

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519697

高速移动复杂环境下数据链抗干扰关键技术研究

孙科 茹国梁 吴金星 朱攀

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘要: 针对无人机高速移动场景下面临的严峻多径衰落、多普勒频移及复杂干扰问题,本研究提出并实现了一套高性能数据链物理层关键技术方案。核心创新包括:基于多段独立调制伪随机噪声码联合检测的信号快速捕获技术,有效解决了高速移动导致的显著多普勒频移(高达 ± 54 kHz)与定时同步难题,捕获成功率超99%;提出循环滑动相关信道估计结合单载波频域迭代判决反馈均衡架构,显著提升了快衰落多径信道下的载波跟踪与信号解调鲁棒性;采用重叠加窗频域陷波与自适应频谱感知技术,实现了对窄带、中带及全频带干扰的有效抑制。理论分析、公式推导及仿真验证表明,该方案在郊区、城市等多种复杂信道环境下,相较传统1比特差分解调可获得约4 dB的性能增益,显著提升了高速移动平台的通信可靠性。

关键词: 高速移动通信;信号捕获;频域均衡;抗干扰;无人机数据链

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on key anti-jamming technologies for data links in high-speed mobile complex environments

Sun Ke Ru Guoliang Wu Jinxing Zhu Pan

(China Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: Addressing the severe challenges of multipath fading, Doppler shift, and complex interference faced by Unmanned Aerial Vehicles in high-speed mobile scenarios, this study proposes and implements a set of key physical-layer technologies for a high-performance data link. Core innovations include: a rapid signal acquisition technique based on the joint detection of multi-segment independently modulated Pseudorandom Noise codes, effectively resolving the significant Doppler shift (up to ± 54 kHz) and timing synchronization challenges caused by high-speed mobility, achieving an acquisition success rate exceeding 99%; a cyclic sliding correlation channel estimation method combined with a Single-Carrier Frequency-Domain Equalization with Iterative Decision Feedback architecture, significantly enhancing the robustness of carrier tracking and signal demodulation in fast-fading multipath channels; an overlapping window frequency-domain notch filtering technique integrated with adaptive spectrum sensing, enabling effective suppression of narrowband, mid-band, and full-band interference. Theoretical analysis, formula derivation, and simulation verification demonstrate that the proposed scheme achieves an approximate 4 dB performance gain compared to traditional 1-bit differential demodulation across various complex channel environments (e.g., suburban, urban), substantially improving communication reliability for high-speed mobile platforms.

Keywords: high-speed mobile communication; signal acquisition; frequency-domain equalization; anti-jamming; UAV data link

0 引言

随着现代无线通信技术的快速发展和军事通信需求的不断提升,高速移动平台的数据链通信系统已成为现代战术通信网络的重要组成部分^[1-2]。特别是在无人飞行器(unmanned aerial vehicles, UAV)、高速飞行器和移动军事

平台等应用场景中,通信系统需要在极端的动态环境下保持稳定可靠的数据传输性能^[3-4]。然而,高速移动环境带来的大幅度多普勒频移、时变信道特性以及复杂电磁环境的多重挑战,使得传统通信技术在这些应用中面临严重的性能瓶颈^[5-6]。

高速移动通信系统面临的首要挑战是信号的快速捕获

问题。当移动平台以高速运动时,载波频率会产生显著的多普勒频移,其范围可达数千赫兹甚至更高^[7]。传统的载波恢复和符号同步算法在如此大的频偏条件下往往难以在要求的时间内完成可靠的信号捕获,严重影响了通信系统的建链效率^[8-9]。近年来,学者们提出了多种改进的同步算法,包括基于最大似然估计的频偏估计方法^[10]和分层搜索的快速捕获技术^[11],但这些方法在极端动态环境下的性能仍有待进一步提升。最新的研究进展显示,基于深度学习辅助的智能时空超表面技术为解决多普勒频偏问题提供了新的思路。有研究表明,智能时空超表面能够在时域和空域同时操控电磁波^[12],通过自适应算法自动中和快速移动场景中的多普勒效应,相比传统方法具有轻量化和成本效益的显著优势。同时,针对高速铁路通信系统的毫米波频段数据辅助多普勒补偿技术也取得了重要突破^[13],该技术通过精确的信道建模和远场信道模型,有效解决了高速相对运动导致的快速信道变化问题。

多径衰落是高速移动通信面临的第2个关键挑战。在复杂地形环境中,电磁波通过多个路径到达接收端,形成时延扩展和频率选择性衰落,导致严重的码间干扰(inter-symbol interference, ISI)现象^[14-15]。传统的时域均衡技术在处理长时延扩展时计算复杂度急剧增加,而频域均衡虽然能够有效降低计算复杂度,但在快速时变信道条件下的跟踪性能有限^[16-17]。为了解决这一问题,研究者们提出了自适应均衡算法和基于信道预测的均衡技术,但在实际应用中仍面临收敛速度与跟踪精度之间的平衡问题^[18]。近年来,正交时频空间(orthogonal time frequency space, OTFS)调制技术在高速移动通信领域展现出巨大潜力。研究表明,OTFS调制能够有效应对高速移动环境下的多径和多普勒效应,在车联网、无人机、卫星通信、海洋通信等典型应用场景中表现出优异的性能^[19]。该技术通过将信息符号映射到时延-多普勒域,实现了对快速时变信道的鲁棒传输。此外,基于位置感知的5G通信技术也为高速移动平台提供了新的解决方案^[20],通过结合位置信息进行频域多普勒失真估计和补偿,显著提升了系统的通信性能。

