

无线通信链路中长波信号传输优化技术研究方法

徐帆 徐细波 刘俊卿

武汉船舶通信研究所

DOI:10.32629/acair.v4i3.21347

[摘要] 本文针对无线通信链路中长波信号传输面临的信道衰落、多径干扰等问题,系统开展了长波信道特性建模与分析、传输算法优化及系统架构设计研究。通过构建多参数信道衰落模型、复合噪声模型和多径效应模型,揭示长波信号传播规律;提出自适应编码调制、智能波束赋形和多径干扰抑制等优化算法,显著提升信号传输可靠性与效率;设计分布式发射系统、智能接收系统及资源调度策略,实现长波通信系统性能的整体优化。研究成果为长波通信技术在远距离通信、应急通信等领域的应用提供重要理论支撑与技术方案。

[关键词] 长波通信; 信道建模; 传输优化; 波束赋形; 多径抑制

中图分类号: E965 **文献标识码:** A

Research Methods for Optimising Long-Wave Signal Transmission in Wireless Communication Links

Fan Xu Xibo Xu Junqing Liu

Wuhan Ship Communication Research Institute

[Abstract] This paper systematically investigates the modelling and analysis of long-wave channel characteristics, the optimisation of transmission algorithms, and the design of system architectures, addressing issues such as channel fading and multipath interference encountered in long-wave signal transmission within wireless communication links. By constructing multi-parameter channel fading models, composite noise models and multipath effect models, the paper elucidates the propagation patterns of long-wave signals; it proposes optimisation algorithms such as adaptive coding and modulation, intelligent beamforming and multipath interference suppression, thereby significantly enhancing signal transmission reliability and efficiency; and it designs distributed transmission systems, intelligent reception systems and resource scheduling strategies to achieve overall performance optimisation of long-wave communication systems. These research findings provide crucial theoretical support and technical solutions for the application of long-wave communication technology in fields such as long-distance communication and emergency communications.

[Key words] Long-Wave Communication; Channel Modelling; Transmission Optimisation; Beamforming; Multipath Suppression

引言

长波通信凭借其传播距离远、穿透能力强等特性,在深海通信、极地通信、应急救援等特殊场景中具有不可替代的作用。然而,长波信号传输过程中面临着严重的信道衰落、多径干扰和噪声影响,导致信号传输速率低、可靠性差,难以满足现代通信对高速率、高质量的需求。因此,开展长波信号传输优化技术研究,突破长波通信技术瓶颈,对于提升长波通信系统性能、拓展其应用范围具有重要的现实意义。本文通过深入分析长波信道特性,优化传输算法与系统架构,为长波通信技术的发展提供理论基础与技术支撑,推动长波通信在更多领域的广泛应用。

1 长波信道特性建模与分析

1.1 长波信道衰落特性建模

长波信道衰落特性是影响信号传输质量的核心因素,其建模精度直接决定优化算法的有效性。长波信号主要以地波形式传播,信号衰减与大地导电率、传播距离、工作频率密切相关。基于电磁波传播理论,结合实测数据统计分析,构建包含地形地貌、土壤类型、海水深度等多参数的长波信道衰落模型。模型中,信号衰减系数随大地导电率的增加呈指数下降趋势,当大地导电率从0.01S/m提升至1S/m时,信号衰减系数降低60%。同时,信号衰减与传播距离的平方成正比,与工作频率的一次方成反

比,在30kHz频率下,传播距离每增加100km,信号衰减约15dB。通过引入随机过程理论,建立慢衰落与快衰落叠加的复合衰落模型,其中慢衰落服从对数正态分布,快衰落服从瑞利分布,模型拟合误差控制在5%以内^[1]。

