

基于单载波频域均衡的直接序列扩频自适应抗干扰技术

辜方林¹, 黄育侦², 赵莺³, 赵海涛¹, 魏急波¹

(1. 国防科技大学电子科学学院, 湖南 长沙 410073; 2. 军事科学院, 北京 100097;
3. 北京信息通信技术研究中心, 北京 100036)

摘要: 针对复杂多径信道环境下直接序列扩频系统性能受限问题, 提出了一种单载波频域均衡 (SCFDE) 与直接序列扩频 (DSSS) 技术有机结合的自适应抗干扰扩频通信体制, 其特点是通过频域均衡克服多径带来的频率选择性衰落, 同时支持自适应调整扩频因子实现系统传输速率与抗干扰能力的重构。进一步地, 结合 SCFDE 频域均衡的特点, 充分利用其接收端固有的快速傅里叶 (FFT) 变换过程实现对干扰强度、干扰类型等信息的伴随式检测与分析, 在线优化选取频域承载点, 提升系统对干扰, 特别是阻塞式干扰的适应性。仿真结果表明, 无论是高斯还是多径信道环境下, 所提的基于 SCFDE 的直扩波形都具有良好的通信性能, 且部分频带陷波对通信性能影响较小, 验证了自适应优选信息频域承载点抗干扰的有效性。

关键词: 直接序列扩频; 频域均衡; 自适应; 抗干扰

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022213

Adaptive anti-jamming technologies based on direct sequence spread spectrum and single carrier frequency domain equalization

GU Fanglin¹, HUANG Yuzhen², ZHAO Ying³, ZHAO Haitao¹, WEI Jibo¹

1. School of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China
2. Chinese Academy of Military Science, Beijing 100097, China
3. Beijing Information and Communication Technology Research Center, Beijing 100036, China

Abstract: To solve the performance limitation of direct sequence spread spectrum system in complex multipath environment, an adaptive anti-jamming spread spectrum framework that organically combines single carrier frequency domain equalization (SCFDE) and direct sequence spread spectrum (DSSS) technologies was proposed. The frequency multipath fading was overcome by frequency domain equalization, and the transmission rates and high reliability was re-configured by deploying variable spread factors. Moreover, the inherent fast Fourier transform process was made full use at the receiver to realize the adjoint detection and analysis of interference intensity, interference type and other information, etc. Then, the frequency domain bearing point online was optimized and selected to improve the adaptability to the interference, especially blocking interference. The simulation results show that the proposed direct spread spectrum waveform based on SCFDE has good communication performance in both Gaussian and multipath environments, and the notch of some frequency bands has little impact on the communication performance, which verifies the effectiveness of anti-jamming by adaptive optimizing information frequency domain bearers.

Keywords: direct sequence spread spectrum, frequency domain equalization, adaptive, anti-jamming

收稿日期: 2022-07-20, 修回日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61931020, No.62101569)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61931020, No.62101569)

0 引言

直接序列扩频 (DSSS, direct sequence spread spectrum) 通信由于具有很强的抗窄带干扰能力, 并且具有信息隐蔽、多址保密等优点^[1], 已在通信领域大量应用。但是, DSSS 技术目前局限于低速通信系统或者信道环境简单、干净的卫星通信系统。事实上, 高速通信系统或者地面移动通信环境往往存在大量多径, 使信道呈现频率选择性衰落, 此时, 要使 DSSS 技术发挥作用, 亟须克服多径带来的影响^[2-3]。

均衡是克服信道多径影响的核心技术之一。已有许多学者提出在 DSSS 接收端采用 Rake 接收或者时域均衡技术来克服或者利用多径的影响提升系统的接收性能。但是 Rake 接收或者时域均衡面临以下 2 个问题: 一是 Rake 接收仅适用于多径较少的情形, 且 Rake 接收过程中的多径分量时延、相位估计存在误差, 其性能难以保证; 二是无论是 Rake 接收还是时域均衡技术均面临实现复杂度大的难题, 工程实现面临挑战^[4-6]。随着快速傅里叶变换 (FFT, fast Fourier transform) 的成熟, 频域均衡技术得到了快速发展, 以正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 和单载波频域均衡 (SCFDE, single carrier frequency domain equalization) 技术最为典型, 且在许多标准规范中得到了推广应用, 例如, IEEE802.16a、IEEE 802.11n 等。SCFDE 与 OFDM 的原理极其相似, 两者都是通过插入循环前缀 (CP, cyclic prefix) 来消除码间干扰, 并在频域完成信道估计与均衡。其主要区别是在 SCFDE 系统中, FFT/IFFT 模块均位于接收端; 而在 OFDM 系统中, IFFT 模块位于发射端, 而 FFT 模块位于接收端。同 OFDM 相比, SCFDE 具有以下优点: 显著降低了信号峰均比, 利于实现小型化、低功耗; 对频偏的敏感性较小, 适用于高动态等复杂环境; 易于与 DSSS 技术结合, 能获得大的扩频处理增益。结合上述分析, 本文提出了一种 SCFDE 与 DSSS 技术有机结合的宽带扩频通信体制, 它利用频域均衡来克服多径导致的频率选择性衰落带来的影响, 同时充分利用 DSSS 获得大的扩频处理增益, 使系统具有优良的抗干扰性能, 为 DSSS 技术应用于多径信道环境提供了有效的解决方案^[7-9]。

