

基于最大后验概率准则的宽带航空 通信频域干扰检测算法

王 鹏¹, 向 新², 赖建萍³, 董鹏宇¹, 梁 源², 王 瑞²

(1. 空军工程大学研究生院, 西安, 710051; 2. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 3. 95503 部队, 新疆和田, 848000)

摘要 航空通信频段资源有限, 航空宽带通信系统将不可避免地受到窄带通信系统的干扰。提出了一种基于最大后验概率准则的频域干扰检测算法, 并结合频率阈值切除算法实现精确的干扰抑制。建立了基于最大后验概率准则的干扰检测算法的算法结构, 并从假设检验理论出发, 推导了检测阈值的设定公式。另外, 对比了单载波频域均衡与正交频分复用在窄带干扰下的性能, 挖掘了单载波频域均衡的性能优势, 为其在宽带航空通信的潜在应用提供了理论和实验支撑, 并将所提的频域干扰检测算法应用于单载波频域均衡。仿真结果表明, 在干扰带宽占信号带宽分别为 20%、10% 和 5% 的条件下, 与传统的基于均值、方差和中位数的干扰检测算法相比, 算法在低干信比和高干信比下 (−20~20 dB) 均取得了更低的误码率。

关键词 航空通信; 宽带通信; 窄带干扰; 干扰检测; 最大后验概率; 干信比

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.03.001

中图分类号 TN919.4 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)03-0002-07

A Jamming Detection Algorithm Based on Maximum Posterior Probability in Frequency Domain for Broadband Aeronautical Communications

WANG Peng¹, XIANG Xin², LAI Jianping³, DONG Pengyu¹, LIANG Yuan², WANG Rui²

(1. Graduate School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Aeronautical Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

3. Unit 95503, Hetian 848000, Xinjiang, China)

Abstract In view of the problems that frequency band resources of aviation communication are limited, and aviation broadband communication system is inevitably interfered with narrowband communication system, a jamming detection algorithm is proposed in frequency domain based on the maximum posterior probability criterion to achieve accurate jamming suppression in combination with the frequency threshold excision algorithm. In this paper, the algorithm structure of the jamming detection algorithm based on the maximum posterior probability criterion is established, and the formula of the detection threshold is derived from the hypothesis testing theory. In addition, the performance of single carrier frequency domain equalization is compared to that of the orthogonal frequency division multiplexing under narrowband jamming, and the performance advantages of single carrier frequency domain equalization are explored, provi-

收稿日期: 2024-05-31

作者简介: 王 鹏(1996—), 男, 山东淄博人, 硕士生, 研究方向为无线通信抗干扰研究。E-mail: wp1133130@163.com

通信作者: 向 新(1971—), 男, 湖北枝江人, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线电通信与导航。E-mail: xxisdn2002@sina.com

引用格式: 王鹏, 向新, 赖建萍, 等. 基于最大后验概率准则的宽带航空通信频域干扰检测算法[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(3): 2-8.
WANG Peng, XIANG Xin, LAI Jianping, et al. A Jamming Detection Algorithm Based on Maximum Posterior Probability in Frequency Domain for Broadband Aeronautical Communications[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(3): 2-8.

ding theoretical and experimental support for its potential application in broadband aviation communication. And then, the proposed jamming detection algorithm is applied to single carrier frequency domain equalization. The simulation results show that this algorithm achieves yet a lower error rate at both low and high jamming-to-signal ratio ($-20 \sim 20$ dB) in comparison with the traditional jamming detection algorithms based on mean, variance, and median under conditions of the interference bandwidth being occupied 20%, 10% and 5% in the signal bandwidth respectively.

