

基于Python的BPSK直接序列扩频通信系统 仿真及性能研究

耿晓琴¹, 刘亚楠², 张翔², 成睿睿³

(1. 山西职业技术学院 电子与通信工程系, 山西 太原 030000; 2. 浙江财经大学 信息技术与人工智能学院, 浙江 杭州 310018; 3. 深圳清大协力科技有限公司, 广东 深圳 518081)

摘要: 针对直接序列扩频系统在不同信道环境下的性能优化问题, 研究不同扩频码型和信道参数对系统误码率的影响。基于Python构建BPSK-DSSS仿真平台, 包含信息编码、扩频调制、多径信道建模及相干解调的全链路过程。采用控制变量法, 分析比较M序列、Walsh码、OVSF码和Gold码在理想、固定衰减、固定延时及多径信道下的性能差异, 重点考察码长、衰减系数、时延及多径数量等参数的影响。实验结果表明: ①码型性能与信道特性密切相关, 其中Gold码在多径环境下表现最优(临界SNR=-56 dB), 误码率较M序列降低35.7%; ②增加码长可有效改善性能, 在典型信噪比下, 误码率幅度可降低50.96%~58.08%; ③当衰减因子小于0.3, 时延大于0.02 s时, 系统性能发生临界反应, 增加多径数量可改善分集增益。系统仿真结果揭示了扩频码型与信道参数对DSSS性能的耦合影响规律, 为实际系统中的码型选择与参数配置提供了关键优化依据。

关键词: 直接序列; BPSK; 扩频通信; Python; 信噪比; 误码率

DOI: 10.11907/rjdk.251345

中图分类号: TN92

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1672-7800(2025)009-0122-11



Simulation and Performance Study of BPSK Direct Sequence Spread Spectrum Communication System Based on Python

GENG Xiaolin¹, LIU Yanan², ZHANG Xiang², CHENG Ruirui³

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, Shanxi Vocational and Technical College, Taiyuan 030000, China;

2. College of Information Technology and Artificial Intelligence, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou 310018, China; 3. Shenzhen Qingda Xieli Technology Co., Ltd., Shenzhen 518081, China)

Abstract: To address the performance optimization problem of direct sequence spread spectrum systems in different channel environments, the influence of different spread spectrum code types and channel parameters on the system error rate is studied. Build a BPSK-DSSS simulation platform based on Python, which includes the entire process of information encoding, spread spectrum modulation, multipath channel modeling, and coherent demodulation. Using the control variable method, analyze and compare the performance differences of M-sequence, Walsh code, OVFS code, and Gold code under ideal, fixed attenuation, fixed delay, and multipath channels, with a focus on the influence of parameters such as code length, attenuation coefficient, delay, and multipath number. The experimental results show that: ①The code performance is closely related to the channel characteristics, among which the Gold code performs the best in multipath environments (critical SNR=-56 dB), with a bit error rate reduced by 35.7% compared to the M sequence; ② Increasing the code length can effectively improve performance, and under typical signal-to-noise ratios, the bit error rate can be reduced by 50.96% to 58.08%; ③ When the attenuation factor is less than 0.3 and the delay is greater than 0.02 s, the system performance undergoes a critical reaction, and increasing the number of multipath paths can improve the diversity gain. The system simulation results reveal the coupling effect of spreading pattern and channel parameters on DSSS performance, providing key optimization basis for pattern selection and parameter configuration in actual systems.

Key Words: direct sequence; BPSK; spread spectrum communication; Python; signal to noise ratio; bit error rate

收稿日期: 2025-05-13

扫描二维码阅读全文:



基金项目: 山西省职业教育教学改革与实践研究项目(202403117); 浙江省基础公益研究计划项目(LGF22F020034)

作者简介: 耿晓琴(1991-), 女, 硕士, 山西职业技术学院电子与通信工程系讲师, 研究方向为电子通信。

0 引言

在通信系统复杂度持续攀升,且与人工智能技术深度融合发展的背景下,仿真平台的选择已成为影响研究效率提升和技术创新突破的关键因素。近年来,Python凭借其开源的生态和强大的技术优势,正逐步取代MATLAB(Matrix Laboratory),成为通信系统仿真的主流平台^[1-2]。Python的核心优势体现在以下几个方面:①开源生态与成本效益。Python完全免费,并拥有丰富的科学计算库(如NumPy、Numerical Python;SciPy, Scientific Python)和深度学习框架(如PyTorch、TensorFlow),为通信算法实现、信号处理和系统仿真提供了完整支持^[3-5]。相比之下,MATLAB的商业授权模式限制了其在边缘计算等场景的灵活部署^[1]。②深度学习与硬件加速。Python的AI生态系统支持高效的图形处理器加速(通过CUDA, Compute Unified Device Architecture)和跨平台部署(通过ONNX, Open Neural Network Exchange),使其成为AI驱动通信算法研究的首选^[4-7]。③硬件集成与原型开发。通过PyUHD(Python Universal Hardware Driver)等库,Python可直接控制通用软件无线电外设(Universal Software Radio Peripheral, USRP)等设备,并与树莓派(Raspberry Pi)等嵌入式平台无缝衔接,加速从仿真到原型的转化^[3]。④高性能计算能力。借助Cython(C-Extensions for Python)和Numba(Numerical Accelerator for Python)等工具,Python在大规模多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)信道估计等计算密集型任务中展现出接近原生代码的效率^[8]。⑤跨学科融合与可视化。Python天然支持通信、AI、网络安全的交叉研究,并提供强大的可视化工具(如Matplotlib、Plotly),有效提升了研究效率^[9-10]。此外,Python活跃的开发者社区和标准化进程进一步巩固了其地位,使其在第六代移动通信技术(6th Generation, 6G)等前沿通信研究中成为事实上的标准平台^[11]。因此,Python的灵活性、扩展性和开源优势使其成为智能通信系统研究的理想选择。

直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)因其保密性、抗干扰能力和稳健性等优势在无线通信中扮演着重要角色。目前,有关通信系统性能的研究大

多借助MATLAB和LabVIEW来构建模型,少数使用软件无线电平台。例如,李毅等^[11]采用USRP平台工具包,在抗窄带噪声等方面验证了DSSS通信技术的良好特性。贾勇等^[12]通过加入几种信道干扰模拟误码率,验证了基于LabVIEW的直接扩频通信实验系统在抗干扰性和保密性方面的优势。靳丽平等^[13]在一定条件下运行MATLAB仿真程序,生成了一部分的时域波形,得出检波前后用户信息波形基本一致的结论。曾璐等^[14]分别对是否有脉冲干扰的高斯白噪声信道及复高斯白噪声信道中误码率与信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)的关系进行了仿真研究,验证了扩频通信在负SNR下也可以实现通信。孙德辉等^[15]分析了DSSS前后系统误码率与SNR的关系,表明直接扩频信号较不扩频更准确可靠。马晓青^[16]对直扩系统误码率、SNR与扩频增益的关系进行了研究,证实在误码率不变的情况下增加扩频增益可提高系统的抗干扰性能。周风波等^[17]在高斯信道下采用QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)调制,发现3阶M序列与Gold码的性能相似。Zhu等^[18]利用MATLAB对扩频通信的过程进行仿真,介绍了各个模块的具体作用和参数,得到时域和频域的仿真结果,验证了扩频通信在高噪声环境下的信号传输能力。Ahmed等^[19]通过仿真验证了DSSS系统在多信道条件下的低误码率特性,证实了其优异的抗干扰能力。Deshmukh等^[20]在DSSS系统中比较了BPSK(Binary Phase Shift Keying)、QPSK等调制方式的误码性能,结果表明DSSS-BPSK组合具有最优的误码纠正性能。以上文献大多是对扩频增益与SNR、误码率及一定条件下误码率与SNR的关系进行了探究,缺乏对扩频通信系统性能衰减因子、延时、多径及扩频码影响的分析。

