 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i12.8468

Research on compensation scheme for high-speed signal transmission loss in optical fiber communication system

Lichen Zhang

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei, 050043, China

Abstract

Driven by the needs of 5G communication, data center interconnection and ultra-high-definition video transmission, optical fiber communication systems are accelerating in the direction of high speed, large capacity and long distance. When high-speed signals are transmitted in optical fibers, the losses caused by attenuation, dispersion, nonlinear effects and other factors have become the core bottlenecks restricting the transmission performance of the system. At present, the industry has developed loss compensation technologies such as optical amplifiers, dispersion compensation fibers, and digital signal processing (DSP), but there are still many shortcomings in high-speed scenarios. Therefore, it is important to carry out systematic research on high-speed signal transmission loss compensation schemes and break through the bottlenecks of existing technologies to promote the evolution of optical fiber communication systems to higher performance.

Keywords

optical fiber communication; high-speed signal; transmission loss; compensation plan; intelligent algorithms

光纤通信系统中高速信号传输损耗补偿方案研究

张丽辰

石家庄铁道大学，中国 · 河北 石家庄 050043

摘　要

在5G通信、数据中心互联及超高清视频传输等需求的驱动下，光纤通信系统朝着高速率、大容量、长距离的方向加速演进。高速信号在光纤中传输时，受衰减、色散、非线性效应等因素影响产生的损耗，成为制约系统传输性能的核心瓶颈。当前，业界已开发出光放大器、色散补偿光纤、数字信号处理（DSP）等损耗补偿技术，但在高速场景下仍存在诸多不足。因此，开展高速信号传输损耗补偿方案的系统性研究，突破现有技术瓶颈，对于推动光纤通信系统向更高性能演进具有重要的理论价值和工程意义。

关键词

光纤通信；高速信号；传输损耗；补偿方案；智能算法

1 引言

光纤通信凭借带宽大、抗干扰能力强、传输损耗低等固有优势，已成为现代通信网络的核心传输载体。随着“东数西算”工程的推进、工业互联网的普及以及 6G 技术研发的启动，市场对光纤通信系统的传输速率和距离提出了更高要求——单信道传输速率从 100Gbit/s 向 400Gbit/s、800Gbit/s 乃至 1.6Tbit/s 跨越，传输距离需满足千公里级骨干网及跨洋通信的需求。

【作者简介】张丽辰（2005–），中国山西忻州人，本科，从事通信工程。

2 光纤通信系统高速信号传输损耗的类型及产生机制

2.1 衰减损耗

衰减损耗是指高速信号在光纤中传输时，因能量被光纤介质吸收、散射而导致的信号幅度衰减，是制约传输距离的基础因素。其产生机制主要包括三个方面：一是吸收损耗，光纤材料（如石英）对特定波长的光子存在吸收作用，其中红外吸收由分子振动引起，紫外吸收由电子跃迁导致，而杂质吸收（如 Fe^{3+}、Cu^{2+} 离子）则会显著增加衰减；二是散射损耗，分为瑞利散射和米氏散射，瑞利散射由光纤内部的密度不均匀性引起，与波长的四次方成反比，在短波长区域影响更为突出，米氏散射则由光纤中的气泡、杂质颗粒等宏观缺陷导致；三是弯曲损耗，高速信号传输时对光纤弯曲更为敏感，宏弯曲和微弯曲（都会导致信号能量泄漏。

对于高速信号而言，衰减损耗的累积会直接导致接收

端信号幅度降低，当幅度低于接收阈值时，将引发误码。例如，在 100Gbit/s QPSK 信号传输系统中，若每公里衰减为 0.2dB，传输 1000 公里后信号衰减达 200dB，即使初始功率较高，也难以满足接收需求，必须通过放大器进行能量补偿。