Key words aeronautical communication; broadband communication; narrow-band jamming; jamming detection; maximum posterior probability; jamming-to-signal ratio

航空通信是为航空器提供信息服务的关键技术,航空产业的快速发展给航空通信提出了越来越高的要求^[1]。大幅增加的航空器数量以及种类繁多的飞机传感器需要更加高速的航空通信来保证数据的安全可靠传输,这给传统的窄带航空通信带来了严峻的挑战^[2]。因此,航空通信开始向着宽带通信方向发展。2021年,中国民航局发布了《中国民航新一代航空宽带通信技术路线图》^[3],规划了面向机场区域的航空机场场面移动通信系统(aeronautical mobile airport communication system, AeroMACS)以及面向飞行阶段的L频段航空通信系统(L-band aviation communication system, LDACS)等宽带航空通信系统的发展路径。

正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)是 AeroMACS 和 LDACS 等系统常用的多载波调制技术,单载波频域均衡(single carrier frequency domain equalization, SC-FDE)以其独特的优势成为一种潜在的航空宽带通信调制方式。相比于 OFDM, SC-FDE 具有较低的峰均比,对放大器等器件的要求更低,这非常符合航空设备的轻量化需求。然而,航空通信频段资源有限,航空宽带通信系统将不可避免的与现有的窄带通信、导航等系统发生相互干扰,因此,航空宽带通信系统需要具备干扰抑制技术,以保证在复杂航空电磁环境下的鲁棒性^[4]。

窄带干扰(narrow-band jamming, NBJ)是航空宽带通信面临的一种常见干扰。国内外已经有大量学者研究了宽带通信系统的窄带干扰抑制技术。陷波滤波器是一类时域干扰抑制技术。文献[5]介绍了无限冲激响应(infinite impulse response, IIR)陷波滤波器的理论和工作原理,并分析了陷波滤波器对通信信号的影响。文献[6]使用具有固定陷波频率的陷波滤波器来实现干扰抑制。文献[7]提出了级联陷波滤波器的方法来消除多个 NBJ。文献[8]提出了一种基于时频分析的干扰检测方法来提高陷波滤波器的性能。文献[9]提出了一种新的自适应线性相位 IIR 陷波滤波器方法,该方法可以消除

NBJ 并补偿相关峰失真。然而,基于陷波滤波器的方法对于干扰类型非常敏感,但是在这些文献中窄带干扰通常建模为一个或多个单频干扰,这与实际的窄带干扰特性不相符^[10]。近年来,新兴的稀疏恢复方法被引入到 NBJ 估计中,尤其是基于压缩感知(compressive sensing, CS)理论的方法备受关注^[11-12]。CS 理论可以用来恢复 NBJ 信号,这源于观察到 NBJ 在频域中是稀疏的^[13]。文献[14]提出了用于数字地面多媒体广播(digital terrestrial multimedia broadcasting, DTMB)系统的基于先验辅助 CS 的 NBJ 消除方案。文献[15]使用量化和 CS 恢复算法,成功地减轻了 NBJ 的频谱泄漏。然而,基于 CS 的方法很难设计出满意的实用观测矩阵,而且在真实情况下,干扰稀疏度条件并不理想,性能将受到严重限制。频率阈值切除算法(frequency threshold excision, FTE)是一类频域干扰抑制技术。由于宽带通信系统的接收端通常在频域进行均衡处理,因此频率切除算法应用于宽带通信系统将具有较低的复杂度,并且容易提供高动态范围^[16]。文献[17~19]分别提到了基于均值、方差、中位数的 FTE 算法,然而以上文献阈值通过给均值等添加一个比例因子,缺乏系统的理论说明,且在高干扰和低干扰条件下难以同时取得较好的性能。

因此,本文提出了一种基于最大后验概率(maximum a posteriori probability, MAP)准则的频域干扰检测算法,并将算法与频域切除干扰抑制算法相结合应用于宽带 SC-FDE 通信系统。仿真证明基于 MAP 准则的干扰检测算法与传统的基于均值、方差以及中位值的干扰检测算法相比具有更好的性能。另外,本文还对比了 SC-FDE 与 OFDM 在不同干扰场景下的性能,证明了 SC-FDE 在抗干扰方面的优势,为其在宽带航空通信的潜在应用提供了理论和实验支撑。