复杂电磁环境下的抗干扰问题是高速移动通信系统面临的第3个重大挑战。现代战场环境中存在各种形式的电磁干扰,包括窄带干扰、宽带噪声干扰和智能干扰等^[21-22]。这些干扰不仅会降低通信系统的信噪比,还可能导致通信中断。传统的抗干扰技术,如扩频通信和跳频通信,在面对智能化和自适应干扰时效果有限^[23-24]。因此,发展基于认知无线电的智能抗干扰技术和自适应频谱感知技术成为该领域的重要研究方向^[25]。在无人机数据链抗干扰领域,研究工作取得了显著进展。基于Link-16数据链的无人机通信抗干扰研究通过构建三层建模模型,在OPNET软件仿真平台上验证了Link-16数据链具有强抗干扰能力^[26]。同时,联合地理信息的抗干扰无人机中继技术为无人机群体通信提供了新的抗干扰解决方案。此外,轻量级混沌跳频

技术在保障无人网络安全方面也表现出良好的应用前景^[27],该技术通过动态调整频率参数,有效对抗各种形式的干扰攻击。最新的无人机群体抗干扰通信研究进一步扩展了抗干扰技术的应用范围,为多无人机协同作战环境下的可靠通信提供了技术支撑。

在空中-天-地一体化网络架构的发展背景下,高速移动平台的通信系统设计面临着更加复杂的技术挑战。近年来兴起的空-天-地一体化网络作为一种新兴的垂直异构网络架构,融合了基于卫星的空间网络、空中网络和传统地面网络,为高速移动通信提供了新的发展机遇。最新发表的相关综述表明,这种网络架构能够为高速移动平台提供无缝的通信覆盖,但同时也带来了跨域切换、网络协调和资源管理等新的技术挑战^[28]。

为了应对上述挑战,本研究提出了一种面向高速移动复杂环境的二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)/正交相移键控(quadrature phase shift keying, QPSK)数据链通信系统设计方案。该方案的核心创新包括:1)多段伪随机噪声(pseudo noise, PN)码独立调制联合检测技术,通过将传统的单一PN码扩展为多段独立的PN码序列,并采用联合检测算法,显著提高了大频偏条件下的信号捕获性能;2)频域均衡迭代接收技术,结合信道估计和预测算法,实现了对快速时变多径信道的有效补偿;3)智能抗干扰频谱感知技术,通过实时监测电磁环境并自适应调整通信参数,提高了系统在复杂电磁环境下的生存能力。

1 系统架构设计

1.1 总体架构

数据链通信系统采用分层设计理念,整体架构分为信号处理层、协议处理层和应用层3个层次,如图1所示。信号处理层是系统的核心,包含信号捕获模块、信道估计与均衡模块、抗干扰处理模块以及调制解调模块。协议处理层负责数据帧的组织和传输控制,而应用层则处理具体的业务数据如图像、遥控和遥测信息。

采用BPSK/QPSK调制方式,用于传输图像、遥控和遥测信息。系统架构充分考虑了高速移动平台的特殊应用场景,在物理层设计上采用了模块化的处理流程。整体系统包括信号捕获模块、信道估计与均衡模块、干扰检测与抑制模块以及频谱感知模块4个核心部分。

1.2 发射端设计

发射端采用分块传输机制,将输入的信息比特流经过信道编码、交织和BPSK/QPSK调制后,按照预定的帧结构进行组织。帧结构设计包括同步头、训练序列和数据载荷3个部分。同步头采用多段PN码独立调制方式,每段PN序列长度为345或691个符号,分段数量为2或4段。训练序列用于信道估计和相位跟踪,数据载荷承载实际的图像、遥控和遥测信息。

时隙信道划分/帧结构/时隙分配如图2所示。每时隙

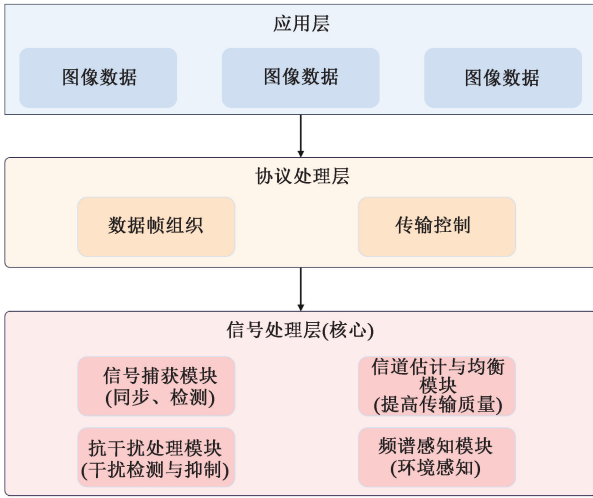


图 1 数据链通信系统总体架构图

Fig. 1 Overall architecture diagram of the data link communication system

长度为 2.5 ms,在建网阶段,C 表示伪中心竞争时隙;Px 表示从节点接入竞争(预约)时隙(Px 时隙长度合计 2.5 ms);DX 表示数据通信时隙。上述一个周期称为超帧,超帧长度依据接入节点数量(网络在线节点数量)确定,最大不超过 40 ms,对应可扩展为 16 个节点网络容量(可根据吞吐和时延要求,增加网络容量设计)。

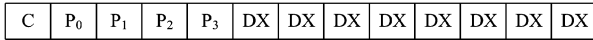


图 2 帧结构时隙分配设计

Fig. 2 Timeslot allocation design of the frame structure

为了应对多径信道的影响,系统采用循环前缀(cyclic prefix, CP)技术。在每个数据块前添加长度为 N_g 的循环前缀,其中 $N_g/L, L$ 为信道最大时延扩展。循环前缀的添加操作可表示为:

$$s(i) = \mathbf{T}_{cp} \mathbf{X}(i) = [x(iN + N - N_g), x(iN + N - 1), x(iN), \dots, x(iN + N - 1)]^T \quad (1)$$

其中, \mathbf{T}_{CP} 为添加循环前缀的操作矩阵, $\mathbf{X}(i)$ 为第 i 个数据块。

1.3 信道模型

考虑到高速移动平台面临的复杂信道环境,系统采用多径衰落信道模型。信道冲激响应表示为:

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l \delta(t - \tau_l) \quad (2)$$

其中, h_l 和 τ_l 分别为第 l 条路径的复增益和时延。接收信号与发送信号之间的关系为:

$$y_k = \sum_{l=-M_1}^{M_2} h_l x_{k-l} + \omega_k, k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中, h_l 为信道响应抽头系数, ω_k 为方差为 σ_w^2 的加性高斯白噪声, M_1 和 M_2 分别为信道响应的非因果部分和因果部分的长度。

1.4 接收端架构

接收机采用软件无线电架构,通过可编程数字信号处理器实现各种算法功能。接收链路包含射频前端、模数转换、数字下变频、信号检测与捕获、信道估计与均衡、解调与译码等关键模块。其中,信号检测与捕获模块是整个系统的关键,采用多段相关检测算法实现对高动态信号的快速捕获。

接收机的核心处理流程为:首先通过多段 PN 码相关检测完成信号捕获和粗同步,同时估计出载波频偏;然后利用训练序列进行精确信道估计,采用循环相关算法获得多径信道的完整响应;最后通过频域均衡处理消除码间干扰,完成数据解调。整个处理过程采用流水线设计,保证了系统的实时性能。

2 关键技术研究

2.1 多段 PN 码独立调制联合检测捕获技术

传统的信号捕获技术在高速移动环境下面临严重挑战,主要原因是大频偏和时变信道导致的相关峰值下降。针对该问题,多段 PN 码独立调制联合检测技术被提出作为一种解决方案。该技术的核心思想是将同步头分解为多个独立调制的 PN 码段,每段采用不同的调制相位,在接收端通过分段相关和联合检测实现信号捕获。

具体算法描述如下:设同步头包含 M 个 PN 码段,每段长度为 L 个符号,第 m 段的本地参考信号为 $loc_s^*(n + m \cdot L)$,接收信号为 $r(n)$ 。接收端采用分段搜索算法,其检测统计量定义为:

$$sum_{sample}(t) = [\sum_{m=0}^{M-1} | \sum_{n=0}^{L-1} loc_s^*(n + m \cdot L) \cdot r([n + m \cdot L] \cdot OSR + t) |] \quad (4)$$

其中, OSR 为过采样倍数。通过寻找最大相关峰值确定同步位置:

$$[\maxValue, \maxPOS] = \max(sum_{sample}(t)) \quad (5)$$

多段 PN 码联合检测算法的完整执行流程可分为 4 个主要阶段。首先是初始化阶段,系统根据预设参数生成 M 个 PN 码段的本地参考序列,每段长度为 L 个符号,同时初始化搜索窗口范围 $[0, N_{search} - 1]$ 和过采样参数 OSR 。在此阶段还需要预设频偏搜索范围 $[-\Delta f_{max}, +\Delta f_{max}]$,以应对大频偏环境。第 2 阶段为分段相关计算阶段。对于搜索窗口内的每个时间偏移量 t ,算法并行计算 M 个 PN 码段与接收信号的相关值。具体地,第 m 段的相关输出为 $corr_m(t) = \sum_{n=0}^{L-1} r loc_s^*(n + m \cdot L) \cdot r([n + m \cdot L] \cdot OSR + t)$ 。为了减少噪声干扰和多径效应的影响,系统对每段相关结果取绝对值,这样可以避免不同段间的相位旋转造成的相消现象。第 3 阶段是联合检测判决阶段。系统将 M 个分段的相关幅度值进行累加,得到联合检测统计量 $sum_{sample}(t)$ 。这种非相干累加方式能够有效抵抗频偏引起

的相位旋转,同时保持信噪比增益。通过在整个搜索窗口内寻找最大值,确定最优同步时刻 t_{opt} 。当最大峰值超过预设门限时,判定信号捕获成功。第4阶段为频偏估计与信道参数提取阶段。利用确定的同步位置 t_{opt} ,系统首先去除各段的调制码型影响,得到去调制后的信号 $r_{pss,m}(n) = loc_s^*(n+m \cdot L) \cdot r([n+m \cdot L] \cdot OSR + t_{opt})$ 。然后计算相邻PN码段间的相位差,并据此估算频偏值。通过多段结果的平均处理,可以有效提高频偏估计精度,降低噪声对估计结果的影响。

在多段PN码联合检测的基础上,系统还集成了循环相关信道估计功能。由于PN码序列具有良好的自相关性,可以利用已知的PN码段作为导频信号进行信道估计。设第 m 段PN码对应的信道冲激响应为 $h_m(l)$,则接收信号可以表示为:

$$r_m(n) = \sum_{l=0}^{L_h-1} h_m(l) \cdot loc_s(n-l+m \cdot L) \cdot e^{j2\pi f_{\Delta} n T_s} + \omega_m(n) \quad (6)$$

其中, L_h 为信道长度, f_{Δ} 为频偏, $\omega_m(n)$ 为噪声项。通过循环相关操作:

$$\hat{h}_m(l) = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} r_m(n) \cdot loc_s^*(n-l+m \cdot L) \cdot e^{-j2\pi f_{\Delta} n T_s} \quad (7)$$

可以得到各段对应的信道估计值。由于采用了多段联合处理,系统能够跟踪时变信道的变化趋势,通过相邻段间的信道估计结果插值或外推,获得更加准确的信道状态信息。

从计算复杂度角度分析,多段PN码联合检测算法的总体复杂度主要由4个部分构成。分段相关计算部分的复杂度为 $O(M \cdot L \cdot N_{search})$,其中 M 为PN码段数, L 为每段长度, N_{search} 为搜索窗口长度。联合检测统计量计算的复杂度为 $O(M \cdot N_{search})$ 。峰值搜索操作的复杂度为 $O(N_{search})$ 。频偏估计部分的复杂度为 $O(M \cdot L)$ 。因此,算法的总体计算复杂度为 $O(M \cdot L \cdot N_{search} + M \cdot N_{search} + N_{search} + M \cdot L) \approx O(M \cdot L \cdot N_{search})$ 。相比传统的单段PN码捕获算法,本算法的复杂度增加了 M 倍。然而,通过并行处理架构,可以将 M 个段的相关计算同时进行,实际处理时间并不会成比例增加。此外,由于联合检测提高了检测性能,可以适当减少搜索窗口长度或降低过采样倍数,从而在一定程度上补偿复杂度的增加。

