

基于直接序列扩频的远距离无线通信技术研究

刘广涛 闪 曦

河南省信息咨询设计研究有限公司 河南 郑州 450008

摘 要: 直接序列扩频 (DSSS) 技术凭借优良的抗干扰与保密传输特性, 在无线通信领域应用广泛, 但在超远距离复杂野外信道中, 易受路径损耗、多径衰落与码同步偏差影响, 通信稳定性大幅下降。本文聚焦远距离无线通信场景下DSSS系统的应用短板, 从扩频码优化、同步捕获算法、信号解调机制及通信架构四个维度开展优化研究。通过改进Gold复合码、自适应码长切换、频偏补偿同步及双模解调等技术, 解决远距离弱信号传输失真、同步失效、误码率偏高的问题。经工程场景适配验证, 优化方案可有效提升复杂地形、低信噪比环境下的通信可靠性, 可为野外测控、远距离物联网传输等场景提供技术支持。

关键词: 直接序列扩频; 远距离通信; 无线通信优化技术; 工程应用与适配

引言: 远距离无线通信是野外测控、广域物联网、山地监测等场景的核心通信支撑, 传统窄带通信技术抗干扰与抗衰落能力薄弱, 难以适配复杂户外信道的传输需求。DSSS扩频通信技术具备抗干扰、低截获、可多址组网的优势, 成为远距离无线通信的优选技术。但在超远距离、多遮挡、强时变的野外场景中, 常规DSSS系统存在传输损耗补偿不足、弱信号捕获困难、多径干扰抑制能力有限等实际问题, 制约其工程落地。基于此, 本文结合远距离信道传输特性, 剖析传统DSSS系统的固有缺陷, 针对性提出全套系统优化方案, 并结合实际工程场景验证技术适配性, 为远距离稳定无线扩频通信提供可行优化路径。

1 直接序列扩频与远距离无线通信基础理论

1.1 直接序列扩频 (DSSS) 技术基本原理

直接序列扩频技术是扩频通信中应用最广泛的调制技术, 核心原理是利用高速伪随机码序列, 对低速基带信号进行频谱扩展处理。在信号发射阶段, 系统将待传输的有效基带信号与伪随机扩频码进行模二加运算, 将窄带信号频谱拓宽至数十倍甚至数百倍, 形成宽带扩频信号完成发射。在接收阶段, 接收端采用与发射端完全同步的同源扩频码, 对接收信号进行相关解扩处理。其中, 有效信号可完成频谱压缩还原, 恢复为原始基带信号, 而信道中的窄带干扰信号会被频谱展宽, 干扰能量被大幅分散, 从而降低干扰对通信质量的影响。

1.2 远距离无线通信传输特性与约束条件

远距离无线通信多依托自由空间、野外复杂信道完成信号传输, 传输过程存在明显的路径损耗、多径衰落和时延扩散等特性。随着传输距离增加, 电磁波辐射能量随传输路径持续衰减, 距离越远, 接收端信号功率

越低, 极易出现低信噪比传输状态。野外地形、植被、建筑物会造成电磁波反射、折射与散射, 形成多径传输效应, 导致信号幅值起伏、相位偏移, 引发信号衰落失真。除此之外, 远距离通信还存在诸多约束条件, 信道环境中的电磁干扰、传输带宽限制、设备发射功率阈值、信号传输时延误差等, 都会直接制约远距离通信的传输距离与通信稳定性, 也是常规无线通信难以实现超远距离稳定传输的核心原因。

1.3 DSSS技术应用于远距离通信的核心优势

相较于传统窄带无线通信技术, DSSS技术适配远距离通信具备以下技术优势。(1) 具备极强的抗衰落能力, 扩频后的宽带信号可有效规避窄带信道衰落影响, 弱化远距离多径传输带来的信号失真问题, 保障长距离传输稳定性。(2) DSSS抗干扰性能突出, 通过解扩压制信道噪声与电磁干扰, 可在低信噪比的远距离传输场景中有效识别有效信号, 提升通信可靠性。(3) 具备良好的隐蔽性, 扩频信号功率谱密度低, 不易被检测与截获, 适配野外远距离保密通信场景。(4) DSSS可实现码分多址通信, 能够在同一信道承载多路远距离通信数据, 在保障传输距离的同时, 提升信道资源利用率, 适配多场景远距离无线传输需求^[1]。

2 远距离场景下 DSSS 通信系统缺陷

直接序列扩频技术在超远距离野外、空旷及复杂地形通信场景中, 受信道环境与设备性能限制, 存在以下多项固有缺陷:(1) 远距离路径损耗制约传输距离。电磁波在远距离自由空间传播时会产生固定路径损耗, 传输距离越远, 接收端接收信号功率越低。DSSS系统依靠扩频增益保障通信质量, 但扩频增益存在上限, 当传输距离超出阈值, 路径损耗会抵消扩频增益优势, 导致接收信号信噪比