1 航空宽带通信系统系统模型

基于 OFDM 和 SC-FDE 的宽带航空通信的系

统组成如图 1 所示。

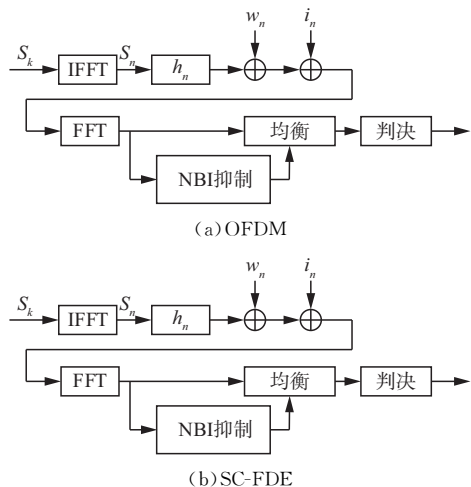


图 1 OFDM 和 SC-FDE 系统结构

Fig. 1 System structure of OFDM and SC-FDE

接收信号均可以表示为:

$$y_n = s_n \otimes h_n + w_n + i_n \quad (1)$$

式中: h_n 、 w_n 、 i_n 分别为等效离散信道、高斯噪声、窄带干扰。在 SC-FDE 系统中 s_n 为已调制信号, 在 OFDM 系统中, s_n 为已调制信号的 N 点逆快速傅里叶变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT), 可以表示为:

$$s_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (2)$$

式中: S_k 为 OFDM 系统的已调制信号。

假设经过理想同步并去掉循环前缀, 对接收信号做 N 点快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 接收信号的 FFT 可以表示为:

$$Y_k = S_k H_k + W_k + I_k \quad (3)$$

式中: H_k 、 W_k 和 I_k 分别为等效离散信道、高斯噪声和窄带干扰的 FFT 变换。频域均衡器的输出可以表示为:

$$\tilde{S}_k = S_k + \frac{W_k + I_k}{H_k} \quad (4)$$

对于 OFDM 系统, $\tilde{S}_k$ 直接被用来进行符号判决。但是对于 SC-FDE 系统, 首先需要对 $\tilde{S}_k$ 做 FFT 变换, 即:

$$\tilde{s}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[S_k + \frac{W_k + I_k}{H_k} \right] = s_n + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{W_k + I_k}{H_k} \quad (5)$$

式中: $\tilde{s}_n$ 被用来进行符号判决。

根据式 (4) 和式 (5) 可知, 窄带干扰影响 SC-FDE 系统和 OFDM 系统数据的方式有着本质的区别。具体来说, 在 OFDM 系统中, 窄带干扰只影响 OFDM 的几个子载波, 而在 SC-FDE 系统中, 由于 IFFT 变换, 窄带干扰将会影响 SC-FDE 信号的所

有数据点^[20]。

窄带干扰被建模为线性调制信号, 可表示为:

$$i_n = A b_n e^{j(2\pi\omega n + \varphi)} \quad (6)$$

式中: b_n 为干扰的基带离散信号, 在仿真中通过生成随机序列来构建; A 、 ω 和 φ 分别为干扰的载波幅度、数字频率和相位。式 (6) 的窄带干扰模型可以表示各种常见的窄带干扰信号。此外还注意到, 随后所有的推导也适用于其他干扰模型, 如单频和矩形频谱干扰。

干信比 (jamming-to-signal ratio, JSR) 用于衡量干扰相对于信号的大小, 定义为:

$$JSR = 10 \lg \frac{P_j}{P_s} \quad (7)$$

式中: P_j 为干扰的功率; P_s 为信号的功率。

2 基于 MAP 准则的频域干扰检测算法

2.1 基于传统阈值的干扰检测方法

与期望的宽带信号相比, 干扰占用的频带要小得多, 并且呈现出更高的功率谱密度。基于此, 可以使用变换域滤波技术来抑制窄带干扰 (NBI)。通过实时变换装置将接收到的信号转换到频域, 可以很容易地确定 NBI 的频率位置。在频域中切除被 NBI 破坏的部分信号^[20]。一般采用阈值检测来确定干扰的位置。大于阈值的值被认为是干扰。第 1 种阈值是基于 FFT 点幅度的平均值^[21], 即:

$$\xi_1 = \alpha \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |Y_k| \quad (8)$$