为此,本文借助Python语言构建直接序列BPSK扩频通信系统仿真平台,包含信息编码、扩频调制、射频调制及相应的射频解调、扩频解调、抽样判别等核心模块。同时,通过模拟实验分析信号传输过程中扩频通信系统的性能,为后续深入研究扩频通信系统性能及其优化设计提供一个有效的仿真建模平台。

1 BPSK DSSS通信系统原理

BPSK DSSS通信系统原理如图1所示。

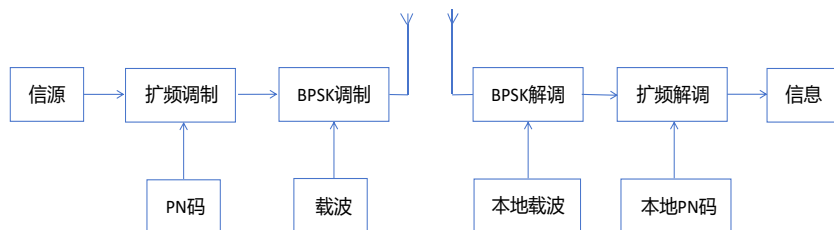


Fig. 1 Principles of BPSK DSSS communication system

图1 BPSK DSSS通信系统原理

信源可表示为:

$$a(t) = \sum a_n g_a(t - nT_a) \quad (1)$$

式中:信源的码元宽度 $T_a = 1/R_a$, R_a 为速率; a_n 为信息码; $g_a(t)$ 为门函数。

伪噪声码(Pseudo-Noise Code, PN 码)表示为:

$$b(t) = \sum b_n g_b(t - nT_b) \quad (2)$$

式中: $T_b = 1/R_b$, R_b 为伪随机序列速率; b_n 为扩频序列。

将该扩频码与码率较低的原始信号 $a(t)$ 相乘,即可得到频谱扩展后的信号 $c(t)$ 。表示为:

$$c(t) = a(t)b(t) = \sum c_n g_c(t - nT_c) \quad (3)$$

式中: c_n 为 a_n 与 b_n 的乘积序列。

射频调制后的信号 $d(t)$ 为:

$$d(t) = c(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (4)$$

式中: f_c 为载波频率。

调制后的信号被发往接收端,经过信道后,接收端的接收信号可表示为:

$$r(t) = d(t) + n(t) \quad (5)$$

式中: $n(t)$ 为噪声和干扰。

对接收信号进行滤波去噪后得到 $d(t)$,与本地载波 $\sin(2\pi f_c)$ 相乘实现射频解调,得到:

$$\begin{aligned} r'(t) &= d(t) \cdot \sin(2\pi f_c t) \\ &= c(t) \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot \sin(2\pi f_c t) \\ &= c(t) \cdot \frac{1 - \cos(4\pi f_c t)}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

$r'(t)$ 经过滤波得到:

$$s'(t) = \frac{1}{2} c(t) \quad (7)$$

为将信号频带恢复至原始宽度,利用同一扩频码序列 $b(t)$ 与 $s'(t)$ 相乘进行解扩,再乘以 2,可得:

$$\begin{aligned} a'(t) &= 2 \cdot s'(t) \cdot b(t) = 2 \cdot \frac{1}{2} c(t) \cdot b(t) \\ &= a(t) \cdot b(t) \cdot b(t) = a(t) \end{aligned} \quad (8)$$

至此,已恢复到原始信号 $a(t)$ 。

2 系统设计与实现

2.1 系统结构与实现方法

本文系统涵盖信号生成、调制、传输、接收及解调等多个核心模块,发送端、信道、接收端系统结构分别如图 2、图 3、图 4 所示,PN 码的生成过程如图 5 所示。系统涉及 Python 语言的 Numpy 库、Scipy 库和 Matplotlib 库,分别进行

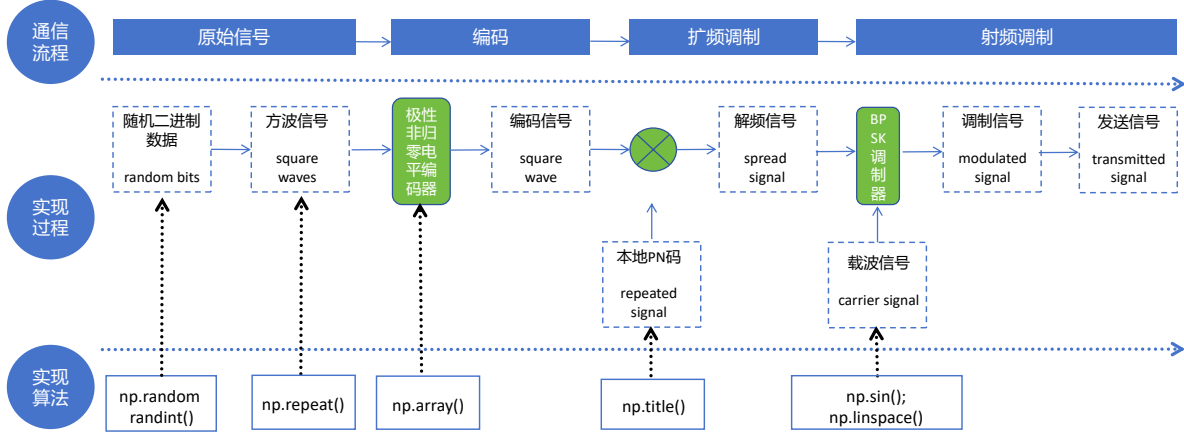


Fig. 2 Structure of transmitting terminal

图2 发送端结构

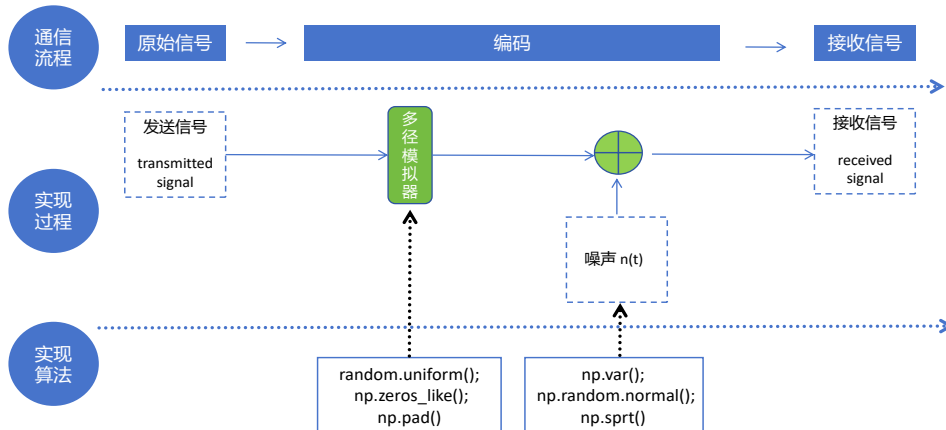


Fig. 3 Channel model

图3 信道模型

数值计算、信号处理以及数据可视化。各模块的具体实现步骤如下:

