能够有效地克服多径衰落和多普勒频移,但是并未说明如何选取合理参数。本文在一种新的实用瑞利衰落信道下,存在加性高斯白噪声,对直接序列扩频(DSSS)通信系统抑制码片内、外多径干扰的能力进行理论分析与计算机仿真,从而证实了在多径衰落信道较强的情况下,与提高扩频增益相比,增加扩频码的码长能够更有效地提高系统抗多径衰落性能,并提出扩频增益并非越高越好,需合理选取。

### 1 瑞利衰落信道模型

以文献[5,6]研究验证的改进型的实用瑞利衰落信道模型作为研究的数学模型,其低通衰落过程表

收稿日期:2012-06-27

作者简介:张平华(1980-),女,讲师,硕士,主要从事通信与信息处理研究。

\*湖南省教育厅科研项目(09C1259)资助。

示为:

$$\begin{cases} R(t) = T_c(t) \cos \omega_c t + T_s(t) \sin \omega_c t \\ T_c(t) = \frac{2}{\sqrt{M}} \sum_{n=1}^M \cos(\psi_n) \cos(\omega_m t \cos \alpha_n + \varphi) \\ T_s(t) = \frac{2}{\sqrt{M}} \sum_{n=1}^M \sin(\psi_n) \cos(\omega_m t \cos \alpha_n + \varphi) \\ \alpha_n = \frac{(2n-1)\pi + \theta}{4M} (n = 1, 2, \dots, M) \end{cases}, \quad (1)$$

式(1)中:  $\omega_c$  表示载波角频率,  $\omega_m$  表示最大多频勒频移,  $N$  表示路径数,  $\alpha_n$  表示第  $n$  条路径的到达角,  $\varphi$  表示初始相位,  $M = N/4$ 。

在频率选择性衰落的情况下, 假定  $t$  时刻的传播时延为  $\tau$ , 瑞利信道模型的冲激响应为  $h(t)$ , 含有  $N$  个多径信号, 则  $h(t)^{[7]}$  可以表示为:

$$h(\tau, t) = \sum_{n=1}^L h_n(t) \delta(\tau - \tau_n), \quad (2)$$

每个  $h_n(t)$  是独立复高斯随机过程, 并且具有平坦衰落信道冲激响应的特性。若信道输入信号的复包络为  $\mu(t)$ , 信道的输出可以表示为:

$$u_0(t) = \sum_{n=1}^L h_n(t) \mu(t - t_n), \quad (3)$$

## 2 扩频通信系统抗多径干扰性能分析

### 2.1 理论分析

多径干扰是移动通信中最常见的干扰, 在城市环境中, 这种干扰变得尤为严重。多径干扰是由于电波在传播时遇到各种反射体(如电离层、对流层、山脉、高楼等)引起的反射或者散射, 使发送信号通过不同路径到达接收端。在接收端, 通过不同路径到达的信号进行矢量叠加, 形成随机衰落信号。多径干扰信号的频率选择性衰落与路径差引起的传播延时  $\tau$ , 使信号产生严重的失真和波形展宽并导致信息重叠。这不仅会引起噪声增加和误比特率(BER)上升, 通信质量降低, 甚至可能使通信中断。

瑞利信道的冲激响应为  $h(t)$ , 接收到的基带信号:

$$r(t) = h(t) \otimes s(t) + n(t) + J(t), \quad (4)$$

若发射机直接到达接收机的传播时延为  $\tau_0$ , 信号功率到达接收机的信号幅值为  $\sqrt{2P}$ , 则接收到的直达信号为:

$$u_0(t) = \sqrt{2P} d(t + \tau_0) c(t + \tau_0) \cos \omega_c [(t + \tau_0) + \varphi], \quad (5)$$

若接收机与直接到达的发射信号同步, 忽略有关载波频率的高次项, 假设多径路径为  $k$  条, 记  $i = 1,$

$2, 3, \dots, k$ , 第  $i$  条路径到达接收机时延为  $\tau_i$ , 对应的信号衰减因子为  $\alpha_i(t)$ , 则到达接收机的多径衰落信号<sup>[7]</sup> 记为:

$$u_m(t) = \sum_{i=1}^k \{ \alpha_i(t) d(t + \tau_i) c(t + \tau_i) \times c(t + \tau_0) \cos \omega_c (\tau_i - \tau_0) \}, \quad (6)$$

