 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i10.7909

Research on Joint Noise Resistance of Probabilistic Shaping and Digital Signal Processing in High-Speed Optical Fiber Communication Systems

Mingyu Zhang

Taishan Science and Technology University Dayue District, Tai ‘an, Shandong, 271000, China

Abstract

This study aims at the noise suppression problem in high-speed optical fiber communication systems and proposes a combined anti-noise scheme of probabilistic shaping and digital signal processing. By analyzing the noise characteristics of the system and its influencing mechanism, it is demonstrated that probabilistic shaping reduces nonlinear damage by optimizing the signal probability distribution, and digital signal processing compensates for transmission damage through algorithm cascade. The research constructed a joint optimization framework, clarified the principle by which the two achieve performance enhancement through functional complementarity, and designed a complete implementation process. This scheme effectively enhances the signal-to-noise ratio tolerance and nonlinear suppression capability of the system, providing a technical path for the performance optimization of high-speed optical fiber communication systems.

Keywords

High-speed optical fiber; Communication system; Digital signal; Research on Noise Resistance

高速光纤通信系统中概率整形与数字信号处理联合抗噪研究

张明宇

泰山科技学院，中国 · 山东 泰安 271000

摘　要

本研究针对高速光纤通信系统中的噪声抑制问题，提出概率整形与数字信号处理的联合抗噪方案。通过分析系统噪声特性及其影响机理，论证概率整形通过优化信号概率分布降低非线性损伤，数字信号处理通过算法级联补偿传输损伤。研究构建了联合优化框架，阐明二者通过功能互补实现性能增强的原理，并设计了完整的实现流程。该方案有效提升了系统的信噪比容限与非线性抑制能力，为高速光纤通信系统性能优化提供了技术路径。

关键词

高速光纤；通信系统；数字信号；抗噪研究

1 引言

互联网、云计算和虚拟现实等业务的飞速发展，使得对数据流量的需求呈现急剧增长趋势。大容量、高传输速率的光纤通信系统成为目前发展的主流。随着数据流量持续增长，高速光纤通信系统面临严峻的噪声挑战。线性与非线性的混合损伤严重制约了系统容量与传输距离的进一步提升。为逼近香农极限，单一抗噪技术已难以满足需求。本文聚焦概率整形与数字信号处理的协同机制，通过联合优化发射信号分布与接收端损伤补偿，构建自适应抗噪系统架构，旨在有效提升系统在复杂噪声环境下的传输性能与可靠性。

【作者简介】张明宇（2004–），女，中国山东泰安人，本科，从事通信工程专业研究。

2 高速光纤通信系统与噪声特性分析

2.1 高速光纤通信系统架构

高速光纤通信系统架构主要由发射、传输和接收三大核心模块构成。发射端通过高精度数字信号处理单元完成数据编码与调制，将电信号转换为光信号，并由激光器与调制器输出。光信号经光纤信道进行长距离传输，在此过程中需要掺铒光纤放大器等中继设备对衰减信号进行周期性补偿。接收端的光电检测器负责将光信号还原为电信号，进而由高性能数字信号处理单元完成信号的均衡、时钟恢复与解码。该架构旨在实现每秒太比特级的数据速率，其性能极限主要受制于传输过程中累积的各类噪声与非线性损伤 [1]。因此，各模块间的协同设计与信号处理的精确性，是保障系统实现高阶调制格式下大容量、长距离可靠传输的基础。

2.2 主要噪声来源及其特性

高速光纤通信系统的主要噪声来源包括线性噪声与非线性损伤。线性噪声以放大器的自发辐射噪声为核心，其特性表现为加性白色高斯噪声，功率与传输距离及放大器数量成正比。非线性噪声主要源于光纤介质中的克尔效应，表现为自相位调制、交叉相位调制及四波混频等现象，其强度与入纤光功率的立方成正比，具有明显的功率相关性。此外，系统还受到激光器相位噪声、光电探测器散粒噪声及热噪声的影响。相位噪声会导致载波相位漂移，散粒噪声遵循泊松统计规律，热噪声则由接收端电路元件产生。这些噪声在频域和时域上具有不同的分布特性与统计规律，共同构成了限制系统性能提升的固有瓶颈。