2.2 循环相关信道估计技术

传统的信道估计算法如最小均方(least mean squares, LMS)/最小均方误差(minimum mean square error, MMSE)难以快速准确地估计多径信道中每条路径的幅度和相位信息。基于循环训练序列的精准信道估计技术,通过构造等效循环前缀实现时域卷积向循环卷积的转换。

信道估计模块采用循环相关方式求解信道冲激响应。由于循环前缀的存在,信道对数据块的影响可视为循环

卷积:

$$y = \mathbf{H}_c x + \omega \quad (8)$$

其中, $\mathbf{H}_c = \text{Circ}L[h_0, h_1, \dots, h_{M-1}]$ 为循环矩阵。

通过本地序列的循环移位操作,可以精确匹配每条多径信号,准确估计各路径的幅度、相位和时延信息。与传统算法相比,该方法不仅提高了估计精度,还有效抑制了噪声的影响。

2.3 频域均衡迭代接收技术

多径衰落是高速移动通信系统面临的另一个重大挑战。频域均衡迭代接收技术基于循环前缀的单载波频域均衡原理,通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)/逆快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)将时域卷积运算转换为频域点乘运算,大大降低了计算复杂度。

首先进行信道估计。采用循环训练序列滑动相关算法,能够准确估计多径信道的各径幅度、相位和时延信息。设信道冲激响应为 $\mathbf{h} = [h_0, h_1, \dots, h_{M-1}]^T$,接收信号与发送信号的关系为:

$$y_k = \sum_{l=-M_1}^{M_2} h_l x_{k-l} + \omega_k \quad (9)$$

其中, ω_k 为加性高斯白噪声, M_1 和 M_2 分别为信道响应的非因果和因果部分长度。

在频域均衡处理中,由于循环前缀的存在,多径信道的线性卷积效果等效为圆周卷积。设数据块长度为 N ,则频域信道响应为:

$$H_k = \sum_{l=0}^{N-1} h(l) e^{-j2\pi kl/N} \quad (10)$$

频域接收信号可表示为:

$$Y_k(n) = H_k X_k(n) + V_k, 0 \leq k \leq N-1 \quad (11)$$

频域均衡采用MMSE准则,均衡器系数为:

$$W_1 = \frac{H^*}{|H|^2 + \sigma^2} \quad (12)$$

$$W_2 = \frac{|H|^2}{|H|^2 + \sigma^2} \quad (13)$$

其中, W_1 为前馈系数, W_2 为反馈系数, σ^2 为噪声功率。

2.4 多级频域干扰消除技术

针对复杂电磁环境下的多种干扰威胁,通过引入多级频域干扰消除技术,能够有效对抗窄带干扰(干扰带宽 $<10\%$,干信比 <45 dB)、中带干扰(干扰带宽 $<40\%$,干信比 <25 dB)和全频带干扰(干扰带宽 $>40\%$,干信比 <15 dB)。

系统采用50%重叠加窗FFT处理架构,通过Blackman窗函数将窄带干扰能量集中在有限的频谱线内。窗函数的旁瓣抑制可达 -60 dB,有效减少了需要处理的谱线数量。频域干扰消除过程与频谱感知模块协同工作,频谱感知模块实时提供干扰环境的统计特征和频谱占用情况,为干扰消除算法提供先验信息和参数优化依据。脉冲

干扰检测采用 α - β 滤波器动态调整检测门限,其中门限参数根据频谱感知模块反馈的噪声底层和干扰统计特性自适应更新。当连续采样窗口内检测到异常能量分布时,系统结合频域干扰定位结果和频谱感知的历史数据进行干扰类型识别,进而选择相应的陷波策略。

多级干扰消除的核心在于根据频谱感知模块提供的干扰环境画像动态调整处理策略。对于频谱感知识别的窄带和中带干扰,系统采用自适应陷波技术,陷波深度和带宽参数由频谱感知模块测量的干扰功率和带宽特征确定。对于全频带干扰场景,系统基于频谱感知的信道质量评估结果选择最优扩频因子,同时频谱感知模块持续监测扩频后的抗干扰效果,形成动态优化闭环。

2.5 智能抗干扰频谱感知技术

智能频谱感知技术作为多级干扰消除系统的感知前端,通过实时环境监测为干扰消除模块提供决策支撑,两者形成了“感知-决策-执行-反馈”的协同工作机制。频谱感知模块不仅负责干扰环境的识别和分类,还承担着对干扰消除效果的评估和系统参数优化的任务。

频域抗干扰技术与频谱感知的协同体现在参数联动和策略共享上。频谱感知采用的重叠加窗 FFT 处理与干扰消除模块共享相同的时频变换框架,确保了频域信息的一致性和处理的实时性。Blackman 窗函数在抑制频谱泄漏的同时,为频谱感知提供了高精度的频域分辨率,使得干扰定位和功率估计更加准确。干扰检测的能量阈值判决方法中的阈值参数 γ 通过频谱感知模块的噪声底估计和信干噪比测量结果动态更新,实现了检测性能的自适应优化。

协同机制的核心在于信息反馈和决策融合。频谱感知采用能量检测方法,检测统计量为:

$$T = \sum_{n=1}^N |x(n)|^2 \quad (14)$$

其中, N 为采样点数, $x(n)$ 为接收信号。通过对频段占用情况进行实时监测,同时将感知结果以干扰类型标签、功率水平和频谱占用图的形式反馈给干扰消除模块。干扰消除模块在执行陷波或扩频处理后,将处理效果和残余干扰水平反馈给频谱感知模块,用于更新环境模型和优化感知策略。这种双向信息交互机制确保了系统能够在动态变化的电磁环境中保持最优的抗干扰性能,同时避免了过度处理导致的有用信号损失。