扩频通信系统采用  $0 \rightarrow T$  (信息数据脉宽) 的相关积分滤波器, 在  $\tau_0 \rightarrow T$  的积分期间,  $d(t + \tau_i)$  是某一常数  $d_i$ ,  $\cos \omega_c (\tau_i - \tau_0) \leq 1$ ,  $c(t + \tau_i) c(t + \tau_0)$  是扩频序列的自相关函数  $R_c(t)$ , 则(5)式改写为:

$$u_m(t) = \sum_{i=1}^k \{ \alpha_i(t) d_i R_c(\tau_i - \tau_0) \}, \quad (7)$$

由(7)式可见, 多径衰落信号解调后与扩频序列的自相关函数有关。由于伪随机序列具有尖锐的自相关特性, 因而对多径效应不敏感。

1) 当  $\tau_i > \tau_0$  且  $T_c \leq \tau_i - \tau_0 \leq (N-1)T_c$  时, 即当多径干扰为码片外干扰时,  $R_c(\tau_i - \tau_0) = -1/N$ , 那么多径衰落噪声输出的平均值  $E(v_m(t))$  满足:

$$E(v_m(t)) \leq \sqrt{2p} T d k / N, \quad (8)$$

一般地,  $\alpha_i(t) \leq \sqrt{2p}$ 。可见, 每路多径信号的强度至少减弱至直达信号的  $1/N$ , 则功率减弱至  $1/N^2$ 。一般情况下  $N \gg 1$ ,  $N \gg k$ , 则  $E(v_m(t)) \leq \sqrt{2p} T d$ , 说明采用扩频通信方式能抵抗多径衰落。

2) 当  $0 \leq \tau_i - \tau_0 \leq T_c$  时, 即当多径干扰为码片内干扰时,  $R_c(\tau_i - \tau_0) = T - T(\tau_i - \tau_0) / T_c > 0$ , 通过积分滤波, 由式(4)可以得到到达接收机的衰落信号满足:

$$u_m(t) \leq 2dT \sum_{i=1}^k \alpha_i(t) T (1 - \frac{\tau_i - \tau_0}{T_c}), \quad (9)$$

式(9)说明多径衰落与解调后直达信号  $\sqrt{2p} T d$  符号相同, 有用数据  $\sqrt{2p} T d > 0$ ,  $u_m(t) > 0$ , 此时的多径衰落相当于增强了有用信号, 被视为有用信号的一部分, 对有用信号的幅度有影响, 但不产生对伪码宽度的展宽或压缩<sup>[7]</sup>。

### 2.2 仿真分析

对二进制相移键控(BPSK)调制信号在多径瑞利信道下, 存在加性高斯白噪声, 用 MATLAB/Simulink 对瑞利衰落信道下的扩频通信系统的性能进行仿真(图 1), 其中仿真参数为: 信息速率 10M/s, 载波频率 1GHz, 码长 63。

#### 2.2.1 DSSS 通信系统抗多径瑞利衰落仿真

为了得出各种信道对通信系统性能的影响情况, 对 BPSK 调制信号分别在加性高斯白噪声信道环境、多径瑞利衰落信道环境下的传输性能做比较研究。从图

2 可以看出,在误比特率为 0.01 时,加性高斯白噪声信道的信噪比为 14dB,添加多径瑞利衰落信道的信噪比为 18 dB,直接序列扩频通信系统在多径瑞利衰落信道下的信噪比为 12dB;并且在任意时刻,无论信噪比达到多少,直接序列扩频通信系统的误比特率都要比衰落信道下的误比特率低,从而得出在多径瑞利衰落的影响下,直接序列扩频通信系统具有良好的性能,大大减少了多径瑞利衰落。

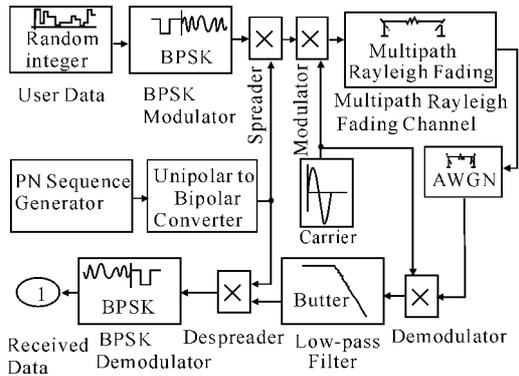


图 1 BPSK-DSSS 的 MATLAB/Simulink 仿真模型  
Fig. 1 The MATLAB/Simulink simulation model of BPSK-DSSS

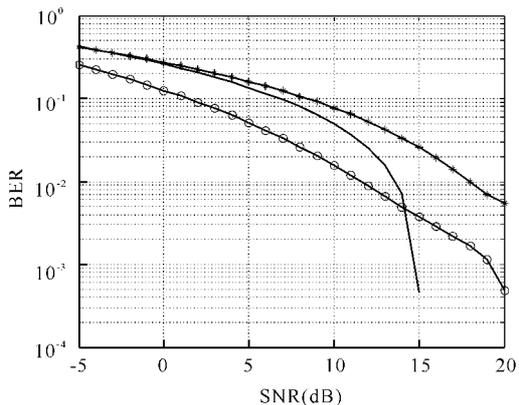


图 2 不同信道下 BPSK 系统误比特率仿真结果

Fig. 2 The BER curve of BPSK system in different channels

---: AWGN+Rayleigh, —: AWGN, ○: DSSS.