持续降低,出现信号失真、数据误码率升高的问题,无法实现超远距离稳定传输。(2)复杂信道多径衰落影响通信质量。远距离通信场景多存在地形遮挡、植被覆盖和建筑物反射,极易形成多径传输效应。DSSS系统对多径信号的分辨能力有限,不同时延的多径信号叠加后,会造成信号相位偏移、幅值波动,引发严重的信道衰落,破坏信号完整性,导致远距离通信链路频繁波动。(3)远距离码同步捕获难度大幅提升。扩频码精准同步是DSSS系统正常工作的核心前提。远距离传输带来的信号时延、频率偏移和信号衰减,会造成接收端扩频码捕获时间延长、同步精度下降,极易出现同步失效、解扩失败等问题,大幅降低远距离通信的可靠性^[2]。

3 面向远距离的 DSSS 通信系统优化技术

3.1 适配远距离传输的扩频码优选与优化

扩频码的相关特性直接决定DSSS系统的解扩性能与抗干扰能力。传统m序列和标准Gold序列仅适配近距离、高信噪比的常规通信场景,在远距离无线信道中,受路径损耗、高频噪声与多径效应影响,存在自相关旁瓣偏高、序列平衡性差、码间抗干扰能力弱等缺陷,易出现解扩峰值模糊、误码率攀升等问题,无法满足远距离稳定传输要求。对此,以下从序列选型和动态适配角度完成扩频码针对性优化。(1)改进型Gold复合码优选。本文选用性能更优的改进型Gold复合码作为核心扩频序列。该序列自相关主峰尖锐、旁瓣幅值低,可有效抑制多径传输引发的码间串扰,精准区分有效信号与杂散信号。同时序列直流分量更低,能够改善远距离弱信号传输的基线漂移问题,显著提升低信噪比环境下的信号解扩精度,适配复杂长距离信道的传输需求。(2)扩频码长自适应优化设计。固定码长难以适配远距离信道的动态损耗特性,短码扩频增益不足、长码传输速率受限。本文设计信道自适应码长切换机制,依托接收信号强度与实时误码率判断信道损耗等级,动态匹配序列码长。中短距离低损耗场景采用短码保障传输速率,超远距离高损耗、强干扰场景切换长码提升扩频增益,依靠增益补偿路径损耗,在不增加设备发射功率与能耗的前提下,提升弱信号传输稳定性,实现传输速率与通信距离的性能平衡。

3.2 改进型信号同步与快速捕获算法设计

扩频码同步捕获是远距离DSSS通信链路建立的核心前提,同步速度与精度直接决定通信可靠性。传统串行捕获算法时延长、弱信号捕获成功率低,并行捕获算法硬件开销大,无法适配野外轻量化嵌入式终端的运行条件。以下结合工程实际,设计轻量化改进型同步捕获算

法,兼顾捕获性能与硬件适配性。(1)分段滑动相关捕获优化。重构传统全域滑动相关运算模式,将连续扩频数据流分割为固定长度数据块,分段完成相关运算与峰值检测。该方式大幅降低单次运算算力消耗,缩短同步时延,有效解决远距离信号时延偏移导致的捕获超时问题。配合全局峰值比对筛选机制,可精准锁定码同步位置,显著提升低信噪比下弱信号的捕获准确率。(2)前置频偏补偿同步技术。远距离户外通信的信道时变特性、设备轻微移动会产生多普勒频偏与频率偏移,破坏扩频码相位一致性,引发同步偏移甚至失步。本次优化在捕获前端增设频偏估计与补偿模块,通过实时采样信道参数测算频率偏差,提前校正接收信号频偏误差,消除频率偏移对相关运算的干扰,有效提升复杂远距离场景的同步成功率与链路稳定性。

3.3 低信噪比下信号解调方案优化

远距离传输会造成信号能量大幅衰减,系统长期处于低信噪比工作状态。传统固定阈值相干解调对相位畸变、信道衰落敏感度高,极易出现解调判决错误,难以保障远距离通信质量。针对该问题,下文优化设计适配弱信号场景的双模自适应解调方案。(1)动态阈值解调判决优化。摒弃传统固定解调判决门限,搭建基于实时信道状态的自适应阈值调整机制。系统实时采集噪声强度、信号幅值、误码率等核心参数,动态修正解调判决阈值,适配远距离信道的时变衰落特性,规避低信噪比环境下的噪声误判与信号漏判问题,提升弱信号解调准确性。(2)相干与差分融合解调设计。结合两种解调方式的技术优势构建智能切换机制。高信噪比、信道稳定场景启用相干解调,依托高精度相位解调特性保障数据传输精度;远距离深度衰落、相位紊乱、同步精度下降时,自动切换至差分解调模式,利用其无需精准相位同步的特性,规避相位偏移导致的解调失效问题,兼顾通信精度与远距离场景适配能力。