尽管扩频能够提升系统的抗干扰能力, 且扩频倍数越大, 系统的抗干扰能力越强。然而, 实际应

用过程中系统通常是带宽受限的, 在带宽一定的条件下, 扩频倍数越大, 抗干扰能力越强, 接收机灵敏度越高, 但传输速率越小, 能够支持的业务类型和组网应用严重受限, 反之亦然。注意到, 抢险救灾等任务所面临的通信环境往往是复杂多样的, 这种多样性不仅体现为山地、丘陵、沙漠、海洋等地理环境的多样性, 也体现为电磁环境的多样性, 例如, 不同强度、不同类型的电磁干扰等; 另一方面, 根据执行的任务不同, 所需要信息交互的速率、距离等也会不同。基于上述分析, 需要通信链路具备性能指标可重构的能力, 即条件允许时传输图像、视频等丰富多样的业务信息, 实现高速传输; 条件恶劣时能够传输生命体征、位置坐标等少量关键信息, 实现低速的保底通信。综上所述, 为了兼顾信息传输速率和可靠性, 满足不同环境下可靠传输的需求, 本文提出了带宽自适应传输模式, 这里的带宽指有效信道带宽, 通过给固定信道带宽配置不同的扩频因子即可获得不同的有效信道带宽, 从而实现扩频处理增益、传输速率的灵活转换, 满足不同环境和任务在信息速率和可靠性方面所面临的多样化需求。在此基础上, 本文结合 SCFDE 接收端固有 FFT 过程的特点, 实现对干扰强度、干扰类型等信息的伴随式检测与分析, 优化选取频域承载点, 提升系统对干扰, 特别是阻塞式干扰的适应性。

1 系统架构

1.1 基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统

图 1 给出了一种基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统框架。在发射端, 信源序列经过调制后进行直接序列扩频。令 d_i 表示第 i 个调制符号, 与扩频序列 $\mathbf{c}=[c_1, c_2, \dots, c_N]$ 进行异或操作实现扩频, $\mathbf{x}_i = d_i \mathbf{c}=[x_1, x_2, \dots, x_N]$ 表示符号向量, 其中, N 为扩频因子。利用扩频后的符号向量 \mathbf{x}_i 组成数据块, 如图 2 所示。保护间隔 CP 被插入每个块的前面, 这样第 k 个发送块可以表示为 $\mathbf{x}_k = [\mathbf{x}_{cp}, \mathbf{x}_{k1}, \mathbf{x}_{k2}, \dots, \mathbf{x}_{kL}]$, 其中, $k=1, 2, \dots, l=1, 2, \dots, L$ 。

假设信道为块衰落的准静态信道, 在一个符号块的时间间隔内, 信道频率响应不变。经过码片间隔的采样后, 离散等效信道可以表示为 $\mathbf{h}=[h_1, \dots, h_p]$, 其中, P 是多径分量的数目。不失一般性, 假设 CP 的长度大于信道的冲激响应长度。CP 的添加使块间干扰消除, 同时使接收符号块和信道的线性卷积变为循环卷积。