### 2.2.2 误比特率和扩频增益

扩频码的码速率  $R_c = 1/T_c$ , 码速率决定系统的传输带宽, 其中  $T_c$  为码片宽度。通过上节的分析可知, 直扩系统能否抵抗多径干扰取决于多径延时  $\tau$  与码片宽度  $T_c$  之比。假设信道固定, 即多径延时  $\tau$  固定, 则采用不同的码速率, 就决定了系统抵抗多径的性能。

图 3 分别给出了 PN 码速率  $R_c$  为 200 M/s、400 M/s、800M/s(扩频增益为 20、40、80), PN 码长为 31 时的直扩通信系统在瑞利衰落信道下的比特误比特率(BER)曲线。由图可见, 当扩频增益由 20 增至 40

时, 误比特率降低, 可是当扩频增益增至 80 时, 对应误比特率反而增大。

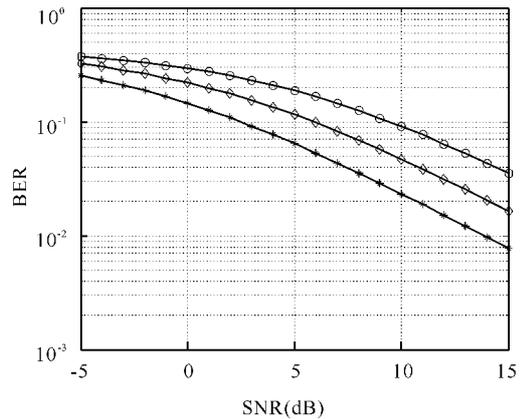


图 3 不同扩频增益下 DSSS 的 BER/SNR 关系曲线

Fig. 3 The BER/SNR curve of DSSS as the spreading gain changes

○:  $G=20$ , +:  $G=40$ , □:  $G=80$ .

当扩频增益在 20~40 之间, 误比特率随扩频增益提高而降低, 可从以下 2 个角度分析:

1) 当信道固定,  $R_c$  增大时,  $T_c$  减少, 则更多的多径干扰分量落在码片外。而直扩系统抵抗码片外干扰比抵抗码片内多径干扰的能力强很多, 因此系统的误比特率必然降低。

2) 对于码片内干扰部分,  $\tau_i - \tau_0$  不变, 则随着  $R_c$  的增大,  $T_c$  减少,  $(\tau_i - \tau_0)/T_c$  的增大将会导致多径干扰的作用减少。

因此, 对于以上的讨论, 码速率的提高将有助于提高系统的误码性能, 希望采用高的码速率。

但是当扩频码速率提高到一定程度后, 反而导致系统性能并非随着扩频增益的提高而提高, 分析如下:

若扩频通信系统中进入接收机的镜像分量能量为  $E_s$ , 散射分量的能量为  $E_d$ , 可以得到系统平均误比特率的表达式如式(10)<sup>[8]</sup>所示:

$$BER = \frac{\exp\{- (E_s/N_0) / [2 + (E_d/N_0)]\}}{2 + (E_d/N_0)}, \quad (10)$$

式(10)中:  $E_d$  为进入接收机的有效散射分量能量,  $R_c$  增大时,  $E_d$  减小而  $E_s$  不变。

由图 4 可见, 当  $E_s/N_0$  固定时, 误比特率(BER)随着  $E_d/N_0$  变大先增大再减小。因为  $E_d/N_0$  较小时, 镜像分量占主导地位, 信道为典型的 Rician 信道, 此时当  $R_c$  减小将导致系统误比特率增大,  $R_c$  减小即  $E_d/N_0$  增大, 因此,  $E_d/N_0$  增大将导致系统误比特率增大, 这种情况在  $E_s$  越大时越明显; 当  $E_d/N_0$  较大, 散射分量占主导地位时, 信道由 Rician 信道向

瑞利信道过渡,这种情况下由于没有明显主径,接收机随机选取能量较大的散射分量进行解扩,因此  $E_d/N_0$  能量的增大有利于系统误比特率的降低。

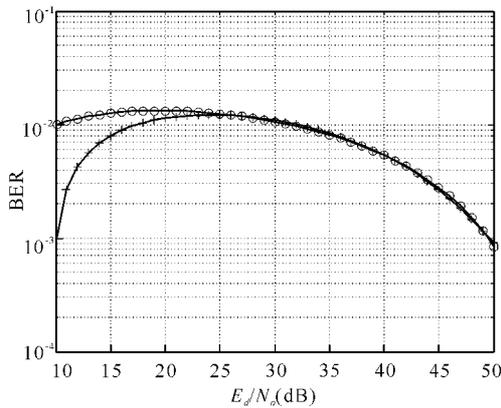


图4 固定  $E_s$  下  $E_d$  与误比特率关系曲线

Fig.4 The  $E_d$  vs. BER in fixed  $E_s$

+:  $E_s/N_0 = 18\text{dB}$ , o:  $E_s/N_0 = 12\text{dB}$ .