3.4 抗干扰远距离DSSS通信架构设计

传统通用DSSS架构未针对远距离复杂电磁环境优化,存在窄带干扰抑制能力弱、功率适配性差、弱信号容错率低等问题。下文从接收抗干扰、链路自适应控制两个维度,完成系统轻量化架构优化,提升远距离通信的抗干扰能力与环境适配性。(1)前端多级滤波抗干扰架构。在接收链路前端增设可调谐多级窄带滤波模块,针对性滤除野外工业设备、输电线路及民用通信设备产生的固定频点窄带干扰,阻挡带外噪声与杂散信号进入解扩单元,避免弱扩频信号被干扰淹没,有效提升系统信噪比下限,强化复杂电磁环境下的远距离抗干扰能

力。(2) 自适应功率调控链路架构。构建闭环功率调控机制,接收端实时回传信号强度与误码率指标,发射端动态调整射频发射增益与输出功率。近距离低干扰场景降低发射功率,减少设备能耗;超远距离高损耗场景提升发射增益,精准补偿信道路径损耗,在硬件功率阈值内最大化延伸传输距离,保障远距离通信链路持续稳定运行^[3]。

4 DSSS 远距离无线通信技术工程应用与适配

4.1 野外远距离测控通信场景应用

野外测控区域普遍传输距离较远,电磁环境繁杂且缺少基站信号覆盖,常规无线通信抗干扰、抗衰落性能偏弱,时常出现链路断开、数据丢失现象,无法满足野外设备数据采集与远程操控要求。优化后的DSSS系统具备长距传输、抗干扰、隐蔽性强等优势,适用于地质勘查、气象观测、山地设备管控等野外作业场景。(1) 定点测控数据传输应用。野外固定监测点位铺设通信终端,依托优化扩频码与同步算法,可实现数十公里数据稳定传输,可靠回传温湿度、地质震动等传感信息,抵御野外多径衰落与电磁干扰,改善山地旷野通信不稳、数据丢包问题。(2) 移动野外测控适配应用。面对野外巡检、车载动态通信场景,系统通过频偏补偿与自适应同步技术,修正设备移动产生的频移问题,稳固通信链路。该系统无需依托公用网络,组网灵活,能够适配偏远无基站区域的测控作业。

4.2 长距离物联网数据传输应用方案

远距离物联网节点分布零散,传输跨度大,设备功耗低且业务数据体量小,传统窄带通信抗干扰性差,长距离传输误码偏高,难以实现大范围组网通信。优化DSSS系统可匹配分布式节点传输要求,搭建稳定广域通信网络。(1) 广域节点组网传输。农田灌溉、林区防护、水文监测等场景中,利用码分多址技术支持多节点同频同步传数。依靠扩频增益抵消路径损耗,无需增加设备发射功耗即可拓展传输范围,缩减中继设备布设规模,减少组网投入成本。(2) 低功耗数据适配传输。系统采用功率自适应调控模式,终端依照信道损耗与传输

远近自主调整发射功率。远距离高损耗工况提升发射增益弥补信号衰减,近距离工况降低功耗,兼顾设备长效低耗运行,保障传感数据与控制指令准确传输。

4.3 复杂地形下DSSS通信适配优化策略

山地、丘陵、河谷地貌会遮挡、反射电磁波,诱发多径衰落与信号损耗,阻碍DSSS技术实际落地。按地形特征制定适配策略,全面提升环境适应能力与通信质量。(1) 地形损耗动态适配策略。针对山地丘陵信号遮挡损耗,开启码长自适应切换与双模解调模式。遮挡严重、信号衰减明显时,切换长扩频码增强增益,结合差分解调规避相位畸变引发的解调错误,保障通信链路正常连通。(2) 多径干扰抑制适配策略。河谷、丛林区域多径干扰突出,借助多级滤波模块与优化捕获算法,剔除杂散干扰信号,精准完成码同步判定。有效削弱码间串扰,缓解信号失真与同步偏移问题,增强复杂地形下远距离通信的稳定程度^[4]。

结束语:本文系统分析了DSSS技术应用于远距离无线通信的优势与现存问题,围绕扩频序列、同步捕获、信号解调、系统架构完成全方位轻量化优化设计,有效解决了远距离传输路径损耗、多径衰落、同步失步及弱信号解调失效等核心难题。优化后的DSSS系统适配野外测控、广域物联网、复杂地形通信等多种工程场景,可在不提升设备功耗的前提下,兼顾传输距离与通信稳定性。

参考文献

- [1]陆瑞,江汉,任江飞.基于自编码器与直接序列扩频的端到端无线通信技术研究[J].现代电子技术,2024,47(7):83-88.
- [2]张嵘.基于直接序列扩频的远距离无线通信技术研究[D].四川:电子科技大学,2025,02(02):11-12.
- [3]骆政嘉.300GHz远距离无线通信中的关键技术研究[J].移动通信,2025,29(04):4-6.
- [4]王晓波,胡旭娟,姬雪峰.海洋浮标低功耗远距离无线通信技术研究进展[J].水下无人系统学报,2025,33(4):733-742.