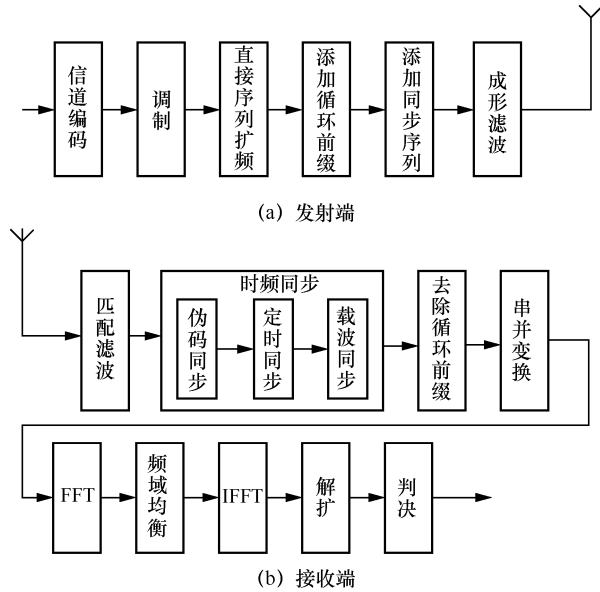


图 1 基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统框架

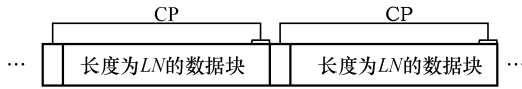


图 2 基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统数据块结构

在接收端，经过匹配滤波和码片间隔采样，去除 CP 后的接收符号块可以表示为

$$y_k = h \otimes x_k + w = h \otimes (cd_k) + w \quad (1)$$

其中， \otimes 表示循环卷积， w 表示加性白高斯噪声矢量，噪声分量均值为 0、方差为 N_0 。

第 k 个接收块信号经过 FFT 被变换到频域，可表示为

$$Y_k = HX_k + W \quad (2)$$

其中， $Y_k = \text{FFT}(y_k)$ ， $X_k = \text{FFT}(cd_k)$ ， $H = \text{FFT}(h)$ ， $W = \text{FFT}(w)$ 。

接收块信号被变换到频域后进行频域均衡，均衡后的信号向量可以表示为

$$\hat{X}_k = UY_k = U(HX_k + W) \quad (3)$$

其中， U 是长度为 NL 的频域均衡系数向量。

对于迫零 (ZF, zero force) 均衡，有

$$U_m = \frac{1}{H_m}, m = 1, \dots, NL \quad (4)$$

对于最小均方误差 (MMSE, minimum mean square error) 均衡，有

$$U_m = \frac{H_m^*}{|H_m|^2 + \text{SNR}^{-1}}, m = 1, \dots, NL \quad (5)$$

其中， H_m^* 是 H_m 的共轭，SNR 是接收信噪比。

均衡以后的信号经过 IFFT 被变换到时域，然后进行解扩，解扩后的判决变量为

$$\hat{d}_k = c^T \text{IFFT}(\hat{X}_k) \quad (6)$$

其中， $(\cdot)^T$ 表示转置。

1.2 有效带宽自适应

根据图 1 所示的基于 SCFDE 宽带 DSSS 系统框架，其中， L 和 N 是至关重要的 2 个参数，合理设置参数 L 用于克服信道的频率选择性衰落，合理设置参数 N 用于获取合理的扩频处理增益。本文考虑信道带宽固定的情形，固定信道带宽的优势是使射频前端实现简单，便于小型化和低成本，且系统工作稳定、可靠。信道带宽的确定与实际系统工作的频谱环境、传输能力需求和硬件平台能力息息相关。

以某一测控通信链路为例，假设信道带宽为 12.8 MHz，通过配置不同的 L 和 N ，如表 1 所示，系统可以获得具有不同传输速率、抗干扰能力和接收机灵敏度指标的传输模式。

为了实现自适应抗干扰传输，在图 1 所示的框架基础上，本文提出了如图 3 所示的有效带宽自适应 DSSS 系统框架。在图 3 所示的波形框架中，分别利用控制段和数据段传输控制信息和数据信息，且控制信息主要包括数据段解调所需的调制方式、编码效率、扩频倍数、负载长度等。

在此基础上，针对自适应抗干扰需求，设计如图 4 所示的帧结构。在该帧结构中，时频同步、控

表 1 有效带宽可配置系统实例

有效带宽/kHz	扩频倍数	数据块符号	FFT 点数	扩频处理增益/dB	接收机灵敏度/dBm
100	128	16	2 048	21	-118
200	64	32	2 048	18	-115
400	32	64	2 048	15	-112
800	16	128	2 048	12	-109