综上所述,对于任意的  $E_s$ , 存在一个区间(经验值  $10E_d/N_0 < E_s/N_0$ ), 随着码速率的增加能够降低系统误比特率;倘若信道中  $E_d$  占主导地位,增大码速率反而会使系统误比特率增加。另外,当存在显著多普勒频移时,我们更倾向于使用比较高的码速率。因此,最佳的码速率要根据信道参数以及接收机复杂度合理选择。

### 2.2.3 误比特率和 PN 码长

图5给出了PN码速率  $R_c$  为 400M/s, PN码为 31、63、127 时的直扩系统在瑞利衰落信道下的误比特率(BER)性能曲线。从图中可以看出,码长的增加反而会使误比特率增加,这说明单纯增加  $m$  序列的码长对降低误比特率是没有帮助的。而对于码片外多径干扰的部分,  $N_s$  是对多径干扰的抑制比,取值太小时对干扰可能抑制不足,会引起误码性能下降;所以必须合理选择码长。

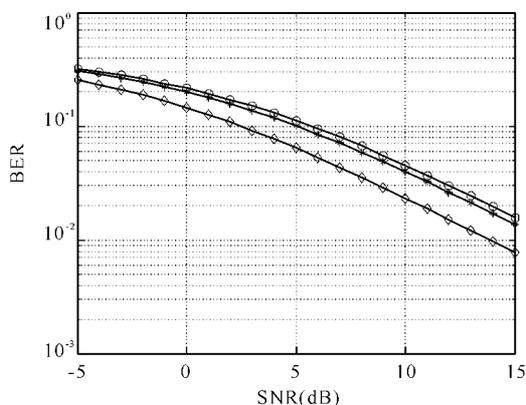


图5 不同码长下  $m$  序列 DSSS 的 BER/SNR 关系曲线

Fig.5 The BER/SNR curve of DSSS as the code length of  $m$  sequence changes

◇: PN=31, +: PN=63, ○: PN=127.

从图2~图5可以看出,扩频通信系统在多径瑞利衰落信道下误比特率保持在 0.003~0.16。对比图3和图5可以看出,在瑞利衰落信道下,增加 PN 码长所对应的误比特率性能优于提高系统扩频增益所对应的误比特率性能,也即在同等条件下,增加 PN 码长将更有利于改善系统抗多径衰落性能。

### 3 结束语

本文在一种新的实用瑞利衰落信道下,存在加性高斯白噪声,对直接序列扩频通信系统抑制码片内、外多径干扰的能力进行理论分析,并构建 MATLAB/Simulink 模型进行仿真分析,结果表明直扩通信系统在该多径瑞利衰落信道中传输时能有效地克服多径衰落,但是并不能解决信道在极其恶劣的情况下信号的传输质量问题。同时证实了在多径衰落较强的条件下,与提高扩频增益相比,增加 PN 的码长对于提高移动通信系统的抗多径衰落性能更加有效。

参考文献:

- [1] Xue C J. Anti-interference performance of multi-path direct sequence spread spectrum wireless communication system[C]. 2010 International Conference on E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies, IEEE, 2010, 1:461-464.
- [2] 吕义东,周铭. 多径衰落下通信系统的分析与仿真[J]. 实验科学与技术, 2009(4):18-20.
- [3] 石艳丽,于海霞. 多径衰落信道下扩频通信系统的仿真研究[J]. 电子测量技术, 2009, 32(11):31-33.
- [4] 郭佳,欣韩焱. 瑞利衰落信道下的直序扩频通信系统性能分析[J]. 信息与控制, 2009, 38(3):337-341.
- [5] Zheng Y R, Xiao C S. Simulation model with correct statistical properties for rayleigh fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(6):920-928.
- [6] 朱运航,屈辉立. 一种改进型的无线信道模型研究[J]. 无线通信技术, 2011(01):34-36.
- [7] 曾兴雯,刘乃安,孙献璞. 扩展频谱通信及其多址技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004: 12-105.
- [8] Viterbi A I. Spread spectrum communications: myths and realities[J]. IEEE Commu Magazine, 50<sup>th</sup> Anniversary Commemorative Issue, 2002, 5:34-41.

(责任编辑:陈小玲 邓大玉)