式中: α 为在接收端被优化的比例因子。

第 2 个阈值为基于 FFT 点幅值的平均值和标准差, 即:

$$\xi_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |Y_k| + \beta \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (|Y_j| - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |Y_k|)^2} \quad (9)$$

式中: β 为在接收端被优化的比例因子。

第 3 个阈值为基于 FFT 点幅值的中位数, 即:

$$\xi_3 = \theta \text{ MED } \{|Y_k|\}_{k=1,2,\dots,N} \quad (10)$$

式中: θ 为在接收端被优化的比例因子。

当干扰较强时, 阈值会被干扰支配而变大, 需要将系数设置为较小的值才能检测到干扰, 这将导致在低 JSR 下有用的信号被错误地检测为干扰, 从而降低性能。当干扰较弱时, 需要提高阈值以防止误检, 然后需要将系数设置为较大的值, 然后当 JSR 较高时, 会导致干扰被遗漏, 从而降低性能。因此,

在低干信比和高干信比下获得良好的性能是一种矛盾。

由上所述可知,基于3种传统阈值的频域抑制干扰算法不仅缺乏理论基础,且在低干信比和高干信比下获得良好的性能存在矛盾,因此本文提出了一种基于MAP准则的阈值干扰检测方法。

2.2 基于MAP准则的干扰检测算法

本文在假设检验的基础上进行理论推导。所谓假设是可能判决结果的陈述,根据观测对几种假设作出判决称为假设检验。在干扰检测过程中,“干扰存在”“干扰不存在”是2种可能的检测结果。 H_0 表示“干扰不存在”, H_1 表示“干扰存在”。

根据第1节的推导,观测值为式(3)中的 Y_k ,令 $V_k = S_k H_k + W_k$,则:

$$Y_k = I_k + V_k \quad (11)$$

求绝对值,可得:

$$|Y_k| = |I + V|_k \quad (12)$$

式中: I_k 和 V_k 服从均值为0,方差分别为 σ_I^2 和 σ_V^2 的二维正态分布。根据高斯分布的性质, $Y_k = I_k + V_k$ 服从参数为 $(0, \sigma_I^2 + \sigma_V^2)$ 的二维高斯分布。当1个随机二维向量的2个分量均服从独立的、均值为0且有着相同的方差的正态分布时,这个向量的绝对值服从瑞利分布。

因此,得到干扰检测的观测为:

$$H_0: |Y|_k = |V|_k \quad (13)$$

$$H_1: |Y|_k = |I + V|_k \quad (14)$$

式中: $|I + V|_k$ 服从瑞利分布。

首先按照MAP准则划分观测空间。在得到观测 $|Y|_k$ 的情况下,定义2种假设的后验概率 $P(H_1|z)$ 和 $P(H_0|z)$ 。比较2个后验概率的大小,认定后验概率大的假设成立,即:

$$\frac{P(H_1 || Y|_k)}{P(H_0 || Y|_k)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} 1 \quad (15)$$

由MAP公式处理式(15)可得:

$$\frac{f(|Y|_k | H_0)}{f(|Y|_k | H_1)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \frac{P(H_0)}{P(H_1)} \quad (16)$$

式中: $f(|Y|_k | H_i)$ 为似然函数; $P(H_0)/P(H_1)$ 为判决门限; $P(H_0)$ 和 $P(H_1)$ 分别为干扰不存在和存在的概率,由于窄带干扰随机出现在信号的部分频段,且带宽比例因子为 n ,则 $P(H_0) = n$, $P(H_1) = 1 - n$ 。

根据 $|Y|_k$ 的分布情况,可得:

$$f(|Y|_k | H_0) = \frac{|Y|_k}{\sigma_V^2} \exp\left(-\frac{|Y|_k^2}{2\sigma_V^2}\right), |Y|_k > 0 \quad (17)$$

$$f(|Y|_k | H_1) = \frac{|Y|_k}{\sigma_I^2 + \sigma_V^2} \exp\left(-\frac{|Y|_k^2}{2(\sigma_I^2 + \sigma_V^2)}\right), |Y|_k > 0 \quad (18)$$