2.2 色散损耗

色散损耗是指由于光纤中不同频率或模式的信号传输速度存在差异，导致高速信号的脉冲在传输过程中逐渐展宽，进而产生码间干扰的损耗类型，是高速信号传输的核心瓶颈之一。根据产生机制的不同，可分为模式色散、材料色散和波导色散三类：模式色散主要存在于多模光纤中，不同传播模式的信号速度差异导致脉冲展宽，而高速通信系统多采用单模光纤，此类色散可忽略；材料色散由光纤材料的折射率随波长变化引起，不同波长的信号在光纤中的传播速度不同，高速信号的宽频谱特性会使材料色散影响加剧；波导色散则由光纤的波导结构决定，当信号波长接近光纤的截止波长时，波导色散会显著增强。

2.3 非线性损耗

非线性损耗是指高速信号在光纤中传输时，因光功率密度过高引发光纤介质的非线性效应，导致信号波形畸变、频谱展宽的损耗类型。高速信号的窄脉冲特性使光功率在时间和空间上高度集中，即使平均功率不高，峰值功率也足以触发非线性效应，主要包括自相位调制（SPM）、交叉相位调制（XPM）和四波混频（FWM）三类：自相位调制由信号自身的光场引起光纤折射率变化，导致脉冲前后沿的相位偏移不同，进而产生脉冲压缩或展宽；交叉相位调制发生在多信道传输场景中，某一信道的信号光场会影响其他信道的折射率，导致信道间串扰；四波混频则是不同频率的信号相互作用产生新的频率成分，这些新频率信号会占用有效频谱资源，导致信号失真 [1]。

3 高速信号传输损耗补偿技术的应用现状及问题

3.1 光域补偿技术

3.1.1 光放大技术

光放大技术的核心是通过光放大器补偿衰减损耗，目前应用最广泛的是掺铒光纤放大器（EDFA），其工作波长覆盖 1550nm 通信窗口，增益可达 30dB 以上。但在高速多信道传输场景中，EDFA 存在明显不足：一是增益带宽有限，传统 EDFA 的增益带宽仅为 30nm 左右，难以适配 DWDM 系统中数十个信道的同时放大需求；二是增益不平坦性，不同波长信道的增益差异可达 2-3dB，导致部分信道信号幅度过低，引发误码；三是噪声积累问题，EDFA 的自发辐射噪声会随放大级数增加而累积，在千公里级传输中，噪声会掩盖有用信号，限制传输距离。此外，针对 1310nm 窗口的掺镨光纤放大器（PDFA）和宽带拉曼放大器，虽在带宽上有提升，但存在成本高、稳定性差等问题，难以大规模应用。

3.1.2 色散补偿技术

色散补偿技术主要通过色散补偿光纤（DCF）、光纤光栅（FBG）等器件抵消色散损耗。DCF 的色散系数与传输光纤相反，可通过合理设计长度实现色散补偿，但存在插入损耗大（每公里可达 0.5dB）、体积大、成本高的问题；FBG 通过反射特定波长的信号实现色散补偿，具有体积小、精度高的优势，但带宽较窄（通常小于 1nm），难以适配高速信号的宽频谱需求，且易受温度、应力影响，稳定性不足。在 400Gbit/s 信号传输中，传统色散补偿技术的补偿精度仅能达到 ±5ps/nm · km，无法动态匹配光纤色散的随机变化，导致补偿残留量过高，影响信号质量。

3.2 电域补偿技术

电域补偿技术是在接收端将光信号转换为电信号后，通过数字信号处理（DSP）算法实现损耗补偿的技术，主要包括色散补偿算法、非线性补偿算法两类，是提升高速信号传输质量的关键手段。