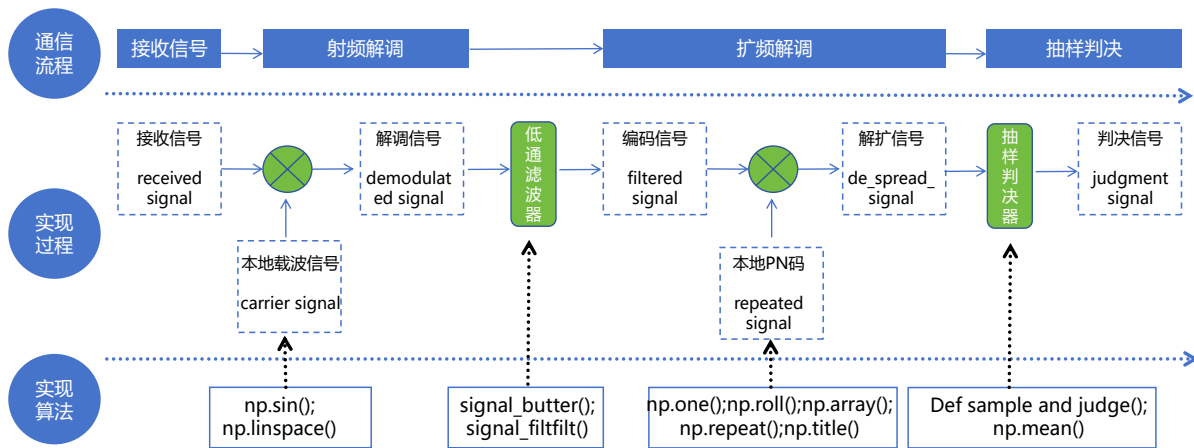


Fig. 4 Structure of receiving terminal

图4 接收端结构

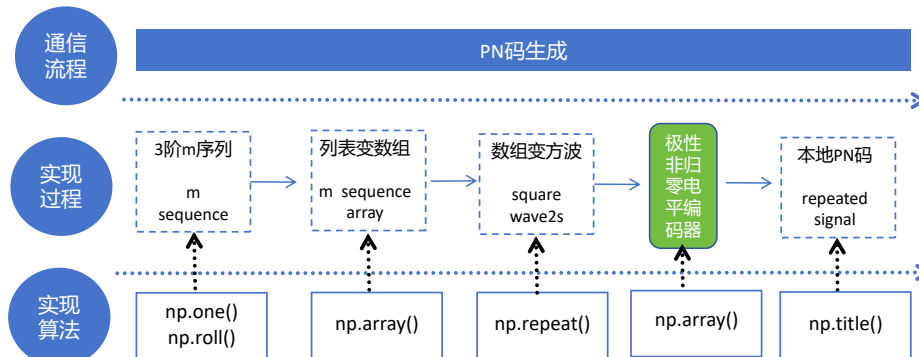


Fig. 5 The process of generating the PN code

图5 PN码生成过程

2.1.1 信息编码

该模块旨在生成一种极性非归零码信号,该信号由特定长度的二进制数据序列转换而来。首先,利用 `np.random.randint()` 函数生成一组代表信息位序列的随机二进制数据;其次,通过 `np.repeat()` 函数将每个二进制位重复多次来扩展信号长度,模拟方波信号 `Square_wave1s` 的生成过程,以确保信号在时间和幅度上的连续性;最后,应用 `np.array()` 函数将前述生成的二进制值转换为对应的极性非归零码形式,即将0和1分别映射为-1和1。

2.1.2 扩频调制

M序列是在线性反馈移位寄存器结构下生成的典型伪随机噪声序列。利用 NumPy 库中的 `np.ones()` 和 `np.roll()` 函数构造一个由0和1组成的3阶M序列 `m_sequence`。为了将生成的M序列从列表格式转换为数组,并用于扩频调制,首先将其转换为极性非归零码((Non-Return-to-Zero, NRZ码);其次通过 `np.repeat()` 和 `np.tile()` 函数,将M序列重复扩展至所需长度,并重复原始二进制数据位数个周期,以匹配待调制的二进制数据序列;最后将扩频码(即重复的M序列)与极性非归零码信号 `square_wave1` (假设为待调制的信号)相乘,生成扩频信号 `spread_signal`。

2.1.3 射频调制

二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制作为一种基础且重要的数字调制技术,其核心机制是将二进制数字信息精准映射到不同相位的正弦波上,以此实现数字信号在模拟信道中的有效传输。在BPSK中,通常采用0和180°两个相位区分二进制数字0和1,使用 `np.linspace()` 和 `np.sin()` 函数生成载波信号,将扩频信号与载波信号相乘,从而实现信息调制。当扩频信号为1时,调制信号与载波信号相同;为-1时,则为反相。

2.1.4 射频解调

为实现BPSK相干解调的相位解调,在接收端生成与发送端频率、相位一致的本地载波信号,并与接收信号相乘。为恢复调制前信号,使用 SciPy 库中的 `signal.butter()` 函数和 `signal.filtfilt()` 函数生成和调用巴特沃斯低通滤波器,以滤除相乘后信号的高频分量。

2.1.5 扩频解调

通过滤波信号与PN码序列相乘实现解扩,要求接收端使用PN码序列,与发送端完全相同。对于同步的PN码序列,当它们相乘时,若原始为正,则正正为正;若为负,则负负得正。因此,在解扩过程中将原始信号通过发端和收端两次并与相同的PN码信息相乘,可恢复出原始信号信

息,得到解扩信号。

2.1.6 信息译码

通过解扩的信号已接近原始基带信号,但仍可能包含一些噪声和失真信号。为此,在抽样判决函数中设置一个通常为0的判决门限,将每个抽样点的值与判决门限进行比较。当大于门限时,将抽样点的值判决为“1”,否则为“0”,以此恢复出原始的二进制数据序列。

2.2 算法流程

整个系统实现主要涉及多径信号生成、抽样以及误码率计算3个部分,具体步骤为:

(1)多径信号生成。首先,初始化一个与调制信号形状相同且全为零的数组,用于累加多径信号;其次,对于每一条可能的传播路径,根据该路径的延迟时间和采样频率计算出需要添加的延迟样本数,使用`np.pad`函数在调制信号前添加相应数量的零来模拟延迟效果,并通过切片确保信号长度不变;再次,将延迟后的信号乘以该路径的衰减系数,以反映信号在传播过程中的强度损失;最后,将所有经过延迟和衰减处理的信号累加起来,得到模拟多径效应后的最终信号。

(2)抽样。借助抽样判决函数`sample_and_judge`进行以下3个步骤:①抽样。从指定信号`de_spread_signal`中按照`sample_interval`进行抽样;②平均。按照`samples_per_avg`对抽样值进行分组,并计算每组的平均值;③判决。将平均值与给定的`threshold`进行比较,得出判决结果。

(3)误码率计算。首先,通过模拟生成具有多径效应和噪声干扰的接收信号,其中多径的衰减系数设定为0.1;其次,利用相干检测技术与本地载波信号进行同步解调,得到解调后的信号;再次,通过低通滤波器去除高频噪声,使用与发送端相同的扩频码对信号进行解扩处理;接着,采用抽样判决函数对解扩后的信号进行判决,得到接收比特序列;最后,通过比较接收比特序列与原始发送比特序列计算出误码率,并在不同SNR(E_b/N_0)下重复该过程,最终绘制出误码率随SNR变化的曲线图。

2.3 多径信道下DSSS系统误码率仿真伪代码

为完整描述DSSS通信系统的仿真流程,本节给出其结构化伪代码。该伪代码实现了从信号生成、扩频调制、多径信道建模到误码率分析的完整链路仿真。具体为:

输入:采样率(F_s),仿真时长(T),比特率(R_b),信噪比范围(E_b/N_0)

输出:多径数量 $N \in \{20, 60, 100\}$ 对应的误码率曲线

1:初始化绘图参数(字体、坐标轴样式)

2:生成发射信号:

2.1 生成随机二进制序列 $b \in \{0, 1\}^{1000}$

2.2 将 b 映射为双极性方波 $s(t) \in \{\pm 1\}$

2.3 生成3阶M序列作为扩频码 $c(t)$ (反馈多项式: $x^3 \oplus x + 1$)

2.4 计算扩频信号: $s_spread(t) = s(t) \cdot c(t)$

3:对每个多径数量 N 执行:

3.1 对每个 E_b/N_0 值执行

3.1.1 模拟多径信道

- 生成 N 个随机延迟 $\tau_n \sim \text{Uniform}(0, 20\text{ms})$

- 生成 N 个随机衰减 $\alpha_n \sim \text{Uniform}(0, 1)$

- 计算多径信号: $r(t) = \sum \alpha_n \cdot s_spread(t - \tau_n)$

3.1.2 添加高斯白噪声 $n(t) \sim N(0, \sigma^2)$,其中 σ^2 由 E_b/N_0 决定

3.1.3 相干解调 $\rightarrow$ 低通滤波 $\rightarrow$ 解扩

3.1.4 调用抽样判决函数(阈值=0,平均样本数=300)

3.1.5 计算误码率 $BER = \text{错误比特数} / \text{总比特数}$

4:绘制 BER vs. E_b/N_0 曲线(对数坐标)

3 仿真性能分析

3.1 对比与验证

基于文献[18]的通信系统模型及其参数,对本文系统的正确性进行仿真验证。其中,系统发送端采用BPSK射频频调制与DSSS相结合的传输方案,接收端采用先解扩后解调的信号处理流程。具体参数设置为:用户输入数据序列为0101101,经极性转换后得到对应的非归零码序列;PN码为0111100;载波频率为3/100,幅度为2、初始相位为 $\pi/2$ 。扩频调制后,添加20 dB的高斯白噪声干扰以模拟实际信道条件。图6为本文系统与文献[18]的时域波形比较结果。可以看出,各处理阶段的信号波形与文献结果具有良好的一致性。然而,由于噪声的随机性存在一定差异,导致扩频信号与加性噪声叠加后形成的接收信号不一致(第3个子图),该现象符合理论预期。总体说来,上述比较结果有效验证了本文系统开发的准确性。

3.2 时域与频域特性

在信道仿真中引入多径效应和噪声干扰,以评估其对系统时域与频域性能的影响。以发送10个随机二进制数据为例,参数设置为:SNR为10 dB,采样率为1 000 Hz,多径数量为3,各路径的延迟时间和衰减分别为 $[0, 0.02, 0.05]$ 和 $[0.4, 0.3, 0.7]$ 。

图7、图8、图9分别为发射端、接收端时域和各阶段频域波形图。具体来说,图7为原二进制数据经扩频和BPSK调制而成的的信号波形。由于扩频调制的作用,原始数据被扩展到一个更宽的频带上,这有助于在接收端更好地降低抗噪声和多径效应的影响。图7(a)中将输入的原始二进制数据(此处选用0100100100)首先经过极性归零码电平编码器,得到极性非归零码;其次与7位PN码片相乘,完成扩频。图7(b)显示了扩频信号调制到载波上的过程。当扩频信号为1时,输出的调制信号为正弦波;当为-1时,则输出相位相反的波形,实现BPSK调制。图7(c)为由调制信号经过多径衰落和噪声作用得到的接收信号。

图8为接收端的信号波形。由于多径效应的存在,接收信号呈现出多个延迟分量的叠加,这可能导致信号波形发生畸变,增加了解调的难度。从图8(a)和(b)可以看出,接收和解扩信号的波形均受到多径效应的影响,但图8(c)

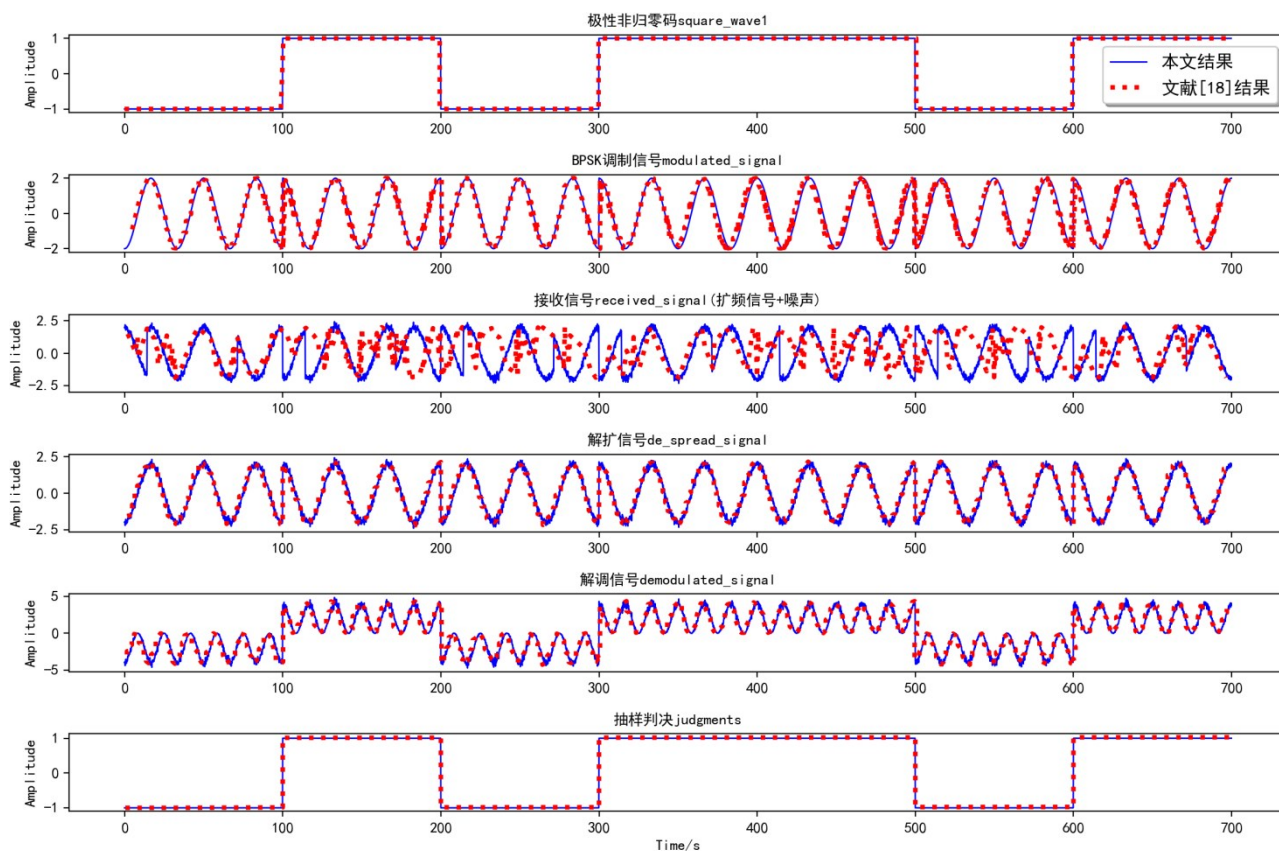


Fig. 6 Time-domain waveform comparison result

图6 时域波形比较结果

仍能正确地恢复原来的信号并实现解调。

在多径环境下,频域波形可能出现频谱展宽和重叠的现象。由图9可以看出,与原始信号相比,扩频信号的带宽明显增宽。经调制后,频谱被搬移到50 Hz左右,便于无线传输。接收端因多径幅度衰落和相位移动,频谱受到影响,相比于不考虑多径的情况,最后得到的解扩频频谱更宽,但经抽样判决仍能实现正确解调,表明该系统在多径环境下具有良好性能。