将式(17)和式(18)代入式(16)可得:

$$\frac{\sigma_V^2}{\sigma_V^2 + \sigma_I^2} \exp\left(\frac{\sigma_I^2 |Y|_k^2}{2\sigma_V^2(\sigma_I^2 + \sigma_V^2)}\right) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \frac{P(H_0)}{P(H_1)} \quad (19)$$

对式(19)取自然对数,得:

$$\ln \frac{\sigma_V^2}{\sigma_V^2 + \sigma_I^2} + \frac{\sigma_I^2 |Y|_k^2}{2\sigma_V^2(\sigma_I^2 + \sigma_V^2)} \underset{G_0}{\overset{G_1}{\geq}} \ln\left(\frac{(1-n)}{n}\right) \Rightarrow |Y|_k^2 \underset{G_0}{\overset{G_1}{\geq}} \frac{2\sigma_V^2(\sigma_I^2 + \sigma_V^2) \left(\ln\left(\frac{(1-n)}{n}\right) - \ln \frac{\sigma_V^2}{\sigma_V^2 + \sigma_I^2}\right)}{\sigma_I^2} \quad (20)$$

令:

$$T = \frac{2\sigma_V^2(\sigma_I^2 + \sigma_V^2) \left(\ln\left(\frac{(1-n)}{n}\right) - \ln \frac{\sigma_V^2}{\sigma_V^2 + \sigma_I^2}\right)}{\sigma_I^2} \quad (21)$$

式中: T 为检测门限。

在本文建立2个窗口,分别称为观测窗口和评估窗口。评估窗口用于在无干扰信号中估计信号统计参数,算法的结构框图如图2所示。

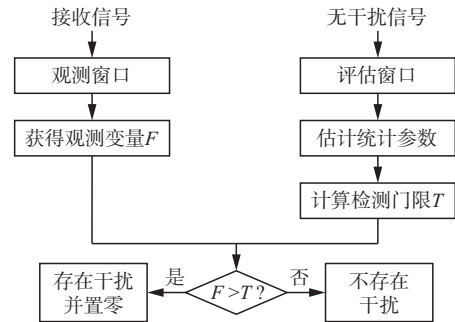


图2 检测算法结构

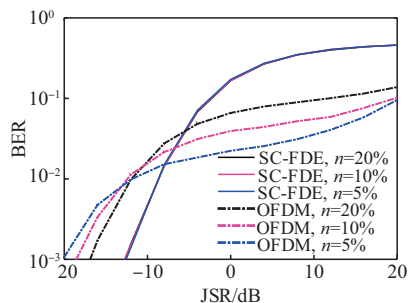
Fig. 2 Detection algorithm structure

3 SC-FDE与OFDM在干扰下的性能对比

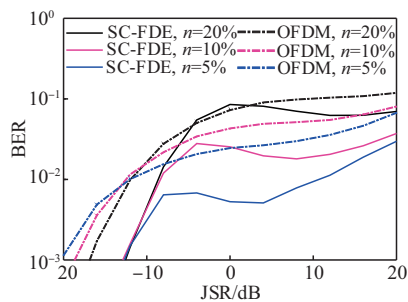
本节将分析SC-FDE和OFDM在有信道编码和没有信道编码2种条件下的性能。与SC-FDE相比,OFDM依靠纠错编码来实现分集。因此,SC-FDE和OFDM在使用和不使用信道编码时将显示完全不同的性能。为简单起见,本文采用复基带模型,所有信号均在离散时域中表示。

3.1 非编码条件下的性能对比

图3给出了在NBJ存在下具有MMSE均衡的未编码OFDM调制和未编码SC-FDE调制的性能结果示例。仿真参数见表1。



(a) 无干扰抑制



(b) 有干扰抑制

图 3 非编码 OFDM 和非编码 SC-FDE 系统在 NBJ 存在下的性能结果

Fig. 3 Performance results of uncoded OFDM and uncoded SC-FDE system in the presence of NBJ