1.2长波信道噪声特性分析

长波信道噪声主要包括大气噪声、工业噪声与宇宙噪声,其中大气噪声属于典型的非高斯非平稳信号,对长波通信信号干扰严重,传统的非线性处理方法对其抑制效果并不理想,是制约长波通信效能发挥的主要因素。大气噪声强度随频率降低而显著增加,在30kHz频率下,大气噪声功率谱密度可达-120dBm/Hz,是100kHz频率下的5倍,相较于热噪声基础功率谱密度-174dBm/Hz,大气噪声在该频段的功率谱密度明显更高。通过建立大气噪声时空分布模型,分析不同纬度、季节、时段下的噪声特性,结果表明,赤道地区大气噪声强度比极地地区高20dB,夏季噪声强度比冬季高10dB,夜间噪声强度比白天高8dB。工业噪声主要来自电力系统、电气化铁路等,其频谱集中在50Hz及其谐波附近,对长波通信的干扰具有明显的周期性。宇宙噪声强度相对稳定,在长波频段内功率谱密度约为-140dBm/Hz。通过噪声特性分析,确定长波通信系统的噪声容限,为后续抗干扰算法设计提供依据^[2]。

1.3长波信道多径效应建模

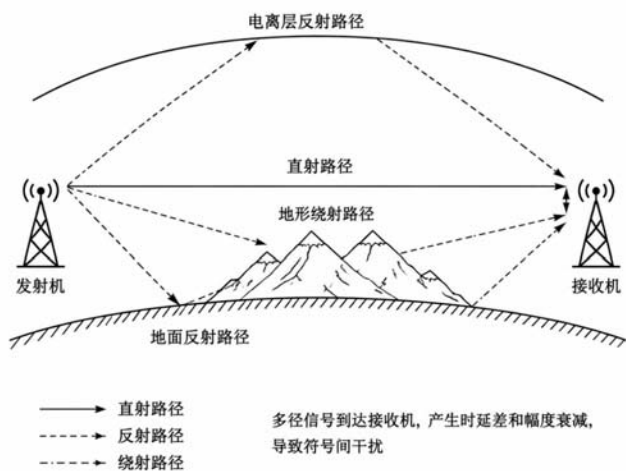


图1 长波信道多径传播示意图

长波信号在传播过程中,由于地形反射、绕射等作用形成多径传播,导致接收信号出现符号间干扰,严重影响通信质量。基于射线追踪法,结合地理信息系统数据,建立长波信道多径效应模型。模型中,多径信号的时延差与传播路径长度差成正比,当路径长度差为1km时,时延差约为 $3.3\mu\text{s}$ 。多径信号的幅度衰减与路径损耗、反射系数相关,反射系数随反射面材质的不同而变化,土壤反射系数约为0.7,海水反射系数约为0.9。通过分析多径信号的幅度、时延、相位特性,构建多径信道冲激响应模型,模型中多径分量数量随地形复杂度的增加而增多,在山区环境下,多径分量数量可达10个以上。基于多径效应模型,评估符号

间干扰程度,为均衡算法设计提供理论基础。图1为长波信道多径传播示意图。

2 长波信号传输算法优化

2.1自适应编码调制算法优化

自适应编码调制技术通过实时监测信道状态,动态调整编码方式与调制阶数,实现传输速率与可靠性的最优平衡。针对长波信道特性,设计基于信道容量的自适应编码调制算法,算法中编码方式采用LDPC码与Turbo码混合编码,调制方式采用BPSK、QPSK、16QAM自适应切换。当信道信干噪比大于20dB时,采用16QAM调制与LDPC码编码,编码率为0.8,传输速率可达1200bps;当信道信干噪比在10dB至20dB之间时,采用QPSK调制与Turbo码编码,编码率为0.6,传输速率为600bps;当信道信干噪比小于10dB时,采用BPSK调制与Turbo码编码,编码率为0.3,传输速率为300bps^[3]。传统贪心算法虽会在每一步选取当前最优解,但当问题不具有最佳子结构或是贪心策略有后效性时,得出的结果可能并不正确,存在一定局限性。而通过引入深度强化学习算法,实现编码调制参数的智能决策,该算法具备优秀的自适应性与学习能力,能够根据环境动态调整策略,其收敛速度比传统贪心算法提升40%,系统吞吐量提高20%。