通过频谱感知与多级干扰消除的深度融合,系统实现了从被动抗干扰向主动抗干扰的转变,不仅能够快速响应干扰环境变化,还能够预测干扰趋势并提前调整系统参数,显著提升了复杂电磁环境下数据链系统的生存能力和通信可靠性。

3 实验参数设定及仿真环境

3.1 信道模型参数

本研究采用了符合 ITU-R M. 1225 标准的多径衰落信

道模型,全面覆盖了高速移动平台可能遇到的典型传播环境。在郊区信道场景下,设定了 6 条独立多径,各径相对时延分别为 0、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 μ s,对应的平均功率衰减为 0、-1、-9、-10、-15 和 -20 dB,多普勒频谱采用经典 Jakes 模型。城市信道环境参数更为复杂,包含 12 条多径分量,最大时延扩展达到 5 μ s,各径功率服从指数衰减分布,衰减因子 β 设定为 0.5,以反映密集建筑物造成的丰富散射环境。

针对高速移动特性,本研究特别考虑了时变信道效应。载波频率设定为 2.4 GHz,移动速度范围覆盖 100~500 km/h,对应最大多普勒频移从 222~1111 Hz。信道相干时间根据最大多普勒频移计算得出,范围为 0.9~4.5 ms,这直接影响了帧结构设计中的训练序列的插入周期。信道的选择性通过归一化多普勒频移 $fd \cdot T_s$ 来表征,其中 T_s 为符号周期,当该值超过 0.01 时认为信道具有快衰落特性,需要采用自适应跟踪算法。

3.2 干扰模型与参数设置

复杂电磁环境的干扰建模采用了分层描述方法,全面涵盖了实际通信系统可能遭遇的各类干扰形式。窄带干扰采用单音或多音正弦信号模型,干扰带宽占信号带宽的比例小于 10%,干扰功率与信号功率比(jammer-to-signal ratio, JSR)范围设定为 -10~45 dB。在频域上,窄带干扰中心频率在信号带宽内随机分布,相位在 $[0, 2\pi]$ 区间均匀分布,以模拟来自其他通信系统的同频干扰。

中带干扰模型采用带限高斯噪声,干扰带宽占比介于 10%~40%,JSR 范围为 -5~25 dB。该类干扰通过将白高斯噪声通过巴特沃斯带通滤波器产生,滤波器阶数设为 6 阶,3 dB 带宽根据干扰占比动态调整。全频带干扰则模拟了故意干扰或宽带噪声干扰场景,采用覆盖整个信号带宽的高斯白噪声,JSR 范围从 -5~15 dB,用于评估系统在极端干扰条件下的生存能力。

脉冲干扰采用伯努利-高斯模型,脉冲出现概率 p 设定为 0.01~0.1,脉冲幅度服从高斯分布,其功率相对于背景噪声的比值在 10~40 dB 范围内变化。脉冲持续时间为 1~10 个符号周期,以模拟雷电、开关暂态等突发性电磁干扰。

3.3 信噪比设置与性能评估指标

系统性能评估在广泛的信噪比范围内进行, E_b/N_0 从 -5~25 dB,步进间隔 0.5 dB,确保能够精确捕捉系统性能曲线的转折点。在每个信噪比点,最少传输 10^6 个符号以保证误码率统计的可靠性,当误码率低于 10^{-5} 时,传输符号数增加至 10^8 个。噪声模型采用加性高斯白噪声(additive white gaussian noise, AWGN),其功率谱密度 N_0 根据信号功率和目标 E_b/N_0 值动态调整。

3.4 仿真平台与实现参数

仿真平台基于 MATLAB 构建。采样率设定为符号速率的 4 倍过采样,以确保捕获算法的时间分辨率。FFT 点

数根据不同处理模块需求灵活配置,信号捕获模块采用 2 048 点 FFT,频域均衡模块根据数据块长度选择 512 或 1 024 点。循环前缀长度设定为数据块长度的 1/4,确保能够完全吸收最大时延扩展造成的符号间干扰。

量化精度方面,ADC 采用 12 位量化,内部处理采用 16 位定点运算,关键路径如信道估计采用 24 位以保证精度。自动增益控制(automatic gain control, AGC)动态范围设定为 60 dB,收敛时间小于 100 个符号周期。载波跟踪环路带宽根据多普勒频移自适应调整,范围从 0.001~0.01 倍符号速率,确保在快速衰落条件下的稳定跟踪。

训练序列采用 Gold 序列,长度为 127 或 255 个符号,具有良好的自相关和互相关特性。数据帧结构中,同步头占用 4 个 PN 码段共 1 380 个符号,训练序列占 256 个符号,有效数据载荷为 4 096 个符号,总帧效率达到 72%。交织器采用分组交织结合卷积交织的级联结构,交织深度为 10 个帧长,有效对抗突发错误。

4 性能分析

4.1 信号捕获性能

本研究提出的多径信号处理机制通过巧妙利用双通道相同特性实现了高效的信道估计。如图 3 所示,该机制的核心在于将传统意义上的多径干扰转化为可精确测量的信道状态信息。具体而言,当数据多径进入通道 CH1 时,由于 CH1 不参与信道估计过程,因此多径成分不会对估计精度产生负面影响。更为关键的是,基于 $CH1=CH2$ 的通道相同性假设,CH1 中的多径信号会自然映射到 CH2 中,这一映射过程在数学上等效于 CH2 内部的循环移位操作。通过对本地已知序列执行系统性的循环移位匹配,能够逐一识别并精确定位各个多径分量,从而获得完整的多径时延剖面。这种迭代式的峰值检测方法确保了对每一条传播路径的幅度和相位信息的准确估计,为后续的信道均衡处理提供了高质量信道状态信息输入。