3.3 系统误码率性能测试

为分析直接扩频通信系统的误码率性能及其随SNR的变化,以下发送一定数量的二进制随机码元(如1 000个),并在不同SNR条件下进行测试。

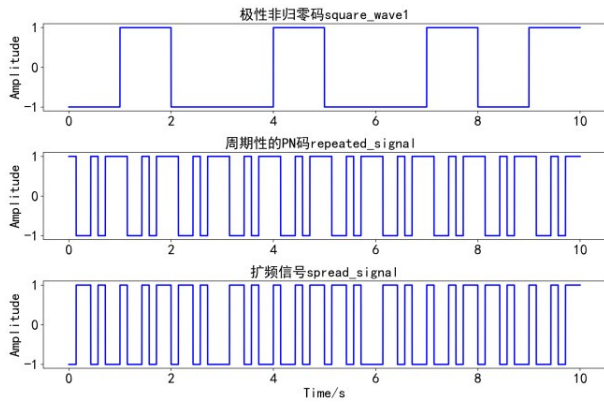
3.3.1 衰减因子的影响

图10为在 $N=1, d=0$ 的条件下,不同衰减系数 a 下误码率随SNR的变化。由图10(a)可知,误码率随着 a 的减小(即衰减程度增大)而增大,表明较小的衰减系数将导致信号在传输过程中产生较大衰减,从而增加了误码的可能性。当 $\text{SNR}=0, a<0.01$ 时,误码率趋于稳定,处于0.5左右,可能是由于在极低SNR和严重衰减的条件下,系统性能主要受限于噪声而非衰减本身。此外,当 $a>0.3$ 时,误码率均为0,说明在该衰减水平下系统性能良好,可准确传输数据。图10(b)进一步揭示了衰减系数 a 与SNR的关系。可以看出,当 a 按10倍递减速率从 10^{-1} 下降到 10^{-5} 时,误码率为0对应的SNR分别约为55 dB、65 dB、75 dB、85 dB、95

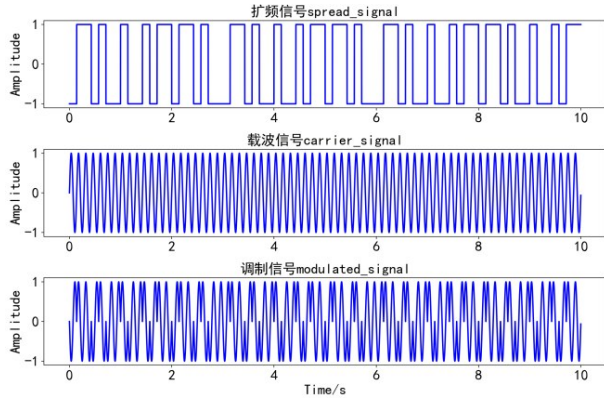
dB,表明衰减系数每缩小10倍,误码率为0所需的SNR大约增加10 dB,这一结果为系统设计与参数优化提供了指导。此外,当SNR为负值时(即信号功率低于噪声功率时),误码率并不会因 a 的变化而发生显著变化,而是稳定在50%附近。这可能是由于当SNR很低时,无论衰减系数如何变化,系统均无法从噪声中提取出准确信号,故存在较高的误码率。

3.3.2 时延的影响

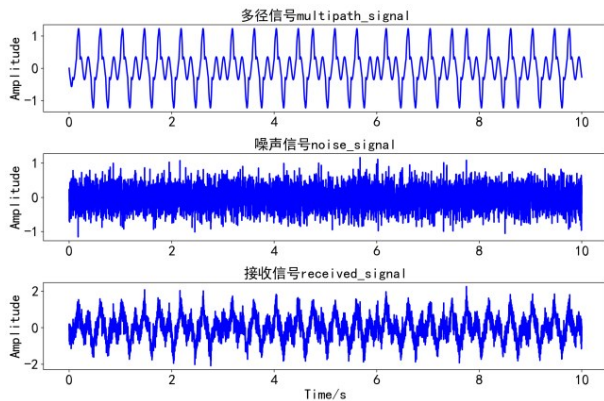
图11为在不考虑多径效应(即单径传播, $N=1$)的条件下,不同时延 d 对系统误码率的影响。通过仿真结果可以观察到两个明显不同的变化趋势。当时延超过0.02 s时,随着SNR的增加,误码率不降反升。可能的原因为过大的时延导致符号间干扰加剧,使接收端难以实现准确的符号同步,接收信号的相位失真超出系统容忍范围。此时,系统可能完全失去对接收信号的有效同步与解码能力,从而导致误码率呈现急剧上升的趋势。在较小时延范围内($d \leq 0.02$ s),系统表现出预期的正常特性。随着SNR的增加,误码率呈现稳定下降的趋势,说明较小的传输时延有效降低了信号波形的失真程度和符号间的相互干扰,接收端能够保持较好的同步性能,此时系统具有较高的可靠性。同时可以看出,时延对通信系统性能的影响存在临界效应。当时延超过某个阈值时(本例为0.02 s),系统性能将急剧恶化。该阈值与系统采用的调制方式、符号周期长度等因素有关。上述规律也说明,在实际系统设计中需严



(a) Spread spectrum modulation
(a) 扩频调制



(b) Radio frequency modulation
(b) 射频调制



(c) Channel transmission
(c) 信道传输

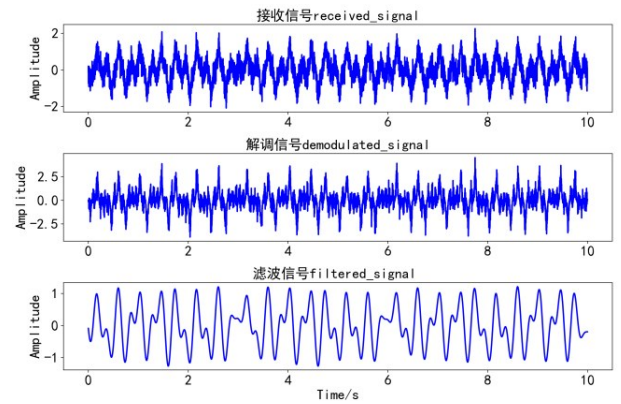
Fig. 7 Time domain waveform of the transmitting terminal

图7 发射端时域波形图

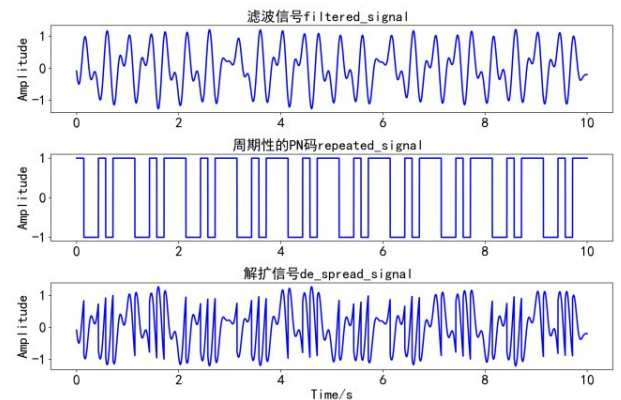
格控制最大允许时延,采用先进的同步算法以及自适应均衡技术,并在必要时引入前向纠错编码等措施,使系统在一定时延下仍能保持良好性能。

3.3.3 多径数量的影响

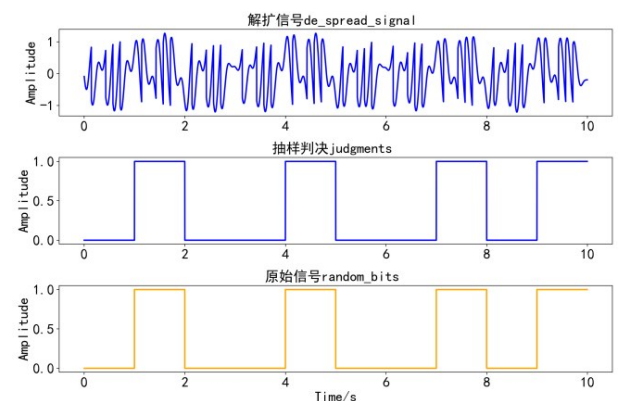
多径传播会导致信号产生时延扩展和幅度衰减,进而引发码间干扰和误码率上升。本文基于随机生成的时延(d)和衰减因子(a)进行仿真分析,其中时延 d 在0~0.02 s