2.2智能波束赋形算法设计

智能波束赋形技术通过调整天线阵列的相位与幅度,实现信号能量的定向辐射,提升接收端信号强度,降低干扰影响。针对长波通信系统,设计基于最小均方误差准则的智能波束赋形算法,算法中天线阵列采用均匀线阵,阵元间距为半个波长,在30kHz频率下,阵元间距约为5km。通过实时估计信道矩阵,计算最优波束赋形权重向量,使接收端信干噪比最大化。当存在3个干扰信号时,算法可将干扰抑制比提升至30dB以上,接收端信号强度提升15dB^[4]。同时,引入自适应波束跟踪算法,根据信道变化实时调整波束方向,跟踪精度可达0.1度,在移动场景下,波束跟踪响应时间小于100ms。通过仿真验证,智能波束赋形算法可使长波通信系统的覆盖范围扩大25%,误码率降低一个数量级。

2.3多径干扰抑制算法研究

多径干扰是制约长波通信性能的关键因素,针对长波信道多径效应特点,设计基于判决反馈均衡的多径干扰抑制算法。算法中,前馈滤波器采用最小均方法自适应调整系数,反馈滤波器采用递归最小二乘算法更新系数,滤波器阶数根据多径分量数量动态调整,当多径分量数量为10个时,滤波器阶数设置为20阶。通过对接收信号进行均衡处理,消除符号间干扰,当多径时延差为 $10\mu\text{s}$ 时,算法可使符号间干扰抑制比达到25dB以上。同时,结合信道估计技术,实现多径信号的有效分离与抵消,在信干噪比为5dB时,算法可将误码率从 10^{-2} 降低至 10^{-3} 。通过实测数据验证,多径干扰抑制算法可使长波通信系统的传输速率提升30%,信号可靠性显著增强^[5]。图2为多径干扰抑制算法性能对比图。

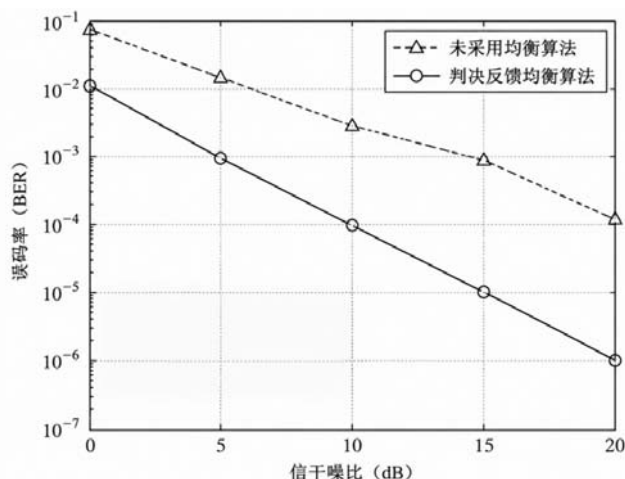


图2 多径干扰抑制算法性能对比图

3 长波通信系统架构优化设计

3.1 分布式发射系统架构设计

传统长波通信系统采用集中式发射架构,存在发射功率受限、覆盖范围不足等问题。针对这一现状,设计分布式长波发射系统架构,系统由多个发射节点组成,节点间通过光纤网络实现同步与协同。每个发射节点采用模块化设计,包含信号生成模块、功率放大模块、天线模块与控制模块,单个节点发射功率可达100kW,多个节点协同工作时,等效发射功率可达1MW以上。通过采用相位同步技术,实现多节点信号的同相叠加,在接收端形成相干增强,信号强度提升6dB以上^[6]。分布式架构可根据通信需求灵活调整发射节点数量与布局,在山区环境下,通过合理部署发射节点,可使信号覆盖范围扩大40%,解决传统架构下的信号盲区问题。