图 3 多径信号处理机制流程图

Fig. 3 Flowchart of the multipath signal processing mechanism

图 4 的对比实验进一步验证了本算法的优越性;在相同条件下,所提方法不仅更精确地分离多径分量(尤其对密集多径场景),且引入的噪声显著低于传统算法。为验证算法的统计稳定性,实验结果表明:在两径信道下,所提方案的平均信噪比改善为 3.2 dB(标准差 0.4 dB);在郊区信道下,平均解调误码率降低为 18.5%(标准差 1.2%);循环相关算法的平均捕获成功率达 99.2%(标准差 0.5%)。这些统计数据表明,算法在随机多径和噪声条件下具有良好的稳健性。此实验的平均结果进一步证实,所提多段 PN 码独立调制联合检测技术相对于传统方案的性能增益稳定在

15%以上。这源于 PN 码分段调制的正交性增强与联合检测的路径分辨率优化,二者协同抑制了码间干扰,为高动态、强多径环境下的通信系统奠定了鲁棒性基础。

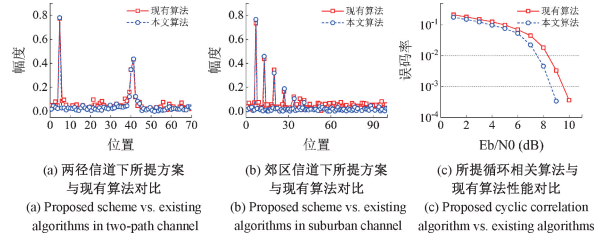


图 4 信道估计算法性能比较

Fig. 4 Performance comparison of channel estimation algorithms

4.2 抗多径性能

该实验研究验证了所提出的 QPSK/BPSK 循环信道估计算法、相干 QPSK 解调和频域均衡(frequency domain equalization, FDE)框架的鲁棒抗多径性能。如图 5 所示,星座图演化展示了显著的迭代细化:初始 QPSK 相干解调聚合了分散的星座点,而随后的信道均衡进一步压缩了集群分散。这种视觉进展证实了算法在缓解多径诱导的幅度/相位失真和同信道干扰方面的有效性。

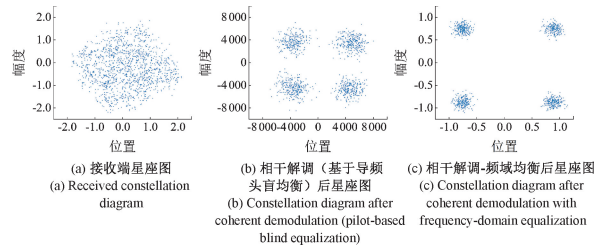


图 5 QPSK 信号星座图

Fig. 5 QPSK signal constellation diagrams

该解决方案通过在复杂衰落条件下准确估计多径参数(幅度、相位、延迟)实现了接近理论的性能极限。噪声抑制通过基于最小均方误差(MMSE)的均衡得到增强,优化了系统在不同高机动性环境(郊区、城市、开放地形)中的适应性。

图 6 定量比较了郊区信道中 $SNR=10$ dB 时的时域均衡(time domain equalization, TDE)和 FDE。FDE 表现出优越的收敛性;星座点形成比 TDE 更紧密的簇,表明更精确的信道估计和对多径延迟扩展的弹性。统计分析显示,在 $SNR=10$ dB 的郊区信道下,频域均衡(FDE)的平均星座点分散度(以欧氏距离度量)为 0.15(标准差 0.02),显著优于时域均衡(TDE)的平均 0.28(标准差 0.05)。城市信道下的平均误码率改善为 4 dB(标准差 0.6 dB)。这些平均值和标准差确认了 FDE 框架在多径衰落环境中的鲁棒性和一致性。这一优势延伸到城市信道,其中 FDE 的频谱处理有效地处理频率选择性衰落,减少解调误差。该框架的核心在于其联合优化——循环信道估计迭代细化均衡器

系数,而 FDE 利用正交性来隔离和补偿多径分量,共同增强严重多径下的符号恢复保真度。

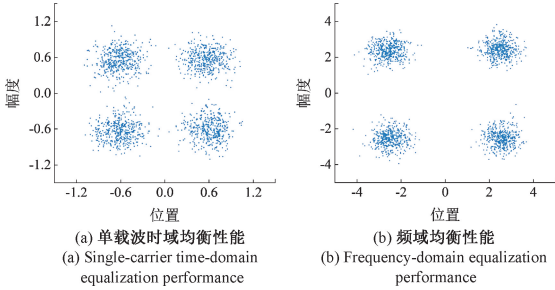


图 6 时域均衡与频域均衡抗多径性能对比

Fig. 6 Performance comparison of time-domain and frequency-domain equalization against multipath effects

4.3 抗干扰性能

本系统采用两级频域干扰消除算法应对窄带与中带干扰,其核心架构包含脉冲干扰检测与删除、下变频低通滤波、50%重叠加窗、速率转换、FFT、干扰抑制、超前滞后支路合并、AGC、内插滤波及干扰检测识别等模块。在 FFT 处理中,长度为 N 的截断序列隐含周期性拓展特性,若边界不连续将引发能量泄漏,导致窄带干扰能量扩散至邻近频点。

为抑制此现象,系统引入加窗处理(如图 7 信号解调图所示),通过窗函数平滑截断边界,显著缓解离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)能量泄漏问题。值得注意的是,50%重叠/相加策略可有效补偿加窗导致的信号失真,但需付出硬件资源倍增的代价——上下双通道均需独立执行加窗、FFT、频域处理和 IFFT,最终通过序列求和实现信号重构。