(a) Modulation and demodulation
(a) 调制解调



(b) Spread spectrum demodulation
(b) 扩频解调

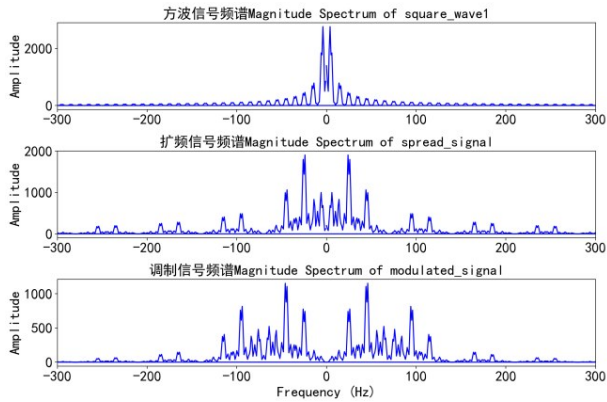


(c) Sampling decision
(c) 抽样判决

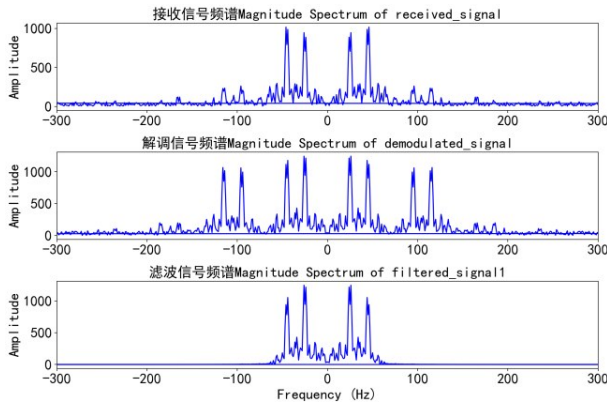
Fig. 8 Time domain waveform of the receiving terminal

图8 接收端时域波形图

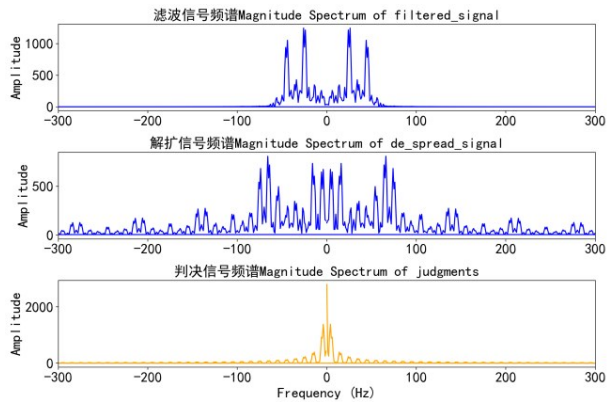
范围内随机分布,衰减因子 a 在0~1之间随机取值。图12为不同多径数量下误码率随SNR的变化规律。仿真结果表明,当多径数量较少时($N=1$),误码率波动较大,规律不稳定。这是由于单一路径的信号受随机衰减和时延影响显著,导致接收信号质量波动剧烈。当多径数量增加时($N>20$),误码率的变化趋势逐渐趋于稳定。这是由于多径分集效应使得系统能够利用多条独立路径的信号来降低深



(a) Spread spectrum+BPSK modulation
(a) 扩频+BPSK 调制



(b) Coherent demodulation
(b) 相干解调



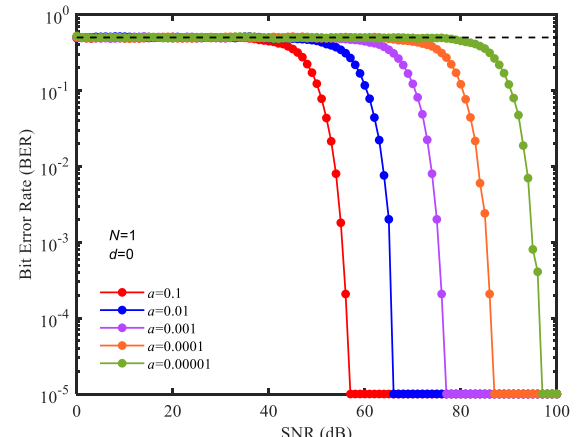
(c) Despreading+sampling decision
(c) 解扩+抽样判决

Fig. 9 Frequency domain waveform diagrams for each stage

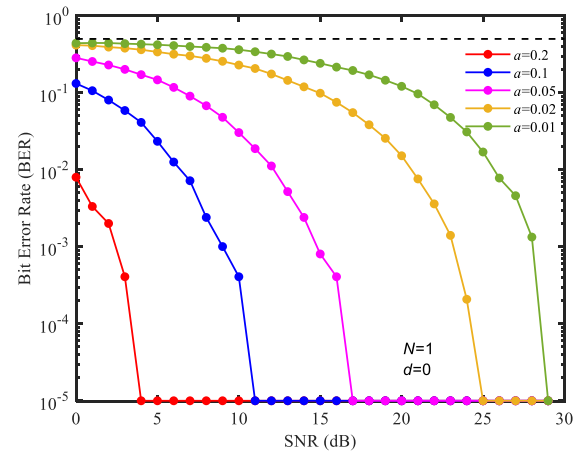
图9 各阶段频域波形图

衰落的影响,从而提高可靠性。当时延范围扩大时($d=0\sim 0.05$ s),仅在 $N=100$ 时误码率仍能保持较好的稳定性;而当时延进一步增大至 $d=0.06$ s时,即使 $N=100$,误码率也会出现明显波动。这表明当时延超过一定阈值时,多径分集的优势会被严重的码间干扰所抵消。

上述分析表明,在合理的时延范围内,增加多径数量



(a) Reduction of inequality
(a) 不均等减小



(b) Decreasing by a factor of 10 per order of magnitude
(b) 按10倍递减速率减小

Fig. 10 The influence of attenuation coefficient on bit error rate

图10 衰减系数对误码率的影响

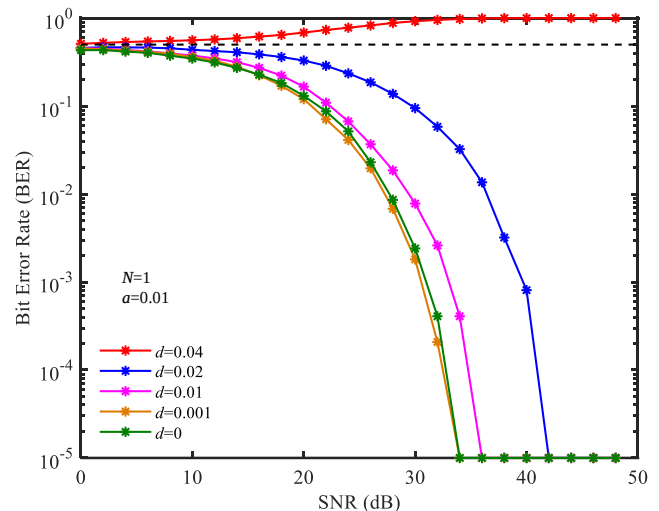


Fig. 11 The impact of delay on bit error rate

图11 时延对误码率影响

可有效降低误码率,提升系统的抗干扰能力和通信可靠性。然而,当时延过大时,仅依靠增加多径数量难以维持系统稳定型,此时需要结合均衡技术或纠错编码等方法来进一步优化系统性能。