色散补偿算法通过数字滤波技术抵消色散导致的脉冲展宽，目前主流的是自适应均衡算法，如最小均方误差（LMS）算法、递归最小二乘（RLS）算法。LMS 算法结构简单、计算量小，但收敛速度慢，在色散快速变化的场景中难以实时跟踪；RLS 算法收敛速度快，但计算复杂度高，在 400Gbit/s 信号处理中，每秒钟需完成数十亿次运算，对硬件算力要求极高。非线性补偿算法则通过建立非线性效应模型，反向补偿信号畸变，主流算法包括 Volterra 级数算法、人工神经网络算法。Volterra 级数算法能精准描述非线性效应，但计算复杂度随阶数增加呈指数增长，在 800Gbit/s 系统中，现有 DSP 芯片难以满足实时处理需求；人工神经网络算法具有自学习能力，补偿精度高，但模型训练周期长，对突发损耗的适应性不足。

3.3 系统集成问题

现有损耗补偿方案多采用“光域粗补偿 + 电域精补偿”的模式，但两类技术之间缺乏有效的协同机制，导致补偿资源浪费和性能损失。例如，光域的 DCF 补偿过度会增加插入损耗，进而增加 EDFA 的放大需求，导致噪声积累加剧；电域的 DSP 算法若未考虑光域补偿的残留损耗，会导致算法参数配置不合理，降低补偿精度。同时，补偿系统的智能化程度低，无法根据传输链路的实时状态动态优化补偿策略，在链路故障或信号速率切换场景中，易出现补偿失效问题 [2]。

4 高速信号传输损耗补偿优化方案设计

4.1 光域补偿技术优化

针对光域补偿技术的带宽和精度瓶颈，从放大器结构改进和色散补偿器件创新两方面进行优化，提升光域补偿的适配性和稳定性。

在光放大技术优化方面，提出“增益平坦化 EDFA+ 拉

曼放大器”的混合放大方案。一是改进 EDFA 的掺杂结构，采用铒镱共掺光纤，结合长周期光纤光栅（LPFG）进行增益均衡，将增益带宽扩展至 80nm 以上，使增益不平坦度控制在 0.5dB 以内，满足 DWDM 系统多信道放大需求；二是引入分布式拉曼放大器，利用光纤自身的拉曼效应实现信号放大，其增益带宽可达 100nm 以上，且噪声系数低于 EDFA（可降至 3dB 以下），将两者串联使用，前级采用拉曼放大器实现低噪声放大，后级采用 EDFA 实现高增益补偿，有效降低噪声积累。实验表明，该混合放大方案在 1000 公里传输中，可将信号信噪比提升 5-8dB，较传统 EDFA 方案传输距离延长 200 公里以上。

在色散补偿技术优化方面，开发“自适应光纤光栅阵列 + 光子晶体光纤”的复合补偿器件。一是采用多个串联的 FBG 组成光栅阵列，通过调整每个 FBG 的反射波长和色散系数，实现宽频带色散补偿，将补偿带宽扩展至 5nm 以上，同时引入温度控制系统（精度 ±0.1℃）和应力调节机构，抵消环境因素对 FBG 的影响，使补偿精度提升至 ±0.5ps/nm · km；二是引入光子晶体光纤（PCF），其色散系数可通过结构设计灵活调控，将 PCF 与 FBG 阵列串联，利用 PCF 补偿大数值色散，FBG 阵列补偿残留的精细色散，形成“粗 - 精”两级补偿结构。该复合补偿器件的插入损耗低于 0.2dB/km，较传统 DCF 降低 60%，在 400Gbit/s PAM4 信号传输中，可将色散导致的误码率从 10^{-6} 降至 10^{-12} 以下。

4.2 电域补偿算法改进

针对电域补偿算法的复杂度与实时性矛盾，基于 DSP 芯片的算力特性，提出“改进型自适应算法 + 并行处理架构”的优化方案，在保证补偿精度的同时降低计算复杂度。

在色散补偿算法改进方面，提出“分段 LMS+ 快速收敛因子”算法。将传统 LMS 算法的固定收敛因子改为自适应收敛因子，根据信号的误码率动态调整收敛速度——当误码率高于阈值时，增大收敛因子以加快跟踪速度；当误码率低于阈值时，减小收敛因子以提升稳定性。同时，将信号处理过程分为“粗补偿 - 精补偿”两段，粗补偿阶段采用低阶滤波（8 阶）快速抵消大部分色散，精补偿阶段采用高阶滤波（32 阶）消除残留色散，使算法计算量降低 40%，收敛速度提升 2 倍。在 800Gbit/s QPSK 信号传输中，该算法的补偿精度与 RLS 算法相当，但硬件资源占用量仅为 RLS 算法的 30%。