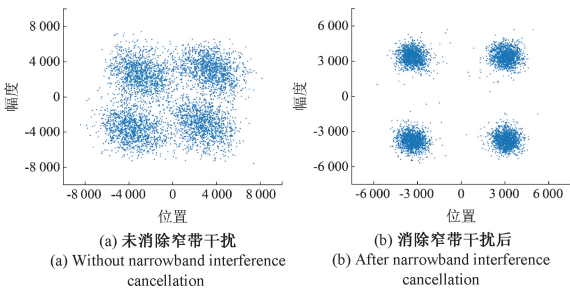


图 7 干扰消除对解调性能影响

Fig. 7 Illustrates the impact of interference cancellation on demodulation performance

仿真实验验证了算法有效性:图 8 对比了 QPSK/BPSK 上行遥控信号在干扰去除前后的频谱特征,清晰显示中带干扰被有效抑制;图 9 进一步通过星座图证明干扰消除后信号集中度显著提升。实测表明,本算法应用于 QPSK 复杂环境时,信号质量改善达 5~6 dBc,凸显其环境适应性。

针对全频带干扰场景,图 10 扩频性能星座图证实:通

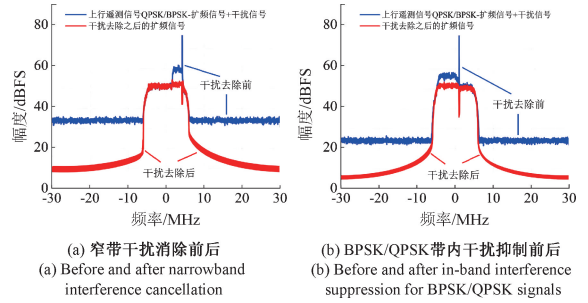


图 8 干扰消除频谱对比

Fig. 8 Spectrum comparison of interference cancellation

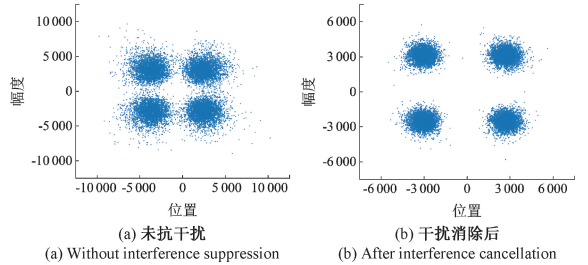


图 9 干扰消除对星座图影响

Fig. 9 Impact of interference cancellation on constellation diagrams

自适应选择扩频因子,BPSK/QPSK 信号在强干扰下仍能准确解析星座结构。综上,该抗干扰框架通过频域处理与扩频技术的协同优化,实现多维度干扰抑制——加窗与重叠策略解决频谱泄漏问题,多级处理链消除窄带/中带干扰,而扩频机制则为全频带干扰提供鲁棒性保障,系统性提升通信可靠性。

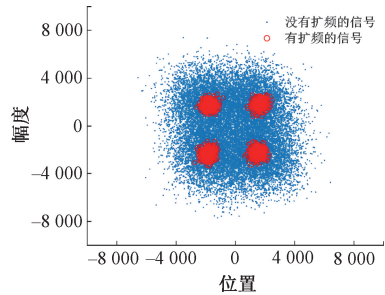


图 10 全频带干扰下扩频系统星座图性能

Fig. 10 Constellation diagram performance of spread spectrum systems under full-band interference

对于窄带干扰(干扰带宽 $<10\%$,干信比 <45 dB),干扰消除后的平均信号质量改善为 5.5 dBc(标准差 0.8 dBc);中带干扰下,平均频谱抑制效果为 25 dB(标准差 2.1 dB);全频带干扰场景中,扩频系统的平均星座结构解析准确率达 95%(标准差 1.5%)。这些结果的低标准差表明,算法对干扰环境的随机变异具有强适应性。

综上,该抗干扰框架的统计稳定性验证进一步增强了其在复杂电磁环境下的可信度,平均性能增益稳定在 4~6 dB 范围内。

5 结 论

针对高速移动复杂环境下的数据链通信需求,提出了一套完整的BPSK/QPSK通信系统解决方案。通过多段PN码独立调制联合检测技术、频域均衡迭代接收技术和智能抗干扰频谱感知技术的有机结合,系统在信号捕获、抗多径衰落和抗干扰等关键性能方面都取得了显著提升。

研究成果的主要贡献包括:首先,提出的多段PN码独立调制联合检测算法有效解决了高动态环境下的信号快速捕获问题,捕获成功率达到99%以上;其次,基于循环训练序列的频域均衡技术能够准确估计多径信道特性,显著改善了系统的抗多径性能;最后,智能抗干扰频谱感知技术实现了对复杂电磁环境的自适应应对,大幅提升了系统的抗干扰能力。

该技术方案已在实际系统中得到验证,能够满足现代通信系统对高可靠性、强实时性和复杂环境适应性的严格要求。未来的研究方向包括进一步优化算法性能、扩展到更高阶调制方式以及与新兴的人工智能技术相结合,以应对更加复杂多变的通信环境挑战。