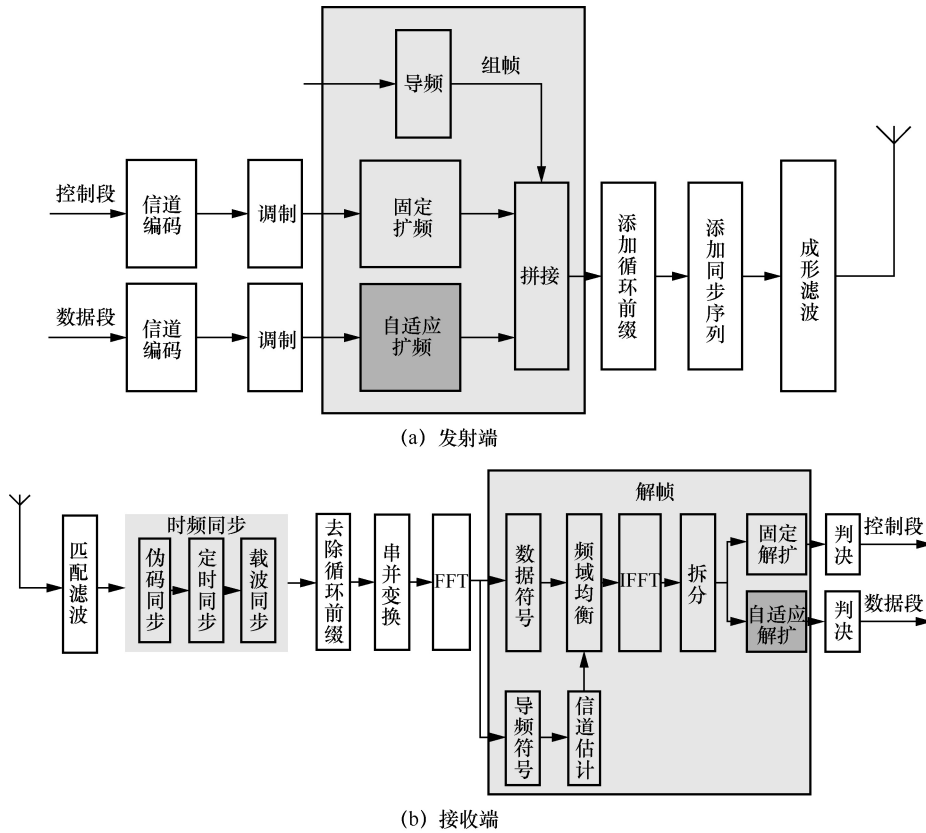


图 3 有效带宽自适应 DSSS 系统框架

制段按照最小有效带宽（具有最强的抗干扰能力和接收机灵敏度等指标）对应的参数进行设计，保证在极限情况下能够准确获得数据段的传输参数；同时，利用控制段获得的参数解调数据段，不同参数表示数据段采用不同传输模式，对应不同的抗干扰能力和传输速率，但是不同模式下 FFT/IFFT 点数固定，因此其控制逻辑十分简单，便于工程实现。

控制段循环冗余校验（CRC, cyclic redundancy check）、数据段 CRC 连续错误次数 $CRC_Data_Error_times$ 等信息的指标，实时、稳定地反馈当前地理环境、干扰环境下的链路质量，发射端在线优化数据链路的系统参数，实现不同传输模式的自适应传输，其实现流程如图 5 所示。图 5 中， TH_H 和 TH_L 表示 SINR 门限， α 表示 $CRC_Data_Error_times$ 门限。

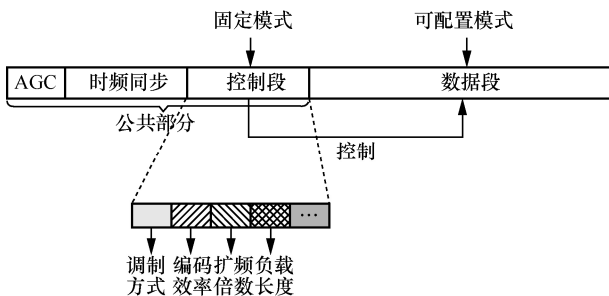


图 4 有效带宽自适应 DSSS 波形帧结构

最后，针对接收端仅依靠估计的信干噪比（SINR, signal to interference plus noise ratio）反映链路质量存在随机波动，导致参数自适应调整存在振荡现象和系统工作不稳定的问题，构建综合 SINR、

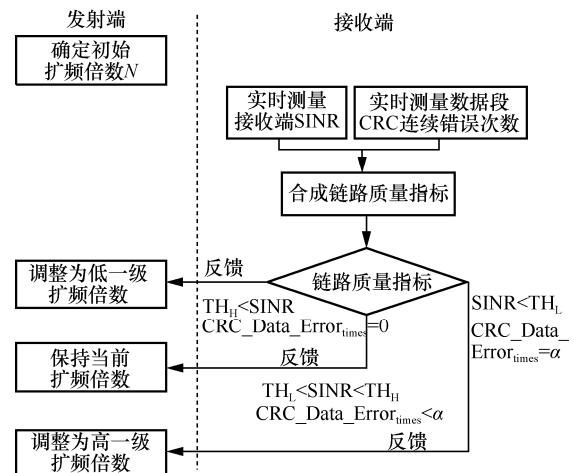


图 5 有效带宽自适应实现流程

2 基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统自适应抗干扰策略

2.1 频域陷波抗干扰

直接扩频信号在频域中会呈现出与白噪声相似的平坦特性，而窄带干扰信号在频域上会出现明显的频谱峰值，如图 6 所示。

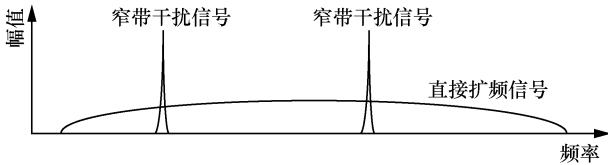


图 6 扩谱系统窄带干扰

频域陷波法是目前应用很广泛的干扰抑制方法，适用于干扰带宽较窄且干扰频带较固定的情形。频域陷波的基本原理是根据窄带干扰、噪声和扩频信号不同的频域特性来检测识别干扰，找出干扰频点并对其进行陷波处理。进行陷波处理可以降低干扰对接收信号的影响，改善信干比。但频域陷波也会导致信号总功率下降和信号失真，给接收端带来一定的性能损失。而且频谱切除得越多，信号失真就越明显，带来的性能损失也越大。因此，在进行陷波处理时，不但要考虑切除窄带干扰导致的信干比改善，还要考虑信号能量损失和信号失真导致的信噪比恶化。