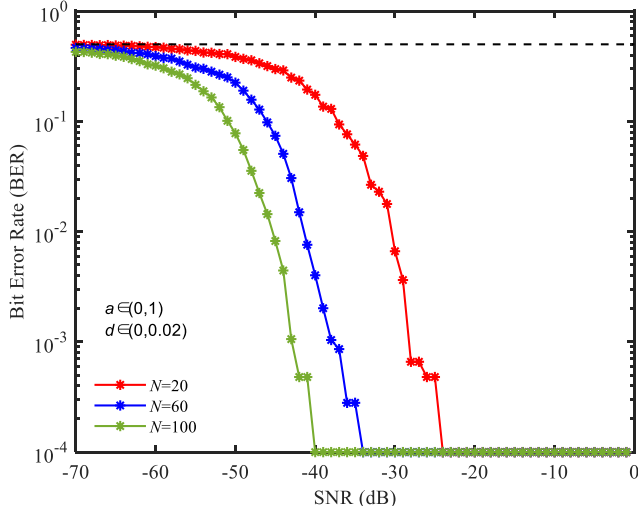
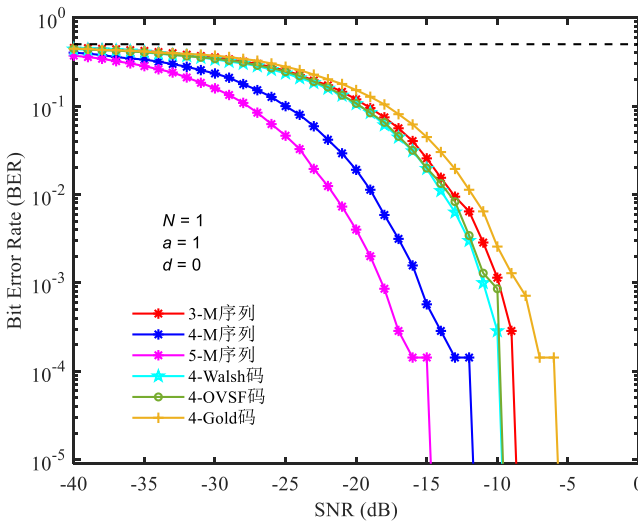


Fig. 12 The impact of multipath number on the bit error rate

图 12 多径数量对误码率的影响

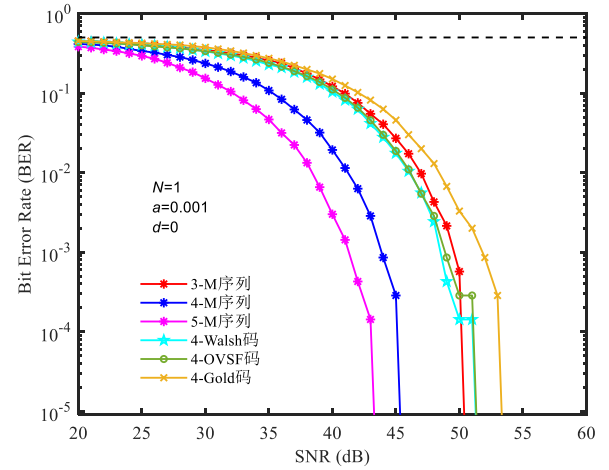
3.3.4 扩频码的影响

选取 4 类信道,包括理想信道($N=1, a=1, d=0$)、固定衰减信道($N=1, a=0.001, d=0$)、固定延时信道($N=1, a=0.01, d=0.01$)和多径环境($N=100, a \in (0, 1), d \in (0, 0.02)$),评估系统在不同扩频码下的性能表现,结果见图 13。表 1~表 3 分别为不同长度扩频码对系统误码率的影响、不同扩频码型对系统误码率性能排名及不同信道下 $BER \leq 10^{-3}$ 的临界 SNR 阈值。结合图表结果,可得如下结论:



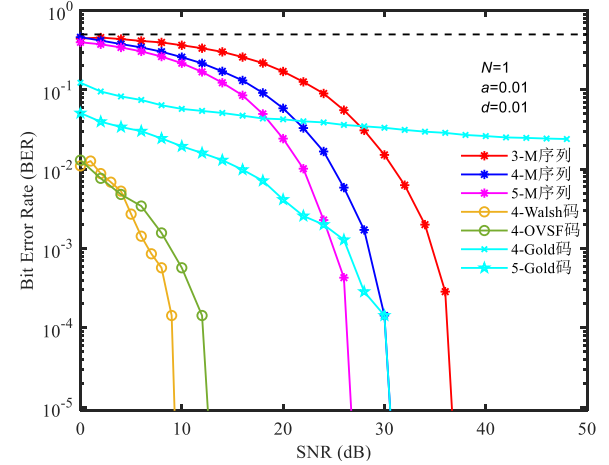
(a) Bit error rate in ideal channels

(a) 理想信道的误码率



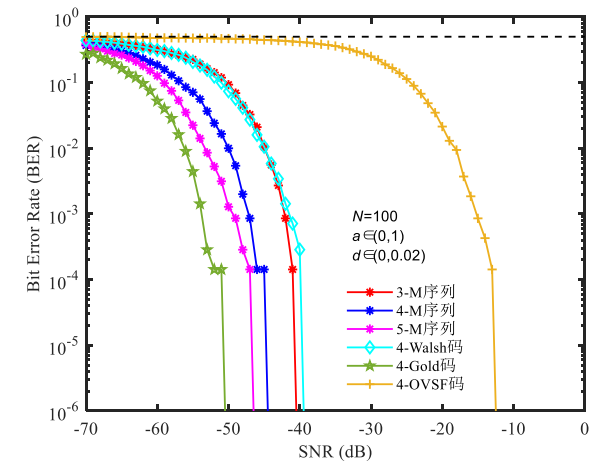
(b) Bit error rate in fixed attenuation channels

(b) 固定衰减信道的误码率



(c) Bit error rate in fixed-delay channel

(c) 固定延时信道的误码率



(d) Bit error rate in multipath channels

(d) 多径信道的误码率

Fig. 13 Influence of spread spectrum code on bit error rate

图 13 扩频码对误码率的影响

(1) 在码长效应方面,在不同信道下增加码长可显著改善系统性能。表 1 为不同长度扩频码对系统误码率的影响。可以看出,理想信道下码长从 7 位增至 31 位可使误

Table 1 The impact of spreading code length on system bit error rate
表 1 不同长度扩频码对系统误码率的影响

信道类型	码长增加效果 (3 阶→5 阶)	典型误码率改善 幅度/%	关键发现
理想信道	7 位→31 位	54.67(SNR=-30 dB) ↓	SNR=-30 dB 时误码率从 0.364 到 0.165
固定衰减	7 位→31 位	58.08(SNR=30 dB) ↓	与理想信道的性能一致
固定延时	7 位→31 位	50.69(SNR=12 dB) ↓	时延 0.01s 时收敛速度提升 3 倍
多径环境	7 位→31 位	50.96(SNR=-60 dB) ↓	低 SNR 区域改善最显著

码率降低 54.67%。如图 13(d)所示,长码的抗多径优势更突出,尤其在 SNR>-30dB 时的低 SNR 区域改善显著,高 SNR 误码率均接近为 0。

(2) 在码型特性方面,不同码型的相对性能表现出显著的信道依赖性。如表 2 所示,4 阶 M 序列在理想/固定衰减信道中表现最优,适用于低复杂度系统场景,但其抗干扰能力较弱;Walsh 码在固定延时信道中展现出最佳性能,其延时鲁棒性验证了其正交特性优势。值得注意的是,4 阶 Gold 序列在固定延时信道下的性能排序存在 SNR 依赖性,即当 SNR 低于 22 dB 时排名第 3,高于 22 dB 时则降至第 4。如图 13(c)所示,该码型在固定延时 0.01 s、SNR>44 dB 条件下可稳定维持误码率=0.024,表明其适用于时延敏感型系统,但需提高阶数才能进一步改善误码率性能。如表 3 所示,在多径环境中,Gold 码展现出卓越的抗干扰能力(临界 SNR=-56 dB);而 OVSF 码则表现出独特的多径不敏感性,当多径数在 20~100 范围内时,其误码率波动均值仅为±1.02%。

Table 2 Performance ranking of different spreading code types on system bit error rate
表 2 不同扩频码型对系统误码率性能排名

码型	理想信道排名	固定衰减信道 排名	固定延时信道 排名	多径信道排名
4 阶 M 序列	1(最优)	1	4(<22 dB) 3(>22 dB)	2
Walsh 码	2	2	1	3
OVSF 码	2	2	2	4
Gold 码	3(最差)	3	3(<22 dB) 4(>22 dB)	1