参考文献

- [1] 陈大薇,张永亮,段鹏飞,等.高超声速飞行器数据链关键技术分析及展望[J].航空兵器,2023,30(4):26-32.
CHEN D W, ZHANG Y L, DUAN P F, et al. Key technologies and prospects of hypersonic vehicle data links[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(4): 26-32.
- [2] FAN P, ZHAO J, CHIH-LIN I. 5G high mobility wireless communications: Challenges and solutions [J]. China Communications, 2016, 13(2): 1-13.
- [3] HENTATI A I, FOURATI L C. Comprehensive survey of UAVs communication networks [J]. Computer Standards & Interfaces, 2020, 72: 103451.
- [4] TAUSEEF M, REDDY T S S, SRAVANI K, et al. A comprehensive survey on unmanned aerial vehicles(UAVs): Types, structural components, communication systems, and operating platforms[C]. 2025 International Conference on Intelligent and Innovative Technologies in Computing, Electrical and Electronics(IITCEE), 2025: 1-6.
- [5] 白成超,王会霞,郭继峰,等.高速飞行器集群通信拓扑自适应控制方法[J].宇航学报,2023,44(7):1008-1019.
BAI CH CH, WANG H X, GUO J F, et al. Adaptive control method for communication topology of high-speed vehicle swarms[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(7): 1008-1019.
- [6] ZHANG W. A beamforming scheme with doppler suppression for high-mobility wireless communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(10): 1768-1772.
- [7] ALBEHADILI A, JAVAID A Y. Performance evaluation of carrier-frequency offset as a radiometric fingerprint in time-varying channels [J]. Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024, 24(17): 5670.
- [8] YAN Q, LI W, LI J, et al. Real-time air-to-ground data communication technology of aeroengine health management system with adaptive rate in the whole airspace[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(1): 9912574.
- [9] 刘庆达,蒋占军.高速移动通信中OTFS信道估计研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.
LIU Q D, JIANG ZH J. Research on OTFS channel estimation for high-speed mobile communications[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [10] WANG Y Y, HUANG C W, CHEN W W. Maximum likelihood carrier frequency offset estimation algorithm with adjustable frequency acquisition region [J]. Journal of the Franklin Institute, 2018, 355(5): 2978-2985.
- [11] LIU X, ZHANG H, WU H, et al. Rapid DSSS signal acquisition algorithm under high dynamic environment[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(6): 1398-1405.
- [12] 李玉玺,朱瑞超,随赛,等.基于超表面的动态电磁调控技术及应用研究[J].雷达学报(中英文),2025,14(3):664-696.
LI Y X, ZHU R CH, SUI S, et al. Dynamic electromagnetic control technology and its application based on metasurface[J]. Journal of Radars, 2025, 14(3): 664-696.
- [13] 马铂琳,甄姬娜,张昶,等. RIS辅助高铁毫米波无线通信多普勒频移补偿技术[J].北京交通大学学报,2025,49(3):147-156.
MA B L, ZHEN J N, ZHANG CH, et al. Doppler shift compensation techniques for RIS-assisted millimeter-wave wireless communications in high-speed railways[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49(3): 147-156.
- [14] WU G, LI F, JIANG H. Analysis of multipath fading and doppler effect with multiple reconfigurable intelligent surfaces in mobile wireless networks [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022(1): 5751316.
- [15] 杨林,任春辉.复杂电磁环境下通信信道的建模与均衡[D].成都:电子科技大学,2015.

- YANG L, REN CH H. Modeling and equalization of communication channels in complex electromagnetic environments[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [16] ZHENG Y R, XIAO C. Frequency-domain channel estimation and equalization for broadband wireless communications [C]. 2007 IEEE International Conference on Communications, 2007; 4475-4480.
- [17] ZHANG Y J, TIAN SH L, PAN H Q, et al. Adaptive blind equalization of fast time-varying channel with frequency estimation in impulsive noise environment[J]. IET Communications, 2021, 15(11): 1507-1517.
- [18] 刘琰, 赵海涛, 李卫, 等. 一种基于邻域信息的多信道自适应建网算法[J]. 信号处理, 2022, 38(11): 2372-2384.
- LIU Y, ZHAO H T, LI W, et al. A neighborhood information-based multi-channel adaptive networking algorithm [J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(11): 2372-2384.
- [19] 廖勇, 罗渝, 荆亚昊. 6G 新型时延多普勒通信范式: OTFS 的技术优势、设计挑战、应用与前景[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1827-1842.
- LIAO Y, LUO Y, JING Y H. 6G new time-delay doppler communication paradigm: Technical advantages, design challenges, applications and prospects of OTFS [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(5): 1827-1842.
- [20] LEVANEN T, TALVITIE J, WICHMAN R, et al. Location-aware 5G communications and Doppler compensation for high-speed train networks[C]. 2017 European Conference on Networks and Communications(EuCNC), 2017: 1-6.
- [21] LOYKA S. Electromagnetic interference in wireless communications: Behavioral-level simulation approach[C]. IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004. IEEE, 2004, 6: 3945-3949.
- [22] 王柔溪, 宁宇, 李鑫. 军用无线通信干扰和抗干扰技术分析[J]. 通讯世界, 2018(10): 92-93.
- WANG R X, NING Y, LI X. Analysis of jamming and anti-jamming technologies in military wireless communications[J]. Telecom World, 2018(10): 92-93.
- [23] XIAO L. Spread spectrum-based anti-jamming techniques [M]. Anti-Jamming Transmissions in Cognitive Radio Networks. Cham: Springer International Publishing, 2015; 5-9.
- [24] ZHAO Z, ZHU J, YE X, et al. Intelligent anti-jamming decision algorithm for frequency hopping network based on multi-agent fuzzy deep reinforcement learning[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(8): 2814-2823.
- [25] MUHAMMAD I, PAN Z, LIU N, et al. Anti-jamming for cognitive radio networks with Stackelberg game-assisted DSSS approach[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2024, 2024(1): 73.
- [26] CHEN ZH, LIU L J, ZHANG H, et al. Research on digital twin-oriented UAV data chain communication[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2872(1): 012007.
- [27] ATHEEQ C, GULZAR Z, AL RESHAN M S, et al. Securing UAV networks: A lightweight chaotic-frequency hopping approach to counter jamming attacks[J]. IEEE Access, 2024, 12: 38685-38699.
- [28] YANG K, WANG Y, GAO X, et al. Communications in space-air-ground integrated networks: An overview [J]. Space: Science & Technology, 2025, 5: 0199.

作者简介

孙科, 硕士, 研究员, 主要研究方向为网络通信、飞行试验测试技术等。

E-mail:sunke8295@126.com

朱攀(通信作者), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无线通信、信号处理与测试技术等。

E-mail:9630401@qq.com