根据图 3(b)可以看出，接收端本身就需要对接收信号进行 FFT 和 IFFT 以实现频域均衡，因此，其与频域陷波有着天然的契合。综合上述分析，本文提出一种基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统频域陷波抗干扰的实现框架，如图 7 所示。接收端在对接收信号进行傅里叶变换之后，首先按照一定的准则设置干扰检测门限，确定干扰在接收信号频谱中的位置，然后对这些干扰频点进行陷波，最后对处理后的数据进行频域均衡与逆傅里叶变换得到干扰

抑制后的数据，并利用干扰抑制后的数据进行解扩恢复发送信息。

2.2 自适应门限算法

根据图 7 所示的频域陷波抗干扰的实现框架，利用导频符号进行干扰检测。不失一般性地，本文所提基于 SCFDE 的 DSSS 系统采用恒包络零自相关 (CAZAC, constant amplitude zero auto correlation) 序列作为导频序列用于信道估计，这是因为它能够显著减少信道估计所需的计算复杂性。CAZAC 序列可以表示为

$$a_v(n) = \exp\left(j \frac{\pi v n^2}{M}\right) \quad (7)$$

其中， $n \in [0, M-1]$ ， $M = NL$ ， v 是与 M 互质的正整数。可以证明，CAZAC 序列通过傅里叶变换后仍然为 CAZAC 序列，且 CAZAC 序列具有恒模特性^[10]。

为了使干扰检测算法能够适应不同前端增益、信噪比等因素导致的信号尺度变化，需要干扰检测的门限值能够自适应调整以适应不同环境。文献[11]通过分析接收信号谱线幅度平方的统计特性进行干扰检测，获得的干扰检测门限为统计量，因而具有自适应特征。结合图 7 所示的频域陷波抗干扰的实现框架，本文提出通过分析导频符号的谱线幅度平方的统计特性进行干扰检测。根据上述分析，CAZAC 序列导频符号具有恒模特性，在无窄带干扰条件下，其频域观测数据是一个高斯随机序列。可以证明，高斯随机序列的幅度服从瑞利分布，相位在 $(0, 2\pi)$ 服从均匀分布，幅度平方服从指数分布。指数分布的统计特征为

$$E(y) = \frac{1}{\lambda} \quad (8)$$

$$V(y) = \frac{1}{\lambda^2} \quad (9)$$

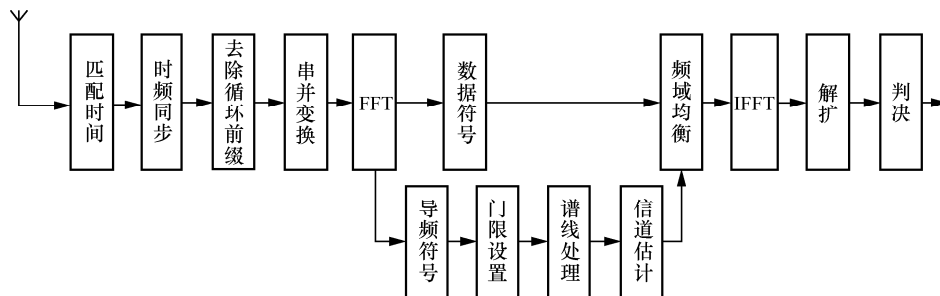


图 7 基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统频域陷波抗干扰的实现框架

在变换域进行干扰检测时取门限 TH， $|Y_k|^2$ 不超过该门限的概率为

$$p(|Y_k|^2 \leq TH) = 1 - \int_{TH}^{\infty} \lambda e^{-\lambda y} dy = p \quad (10)$$

令 $TH = \frac{a}{\lambda}$ ，其中， $a = 1, 2, 3, 4, 5$ ，可以得到谱线的幅度平方分布如表 2 所示。

表 2 谱线的幅度平方分布

TH	p
$\frac{1}{\lambda}$	63.20%
$\frac{2}{\lambda}$	86.50%
$\frac{3}{\lambda}$	95.10%
$\frac{4}{\lambda}$	98.20%
$\frac{5}{\lambda}$	99.30%