基于上述结果,不同场景中的码型选择策略为:①多径信道环境下优先选用 Gold 码(如移动通信上行链路场景);②固定延时场景推荐采用 Walsh 码或 OVSF 码(如卫星通信系统);③低复杂度系统可选用 4 阶 M 序列,以实现性能与成本的平衡。在码长优化方面,建议采用不低于 31 位(5 阶)的码长,但需综合考虑延迟的影响;在低 SNR(<-30 dB)场景下,增加码长比更换码型能取得更佳的性能改善。

Table 3 Critical SNR thresholds (BER ≤10⁻³) under different channel conditions
表 3 不同信道下临界 SNR 阈值(误码率≤10⁻³) (dB)

码型	理想信道 临界 SNR 阈值	固定衰减信道 临界 SNR 阈值	固定延时信道 临界 SNR 阈值	多径信道 临界 SNR 阈值
3 阶 M 序列	-11	48	32	-44
4 阶 M 序列	-17	43	24	-49
5 阶 M 序列	-20(最优)	40(最优)	22	-51
Walsh 码	-12	47	12	-43
OVSF 码	-12	49	6(最优)	-16
Gold 码	-10	51	22(5 阶)	-56(最优)

4 结语

本文基于 Python 构建了 BPSK DSSS 通信系统仿真平台,深入研究了不同信道条件下扩频码型、码长、衰减因子、时延及多径效应对系统误码率的影响。研究结果表明:①码型选择依赖信道特性,M 序列在理想/固定衰减信道中表现最优,Walsh 码在固定延时信道下鲁棒性最强,Gold 码在多径环境中抗干扰能力突出,而 OVSF 码则展现出独特的多径不敏感性;②增加码长可显著提升系统性能,多径环境下建议采用≥31 位(5 阶)码长,低 SNR(<-30dB)场景下优先增加码长而非更换码型;③衰减系数与误码率成负相关,衰减因子小于 0.3 或时延超过临界值(0.02 s)会导致系统性能急剧恶化,而增加多径数量可改善分集增益。研究结果为扩频通信系统的码型选择、参数优化及抗干扰设计提供了理论依据与仿真支持,同时验证了 Python 在通信系统仿真中的高效性与扩展性,尤其是在 AI 与通信融合研究中具有显著优势。

尽管本文取得了一定成果,但仍存在信道模型简化、硬件验证平台缺乏、AI 融合深度不足等问题,针对上述不足,后续可从以下几方面改进:①复杂信道建模。引入更符合实际的信道模型并结合机器学习方法动态估计信道参数;②同步算法优化。研究基于最大似然估计或深度学习的同步技术,量化同步误差对系统性能的影响;③硬件协同仿真。搭建 USRP 或 FPGA 实验平台,验证仿真结果在真实环境中的可行性,并优化实时处理算法;④智能信号处理。探索神经网络在扩频码优化、多径抑制及自适应均衡中的应用,提升系统在极端信道条件下的鲁棒性。相信通过上述改进,可进一步推动扩频通信技术在复杂环境下的实用化与智能化发展。

参考文献:

[1] HU Q,GAO F,ZHANG H,et al. Deep learning for channel estimation: interpretation, performance, and comparison [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 20(4): 2398-2412.
[2] LIN C, CHANG Q, LI X. A deep learning approach for MIMO-NOMA downlink signal detection[J]. Sensors, 2019, 19(11): 2526.
[3] QASEM Z A H, LEFTAH H A, SUN H, et al. Deep learning-based code

- indexed modulation for autonomous underwater vehicles systems[J]. *Vehicular Communications*, 2021, 28: 100314.
- [4] GAO J, ZHONG C, LI G Y, et al. Deep learning-based channel estimation for wideband hybrid mmWave massive MIMO[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(6): 3679–3693.
- [5] MA X, GAO Z. Data-driven deep learning to design pilot and channel estimator for massive MIMO[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(5): 5677–5682.
- [6] ABU AL-HAJJA Q, ZEIN-SABATTO S. An efficient deep-learning-based detection and classification system for cyber-attacks in IoT communication networks[J]. *Electronics*, 2020, 9(12): 2152.
- [7] SUN R, CHENG N, LI C, et al. Knowledge-driven deep learning paradigms for wireless network optimization in 6G[J]. *IEEE Network*, 2024, 38(2): 70–78.
- [8] OHTSUKI T. Machine learning in 6G wireless communications[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2023, 106(2): 75–83.
- [9] LIU M, LIU J, PENG Z, et al. Efficient MMSE equalization for direct-sequence spread-spectrum underwater communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(11): 16325–16335.
- [10] ZHANG S, LIU F, HUANG Y, et al. Adaptive detection of direct-sequence spread-spectrum signals based on knowledge-enhanced compressive measurements and artificial neural networks[J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2538.
- [11] LI Y, YANG D, LI X H. Simulation experiment of direct sequence spread spectrum communication system based on LabVIEW-USRP[J]. *Experimental Technology and Management*, 2018, 35(12): 139–142, 146.
李毅, 杨栋, 李晓辉. 基于 LabVIEW-USRP 的直接序列扩频通信系统仿真实验[J]. *实验技术与管理*, 2018, 35(12): 139–142, 146.
- [12] JIA Y, HU W L, YAN C, et al. Design of experimental system for direct sequence spread spectrum communication based on LabVIEW[J]. *Experimental Technology and Management*, 2019, 36(3): 165–169, 174.
贾勇, 胡炜琳, 晏超, 等. 基于 LabVIEW 的直接扩频通信实验系统的设计[J]. *实验技术与管理*, 2019, 36(3): 165–169, 174.
- [13] JIN L P, HAN H L. Research and simulation of direct sequence spread spectrum communication system[J]. *Electronic Test*, 2011(1): 78–82.
靳丽平, 韩慧莲. 直接序列扩频通信系统研究及仿真[J]. *电子测试*, 2011(1): 78–82.
- [14] ZENG L, XIE X Y. Study on bit error rate of spread spectrum communication system based on MATLAB[J]. *Communications Technology*, 2011, 44(11): 25–26, 29.
曾璐, 谢晓尧. 基于 MATLAB 扩频通信系统误码率的研究[J]. *通信技术*, 2011, 44(11): 25–26, 29.
- [15] SUN D H, ZHAO G, LUO J Q. Spread spectrum communication research based on PSK modulation[J]. *Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 30(5): 292–295.
孙德辉, 赵光, 罗晋强. 基于 PSK 调制的扩频通信研究[J]. *辽宁工业大学学报(自然科学版)*, 2010, 30(5): 292–295.
- [16] MA X Q. Design of direct sequence spread spectrum communication system based on Simulink[J]. *Modern Electronics Technique*, 2014, 37(22): 34–37.
马小青. 基于 Simulink 的直接序列扩频通信系统仿真设计[J]. *现代电子技术*, 2014, 37(22): 34–37.
- [17] ZHOU F B, HUANG C S. Direct sequence spread spectrum communication system[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2016, 36(9): 70–72.
周风波, 黄乘顺. 直接序列扩频通信系统仿真研究[J]. *舰船电子工程*, 2016, 36(9): 70–72.
- [18] ZHU F, TONG J. Simulation of spread spectrum communication system based on MATLAB[C]//2024 4th International Conference on Neural Networks, Information and Communication (NNICE), 2024: 1327–1332.
- [19] AHMED K E, ALI H R, ZORAH M. Transmission of high data rate signals over low-frequency passbands using (DSSS-BPSK) technique[J]. *AIKadhim Journal for Computer Science*, 2024, 2(4): 1–9.
- [20] DESHMUKH S, BHOSLE U. Performance evaluation of spread spectrum system using different modulation schemes[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 85: 176–182.

(责任编辑:尹晨茹)