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	值
调制类型	QPSK
数据长度	512
循环前缀长度	64
信道模型	AWGN
比特信噪比/dB	10

在图 3 中, n 为窄带干扰带宽相对于信号带宽的比例, 一般常见的窄带干扰定义带宽为小于 5%, 而宽带干扰定义带宽为大于 20%^[21], 文中将窄带干扰扩展到 $n < 20\%$, 这种设定将更具适应性。

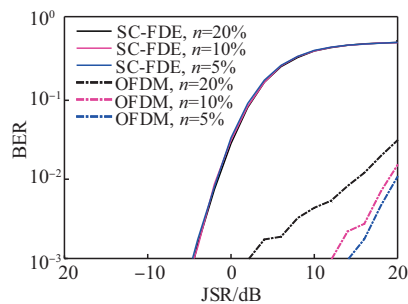
从图 3(a) 可以看出, SC-FDE 的性能不随 NBJ 带宽的大小而变化, 只与 NBJ 功率的大小有关。然而, OFDM 的性能不仅与 NBJ 的功率有关, 还与带宽有关。在高干信比下, 窄带干扰带宽增大, OFDM 误码率升高, 这是因为干扰影响的频点增多且影响较大; 在低干信比下, 窄带干扰带宽增大, OFDM 误码率降低, 这是因为干扰影响的频点虽然增多但对每个频点的影响较小。

图 3(b) 显示了基于 MAP 干扰检测的的频域阈值干扰抑制算法对 SC-FDE 和 OFDM 系统在 3 种不同干扰带宽下的误码率的影响。由此可以看出, 当 SC-FDE 与 OFDM 同时施加干扰抑制算法, SC-FDE 系统的性能明显优于 OFDM 系统。在高干信

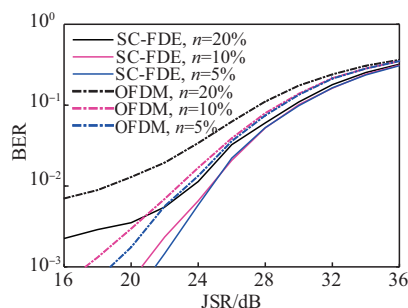
比下, OFDM 的误码率更高, 而 SC-FDE 的误码率明显降低。与 OFDM 相比, 随着 JSR 的增加, 干扰抑制算法将提高 SC-FDE 的性能。因此, 干扰抑制算法对 SC-FDE 是必要和有效的。

3.2 编码条件下的性能对比

图 4 给出了在 NBJ 存在下具有 MMSE 均衡的编码 OFDM 调制和编码 SC-FDE 调制的性能结果。纠错码采用 (2, 8) RS 码。仿真参数见表 1。



(a) 无干扰抑制



(b) 有干扰抑制

图 4 编码 OFDM 和编码 SC-FDE 系统在 NBJ 存在下的性能结果

Fig. 4 Performance results of coded OFDM and coded SC-FDE system in the presence of NBJ

图 4 表明, 干扰抑制算法对 OFDM 无效。然而, OFDM 可以依靠纠错码来显著提高其性能。对于 SC-FDE, 如果没有干扰抑制算法, SC-FDE 无法通过纠错码显著提高性能。然而, 当加入干扰抑制算法并与纠错码相结合时, SC-FDE 的性能可以得到显著提高。随着干扰带宽的减小, 这种改进变得更加显著。

4 仿真结果

4.1 干扰抑制阈值对比

图 5 展现了在不同 JSR 下干扰阈值的对比, 根据式(8)~式(10)和式(21)计算阈值。干扰阈值的选取将会影响干扰检测的准确性, 进而影响干扰抑制的性能。由图可知, 基于均值、方差和中位数进行

阈值设置的的干扰检测阈值随 JSR 呈现不同函数形式的单调增长,而基于 MAP 的干扰检测阈值先减小后增大,可以保证在低干信比时尽可能降低误检概率以减少信噪比损失。