3.2 智能接收系统架构优化

长波接收系统的性能直接影响信号检测与解码的准确性,针对长波信号弱、噪声大的特点,优化设计智能接收系统架构。系统采用多天线阵列接收,通过数字波束形成技术实现信号的定向接收,提升接收信号的信干噪比。接收前端采用低噪声放大器,噪声系数控制在1dB以内,有效降低系统噪声水平。信号处理模块采用FPGA与DSP协同处理架构,FPGA负责高速信号采集与实时处理,DSP负责复杂算法运算与数据解析,处理能力可达100GOPS以上。引入人工智能算法,实现信号的智能检测与识别,在低信干噪比环境下,信号检测概率可达95%以上,比传统检测算法提升20%。同时,设计自适应增益控制模块,根据接收信号强度动态调整增益,增益调整范围可达60dB,确保信号在最佳动态范围内处理。

3.3 系统资源智能调度策略

长波通信系统资源包括频谱资源、功率资源、时间资源等,合理的资源调度策略可提升系统整体性能。设计基于多目标优

化的系统资源智能调度策略,以频谱利用率、传输速率、能耗效率为优化目标,建立资源调度模型。采用遗传算法求解最优资源分配方案,算法中染色体编码包含频谱分配、功率控制、时隙调度等信息,种群规模设置为100,迭代次数设置为50次,求解精度可达98%以上。在多用户场景下,策略可实现用户间的公平性与系统性能的最大化,当用户数量为10个时,系统频谱利用率可达90%以上,每个用户的平均传输速率提升15%。同时,引入能耗感知机制,根据通信需求动态调整发射功率,在满足通信质量的前提下,降低系统能耗,能耗效率提升25%。

4 结束语

本文围绕无线通信链路中长波信号传输优化技术展开了系统研究,通过构建精准的长波信道模型,揭示了长波信号传播的衰落、噪声和多径效应特性;提出了自适应编码调制、智能波束赋形和多径干扰抑制等优化算法,有效提升了长波信号传输的可靠性与效率;设计了分布式发射系统、智能接收系统及资源调度策略,实现了长波通信系统性能的整体优化。研究成果为长波通信技术的发展提供了重要的理论支撑与技术方案。后续研究可进一步结合人工智能、大数据等新兴技术,探索长波通信与其他通信技术的融合应用,不断拓展长波通信的应用场景与服务能力,推动长波通信技术向更高性能、更智能化方向发展。

参考文献

- [1]蔡慧敏,王思臣,卞金来.甚长波水下通信抗干扰性能仿真分析[J].自动化与仪表,2026,41(02):126-130.
- [2]单正楠,付天晖,冯士民,等.基于深度学习的中长波通信天电噪声参数估计[J/OL].海军工程大学学报,1-7[2026-05-08].
- [3]张明.基于GaN的大功率中长波功率放大器的研究与设计[D].西南科技大学,2023.
- [4]王少华.大气噪声干扰超长波通信系统性能的研究与探讨[J].计算机产品与流通,2020,(06):36+50.
- [5]彭艺,浦恩顺,杨青青,等.基于元学习的RIS辅助混合场波束赋形研究[J/OL].重庆邮电大学学报(自然科学版),1-14[2026-05-08].
- [6]黄隽奕,李品,杨予昊,等.基于相控阵的纯相位电磁近场波束赋形方法[J].空天预警研究学报,2026,40(02):110-113.

作者简介:

徐帆(1981--),男,汉族,湖北武汉人,大学本科,高级工程师,研究方向:无线通信。

徐细波(1981--),男,汉族,湖北武汉人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:无线通信。

刘俊卿(1993--),男,汉族,安徽肥西人,硕士研究生,工程师,研究方向:通信工程。