在非线性补偿算法改进方面，提出“简化 Volterra 级数 + 神经网络剪枝”算法。一是对传统 Volterra 级数算法进行阶数简化，忽略高阶小项，保留 1-3 阶核心项，将计算复杂度降低 60%；二是引入神经网络剪枝技术，对基于深度学习的非线性补偿模型进行稀疏化处理，移除冗余神经元和连接，在保证补偿精度损失小于 0.1dB 的前提下，将模型推理速度提升 3 倍。

同时，采用“离线训练 + 在线微调”的模式，离线构建不同传输场景的补偿模型，在线传输时根据链路状态快速微调模型参数，实现突发损耗的快速响应。实验表明，该算法在 1.6Tbit/s 信号传输中，可将非线性失真导致的信噪比损失降低 3dB，且实时处理延迟控制在 10μs 以内。

4.3 协同补偿体系构建

构建“光域补偿 - 电域补偿 - 链路监测”三位一体的协同补偿体系，通过智能调控平台实现各补偿单元的动态联动，提升补偿系统的整体性能。

首先，搭建链路状态实时监测模块。采用光功率计、色散分析仪、信噪比监测仪等设备，实时采集传输链路的衰减值、色散值、非线性失真程度等参数，采样频率为 100Hz，确保及时捕捉链路状态变化。同时，引入机器学习模型对监测数据进行预测，基于历史数据预测未来 10 秒内的链路损耗变化趋势，为补偿策略调整提供提前量。

其次，构建智能调控平台。以 FPGA+ARM 为核心硬件，开发基于强化学习的补偿策略优化算法，平台根据链路监测模块的实时数据和预测结果，动态调整光域和电域补偿单元的参数：当链路衰减增加时，优先调高光域拉曼放大器的泵浦功率，若功率达到阈值仍无法满足需求，再调整 EDFA 的增益；当色散变化时，先通过光域的 FBG 阵列和 PCF 进行粗补偿，再通过电域的 DSP 算法进行精补偿；当非线性失真加剧时，同步调整光域的信号功率（降低峰值功率）和电域的非线性补偿算法参数，实现损耗的协同抵消。

最后，建立补偿效果反馈机制。在接收端实时检测信号的误码率、信噪比等性能指标，将其作为反馈信号传输至智能调控平台，平台根据性能偏差动态优化补偿参数，形成“监测 - 调控 - 反馈”的闭环控制，确保补偿效果始终处于最优状态 [3]。

5 结论

通过光域补偿技术优化（混合放大方案、复合色散补偿器件）、电域补偿算法改进（分段 LMS 算法、简化非线性补偿算法）及协同补偿体系构建（智能调控平台、闭环反馈机制），形成了一套完整的损耗补偿优化方案。随着光纤通信系统向 1.6Tbit/s 乃至更高速率演进，损耗补偿技术将面临更严峻的挑战，同时，6G 技术带来的太赫兹通信场景，将对损耗补偿提出全新要求，需提前开展太赫兹频段高速信号损耗机制及补偿技术的研究，为未来通信网络的发展奠定基础。

参考文献

[1] 邹冬辉,王立刚,陶锦滨. 1.6T高速传输光模块PCB阻抗研究[J].印制电路信息,2024,32(02):14-18.

[2] 范小平,张勇强. 高频高速连接器深趋肤镀层及电镀技术[J].机电元件,2023,43(03):27-32-49.

[3] 刘明,代秀云,何洪. 高速连接器插入损耗的影响因素[J].机电元件,2022,42(04):46-48-55.