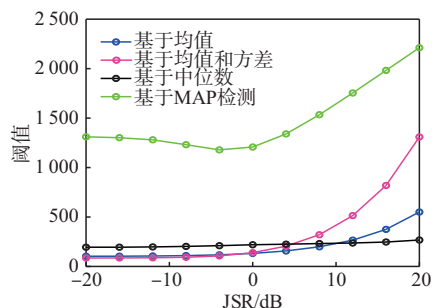
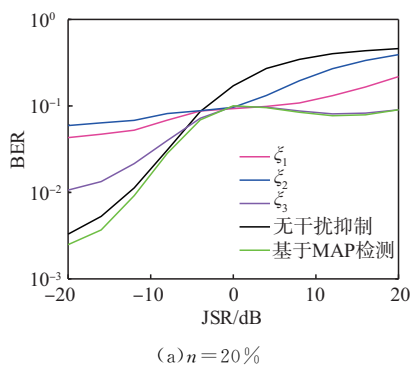


图5 基于 MAP 准则的阈值与传统阈值的对比

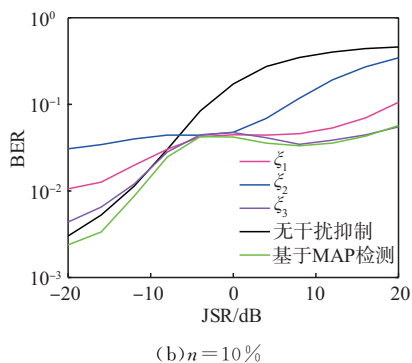
Fig. 5 Comparison of threshold based on MAP criterion with conventional thresholds

4.2 误码率对比

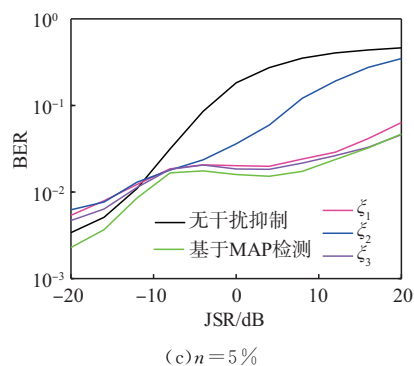
如图6所示,通过仿真得出在不同干信比下基于 MAP 的干扰检测算法与基于均值、方差和中位数阈值设置的干扰检测算法的误码率对比。其中信噪比设置为 6 dB, n 取值分别为 20%、10%和 5%。由图可知,基于 MAP 的干扰检测算法比其他 3 种算法能够取得更低的误码率,无论是在低干信比还是高干信比区域,解决了在低干信比和高干信比下均获得良好的性能存在的矛盾。随着 JSR 减小,虽然干扰对信号影响减小,但也带来了干扰检测难度加大的问题,因此算法在干信比为 5~10 dB 性能出现了波动下降。



(a) $n=20\%$



(b) $n=10\%$



(c) $n=5\%$

图6 基于 MAP 准则的检测算法与传统阈值的检测算法的误码率对比

Fig. 6 BER comparison between detection algorithm based on MAP criterion and conventional thresholds

5 结语

为了提高航空宽带通信的抗干扰能力,本文提出了一种基于 MAP 准则的频域干扰检测算法,并将算法与频域切除干扰抑制算法相结合应用于宽带 SC-FDE 通信系统。仿真证明,基于 MAP 准则的干扰检测算法与传统的基于均值、方差以及中位值的干扰检测算法相比,无论是在低干信比还是高干信比区域均能取得更低的误码率。