频域干扰检测问题转化为一个假设检验问题，即假设接收机的观测数据中不存在干扰，则 FFT 之后的 M 根谱线的幅度平方应服从均值为 $\frac{1}{\lambda}$ 、方差为 $\frac{1}{\lambda^2}$ 的分布。对于任意一次观测信号，当信号中无窄带干扰存在时，经过 FFT 后，谱线模平方大于 $\frac{5}{\lambda}$ 的概率为 0.007，即在显著性水平 $a = 0.007$ 条件下，无窄带干扰谱线幅度平方大于 $\frac{5}{\lambda}$ 是不可能出现的小概率事件。因此，该假设检验问题的数学描述可以表示为

$$Z = \left\{ |X_m|^2 > \frac{5}{\lambda} \text{的谱线根数} \right\} \quad (11)$$

当 $Z > 0$ 时，有窄带干扰；当 $Z = 0$ 时，无窄带干扰。

基于指数分布特征的自适应门限干扰检测算法的实现过程如算法 1 所示。

算法 1 基于指数分布特征的自适应门限干扰检测算法

初始化 根据定时同步确定导频符号集合 Ω 、数据符号集合 \mathcal{C} 、总符号数目 K ，设置干扰检测的

置信度为 99.3%（显著性水平 $a = 0.007$ ）

- 1) for $i=1:K$
- 2) if $i \in \Omega$
- 3) 计算 M 根谱线幅度平方的均值

$$\mu = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} |X_m|^2 = \frac{1}{\lambda}$$
- 4) 计算干扰检测门限 $TH = \frac{5}{\lambda}$
- 5) else 根据前一个导频符号计算得到的干扰检测门限 TH，对于任一 X_m ， $m = 0, \dots, M - 1$ ，计算 $\delta = |X_m|^2 - TH$
- 6) end if
- 7) if $\delta \geq 0$
- 8) $X_m = 0$
- 9) else
- 10) continue
- 11) end if
- 12) end for

3 仿真分析

3.1 基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统性能仿真

为了充分验证所提方案的有效性，基于 MATLAB 仿真平台对所提基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统在各种信道环境下进行仿真分析。首先，仿真分析所提基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统在高斯白噪声信道环境下的误码性能，具体的仿真参数如表 3 所示。

表 3 系统仿真参数

参数	取值
信道带宽/MHz	12.8
FFT/IFFT 点数	2 048
扩频倍数	16、32、64、128
数据块符号	128、64、32、16
调制方式	QPSK
信道编码	Turbo
编码效率	$\frac{1}{3}$

图 8 给出了系统误码性能随接收信号信噪比变化的曲线。从图 8 可以看出，随着扩频倍数的增加，

系统误码性能有明显改善，且扩频倍数每增加一倍，接收性能约改善 2 dB，与理论的 3 dB 相差约 1 dB，这是因为所提系统中需要进行信道均衡，信道均衡会放大噪声的影响，使性能恶化。此外，本文在仿真中采用最简单 的最小二乘 (LS, least square) 信道均衡，在实际系统中则可以采用 MMSE 信道均衡，它能抑制噪声的放大，在一定程度上改善误码性能。

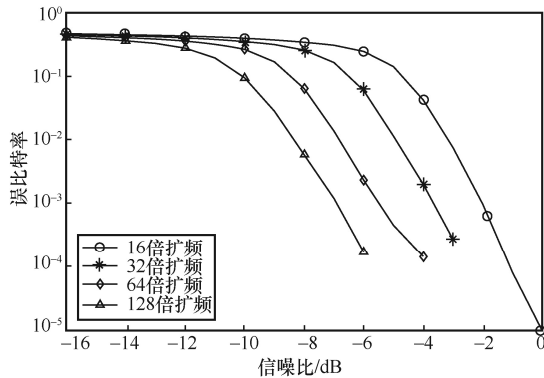


图 8 系统误码性能随接收信号信噪比的变化

其次，仿真分析所提基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统在多径信道环境下的误码性能，系统仿真参数不变，IEEE 802.11g 信道模型参数如表 4 所示。

表 4 IEEE 802.11g 信道模型参数

参数	取值
信道类型	IEEE 802.11g
采样频率/MHz	51.2
最大多普勒频移 f_d /Hz	10、100
多径信道的平均时延/ns	20

图 9 给出了典型 DSSS 系统、采用 Rake 接收技术的 DSSS 系统 (多径时延参数准确) 和本文所提基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统的误码性能随接收信号信噪比变化的曲线。系统仿真过程中，扩频倍数为 64，仿真次数为 1000。从图 9 可以看出，典型 DSSS 系统由于没有信道均衡处理过程，在多径信道环境下性能急剧恶化，不能适用多径信道环境；本文所提基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统与采用 Rake 接收技术的 DSSS 系统性能基本相当，虽然在高信噪比条件下性能略差于 Rake 接收机，但是 Rake 接收机在带宽较宽、多径复杂的情形下难以实现准确的多径、时延等参数估计。综上所述，本文所提基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统误