参考文献

- [1] MÄURER N, GRÄUPL T, BELLIDO-MANGANEL M A, et al. Flight Trial Demonstration of Secure GBAS via the L-Band Digital Aeronautical Communications System (LDACS) [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2021, 36(4): 8-17.
- [2] ZHAO J J, ZHU Y B, CAI K Q, et al. Multiple-Antenna Aided Aeronautical Communications in Air-Ground Integrated Networks: Channel Estimation, Reliable Transmission, and Multiple Access [J]. IEEE Wireless Communications, 2024, 31(2): 105-111.
- [3] 朱衍波, 王志鹏, 郭凯, 等. L 波段数字航空通信系统技术发展现状与挑战 [J]. 航空学报, 2024, 45(10): 029161.
- [4] ZHU Y B, WANG Z P, GUO K, et al. L-Band Digital Aeronautical Communications System Development Status and Challenges [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(10): 029161. (in Chinese)
- [5] ZHANG J. Aeronautical Mobile Communication: The Evolution from Narrowband to Broadband [J]. Engineering, 2021, 7(4): 43-50.
- [6] WANG H, CHANG Q, XU Y, et al. Adaptive Narrow-Band Interference Suppression and Performance Evaluation Based on Code-Aided in GNSS Inter-Satel-

- lite Links[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 538-547.
- [6] LUO X, MA J G, YEO K S, et al. Compact Ultra-Wideband (UWB) Bandpass Filter with Ultra-Narrow Dual-and Quad-Notched Bands[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(6): 1509-1519.
- [7] XIONG H L. An Efficient Narrowband Interference Suppression Approach in Ultra-Wideband Receiver[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(9): 2741-2748.
- [8] SUN K W, JIN T, YANG D K. A New Reassigned Spectrogram Method in Interference Detection for GNSS Receivers [J]. Sensors, 2015, 15(9): 22167-22191.
- [9] ZHAO H B, HU Y N, SUN H, et al. A BDS Interference Suppression Technique Based on Linear Phase Adaptive IIR Notch Filters [J]. Sensors, 2018, 18(5): 1515.
- [10] QIN W J, GAMBA M T, FALLETTI E, et al. An Assessment of Impact of Adaptive Notch Filters for Interference Removal on the Signal Processing Stages of a GNSS Receiver[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(5): 4067-4082.
- [11] LIU S C, XIAO L, HAN Z, et al. Eliminating NB-IoT Interference to LTE System: A Sparse Machine Learning-Based Approach [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6919-6932.
- [12] AL-TOUS H, BARHUMI I, AL-DHAHIR N. Narrow-Band Interference Mitigation Using Compressive Sensing for AF-OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(7): 6146-6159.
- [13] LIU S C, YANG F, DING W B, et al. Structured Compressed Sensing Based Narrowband Interference Elimination for In-Home Power Line Communications[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2017, 63(1): 10-18.
- [14] LIU S C, YANG F, DING W B, et al. Double Kill: Compressive-Sensing-Based Narrow-Band Interference and Impulsive Noise Mitigation for Vehicular Communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7): 5099-5109.
- [15] KIM K H. NBI Spectral Leakage Mitigation Based on Compressed Sensing in OFDM Systems [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2016, 62(2): 409-416.
- [16] YOUNG J A, LEHNERT J S. Analysis of DFT-Based Frequency Excision Algorithms for Direct-Sequence Spread-Spectrum Communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(8): 1076-1087.
- [17] SUN K W, ELHAJJ M, OCHIENG W Y. A GNSS Anti-Interference Method Based on Fractional Fourier Transform[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(5): 5636-5650.
- [17] ZHANG J, MENG J L. Robust Narrowband Interference Rejection for Power-Line Communication Systems Using IS-OFDM [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 680-692.
- [18] SHI K, ZHOU Y, KELLECI B, et al. Impacts of Narrowband Interference on OFDM-UWB Receivers: Analysis and Mitigation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(3): 1118-1128.
- [19] YANG W J, ZHANG C J, JIN X J, et al. Adaptive Median Threshold Algorithm Used in FDIS of DSSS Receivers[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(1): 11-18.
- [20] ALI A, MASOOD M, SOHAIL M S, et al. Narrow-band Interference Mitigation in SC-FDMA Using Bayesian Sparse Recovery[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(24): 6471-6484.
- [21] ZHAO W X, KHANAFSEH S, PERVAN B. Inertial Aiding for Moving GPS Receiver Carrier Phase Estimation through Wideband Interference [C]//2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Monterey: IEEE, 2023: 700-707.

(编辑:徐楠楠)