码性能受多径信道环境影响小，且在多径信道环境下呈现了较低的误码传输性能，具有很好的工程实用价值。

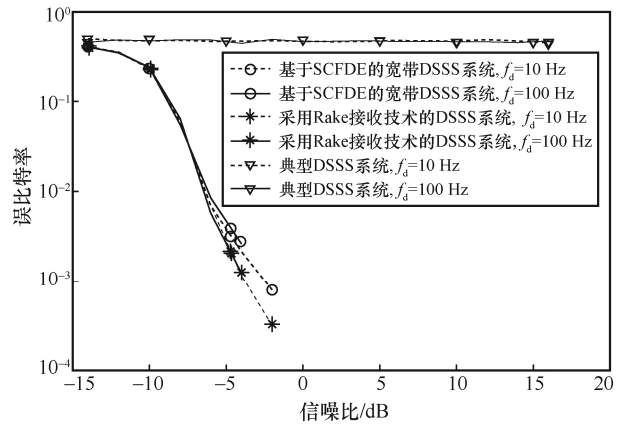


图 9 3 种系统的误码性能随接收信号信噪比的变化

图 10 给出了本文所提基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统在不同扩频倍数下误码性能随接收信号信噪比变化的曲线。从图 10 可以看出，随着扩频倍数的增加，系统的误码性能稳步改善，且扩频倍数每增加一倍，接收性能约改善 1.6 dB。特别地，对比分析图 8 和图 10 可以发现，多径与高斯白噪声信道环境下性能差异较小，这在研制的实际系统中也得到验证，多径信道环境下由于扩频带来的频率分集效果，相较于有效信道带宽一样的不扩频系统，接收机灵敏度会有一定程度的改善，这对于增强所提基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统在城市、郊区、空地等典型多径信道环境下的通信效果具有重大意义。

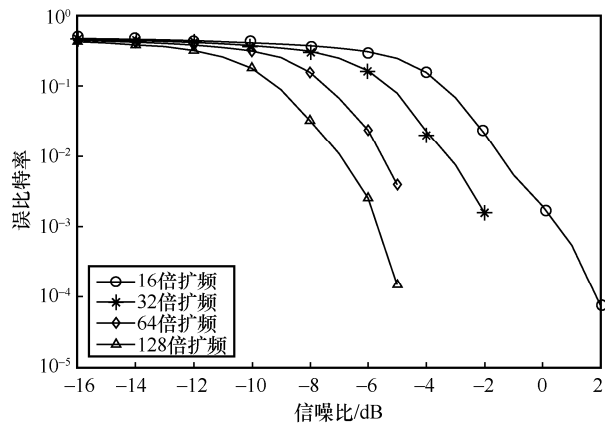


图 10 本文所提基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统在不同扩频倍数下误码性能随接收信号信噪比的变化

3.2 频域陷波抗干扰性能分析

为充分说明频域陷波对干扰抑制的效能，本节

仿真分析了不同干扰类型下采样频域陷波时的误比特率，系统的具体仿真参数与表 3 一致。

首先，仿真分析了频域陷波用于抑制零中频接收机所面临的本振干扰的效果。由于零中频接收机在小量化、低功耗方面具有优势，近年来已发展成主流，但是其本振干扰抑制是保障系统性能必须要解决的问题。在本文所提基于 SCFDE 的宽带 DSSS 系统中，由于信道带宽一般较大，难以利用数字中频的方法实现，采用频域陷波是一种极佳的选择。仿真过程中，假设信号与本振干扰的信干比为 10 dB。图 11 给出了系统采用 16 倍扩频条件下系统误码性能随接收信号信噪比变化的曲线。从图 11 可以看出，采用频域陷波抑制本振干扰的系统与没有本振干扰不需要本振抑制的系统性能基本一致，所以采用频域陷波能够很好地解决本振干扰抑制的问题。

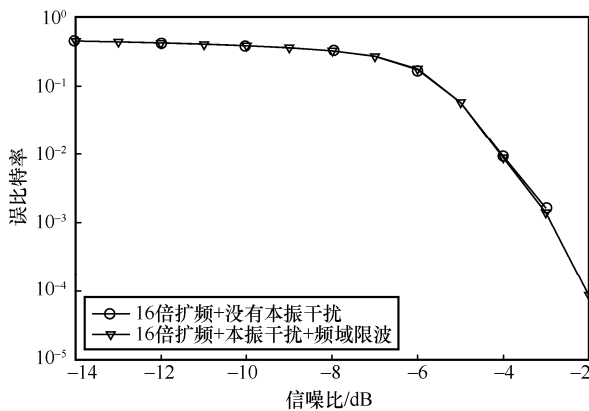


图 11 采用 16 倍扩频条件下系统误码性能随接收信号信噪比的变化

在此基础上，本节进一步仿真分析了干扰分布于带内其他位置的频点，以及干扰占用不同带宽下的误码性能。系统仿真过程中，假设信号与窄带干扰的信干比为 0，每次仿真干扰信号的频带随机分布在信号带宽内，仿真次数为 1 000。图 12 给出了干扰信号带宽占用不同扩频信号带宽条件下，采用频域干扰抑制时系统误码性能随接收信号信噪比变化的曲线。从图 12 可以看出，窄带干扰的频带分布对基于频域陷波的干扰抑制方法基本没有影响；随着干扰信号频带占用扩频信号带宽比例的增加，系统的误码性能会逐渐恶化，但在干扰信号带宽占比小于扩频信号带宽 15% 的条件下，其影响有限。因此，频域陷波具有很好的干扰抑制能力。

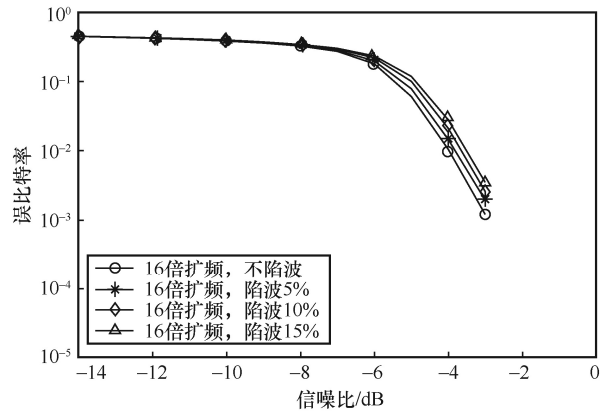


图 12 干扰信号带宽占用不同扩频信号带宽条件下，采用频域干扰抑制时系统误码性能随接收信号信噪比的变化

4 结束语

本文提出了一种 SCFDE 与 DSSS 技术有机结合的自适应抗干扰扩频通信系统，该系统通过频域均衡克服多径带来的频率选择性衰落，同时支持自适应调整扩频因子，实现系统传输速率与抗干扰能力的重构。此外，结合 SCFDE 频域均衡的特点，充分利用其接收端固有的 FFT 过程高效实现检测、分析系统所面临的干扰强度、干扰类型等信息，优化选取频域承载点，提升系统对干扰，特别是阻塞式干扰的适应性。下一步工作是利用机器学习等手段实现频域承载点的在线优化，构建完整的自适应抗干扰系统。

参考文献：

- [1] WU X F, YANG Z. Coding versus spreading for narrowband interference suppression[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2129-2141.
- [2] PURSLEY M B. Direct-sequence spread-spectrum communications for multipath channels[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 653-661.
- [3] KENNEY B A, JENKINS S N, MAJID A J, et al. Cyclic prefix direct sequence spread spectrum capacity analysis[C]//Proceedings of 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [4] BAUM K L, THOMAS T A, VOOK F W, et al. Cyclic-prefix CDMA: an improved transmission method for broadband DS-SS cellular systems[C]//Proceedings of 2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record. Piscataway: IEEE Press, 2002: 183-188.
- [5] HADINEJAD-MAHRAM H. On the equivalence of linear MMSE chip-level equalizer and generalized RAKE[J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(1): 7-8.

- [6] ADACHI F, GARG D, TAKAOKA S, et al. Broadband CDMA techniques[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(2): 8-18.
- [7] JENKINS S N, KENNEY B A, MAJID A J, et al. CP- DSSS: a novel waveform for multiple access in IoT[C]//Proceedings of 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [8] FARHANG-BOROUJENY B, MAJID A, MORADIZ H. CP-DSSS: an OFDM compatible variable rate modulation for 5G and beyond[C]//Proceedings of 2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF). Piscataway: IEEE Press, 2020: 578-583.
- [9] AMINJAVAHERI A, REZAZADEHREYHANI A, KHALONAR, et al. Underlay control signaling for ultra-reliable low-latency IoT communications[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [10] 宫丰奎, 文妮, 李果, 等. 基于 CAZAC 序列的低复杂度抗频偏同步算法[J]. 通信学报, 2021, 42(2): 64-71.
GONG F K, WEN N, LI G, et al. Low-complexity and frequency-offset-robust synchronization algorithm based on CAZAC sequence[J]. Journal on Communications, 2021, 42(2): 64-71.
- [11] 王茸. SC-FDE 系统中干扰抑制的算法研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
WANG R. Research and implementation of interference suppression

algorithm in SC-FDE system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.

[作者简介]



辜方林 (1986-), 男, 湖南娄底人, 博士, 国防科技大学副研究员, 主要研究方向为可靠无线通信。

黄育侦 (1986-), 男, 福建莆田人, 博士, 军事科学院副研究员, 主要研究方向为无人集群通信。

赵莺 (1963-), 女, 北京人, 博士, 北京信息通信技术研究中心正高级工程师, 主要研究方向为抗干扰通信、时频同步。

赵海涛 (1981-), 男, 山东昌乐人, 博士, 国防科技大学教授, 主要研究方向为多信道认知组网、无人集群通信。

魏急波 (1967-), 男, 湖北汉川人, 博士, 国防科技大学教授, 主要研究方向为智能无线通信、软件无线电。