2.3 噪声对系统性能的影响机理

噪声对系统性能的影响机理主要体现在其对信号完整性的破坏与系统容限的压缩。线性噪声叠加在传输信号上，直接导致信噪比劣化，进而提升误码率。放大器自发辐射噪声作为加性高斯白噪声，其功率积累会掩盖微弱信号，降低接收机灵敏度。非线性损伤则通过改变光纤折射率引发相位与幅度畸变，导致星座点扩展和旋转，严重扰乱调制格式。这种损伤与信号功率强相关，在高功率传输时尤为显著，不仅产生符号间干扰，还通过非线性薛定谔方程制约着系统的最大可达容量。相位噪声引起载波同步困难，增加解调复杂度。各类噪声源的共同作用显著压缩了系统操作裕量，限制了传输距离与频谱效率的提升，构成高速光纤通信系统性能的主要瓶颈 [2]。

3 概率整形技术原理与抗噪性能分析

3.1 概率整形的基本理论

概率整形是一种通过改变发射端符号出现概率来优化系统性能的信号处理技术。其核心理论依据在于香农信道容量理论，即当输入信号的分布与信道特性匹配时可实现最大信息传输速率。该技术突破传统均匀分布调制方式的局限性，通过赋予振幅较小的符号较高出现概率，而振幅较大的符号较低出现概率，形成近似高斯分布的发射符号序列。这种概率分布优化能够有效降低传输信号的平均功率，同时保持信息熵基本不变，从而在相同平均功率条件下提升系统的信噪比容限。从信息论角度分析，概率整形通过调节互信息量与熵的比值，使系统工作点更接近理论上的信道容量极限，为高阶调制系统在非线性信道中的可靠传输提供了理论基础。

3.2 概率整形的实现方法

概率整形的实现方法主要包含概率幅度整形的构建与映射过程。该方法通常采用分布匹配器作为核心组件，通过特定算法将均匀分布的输入比特序列转换为具有目标概率分布的幅值序列。恒定成分分布匹配器是实现这一过程的关键技术，它通过精心设计的编码规则，在保持汉明重量恒定的前提下生成非均匀分布的星座点。另一种常见实现途径基于前缀编码，利用变长编码原理将二进制序列映射到不同出现概率的调制符号。在实际系统应用中，通常采用概率幅度整形与前向纠错编码相结合的集成方案，其中分布匹配器输出与纠错编码器协同工作，确保传输序列既满足概率分布要求又具备纠错能力。这些实现方法均需在发射端完成概率分布的精确控制，并在接收端配置对应的逆处理模块以实现信号的正确恢复。

3.3 概率整形对系统抗噪能力的提升作用

概率整形对系统抗噪能力的提升作用主要体现在其优化信号分布的内在特性。通过降低高功率符号的出现概率，该技术有效减小了信号的平均发射功率，从而显著降低光纤非线性效应的积累，抑制非线性噪声的产生。在相同平均发射功率条件下，概率整形使系统能够获得约 1-2dB 的信噪比增益，这一改进直接转化为对线性噪声的更强容忍度。经过整形的信号分布更接近高斯特性，使得星座图中各符号点的决策区域得到优化，增强了信号在噪声干扰下的区分度与可辨识性。这种分布优化使系统工作点更接近理论信道容量，在维持相同传输速率的前提下，显著降低了对接收端信噪比的门限要求，从而在存在放大器自发辐射噪声与非线性的混合干扰环境中，实现误码性能的实质性改善与传输可靠性的有效提升 [3]。

4 数字信号处理关键技术及其抗噪功能

4.1 数字信号处理在光纤通信中的角色

数字信号处理在光纤通信系统中承担着信号恢复与损伤补偿的核心角色。该系统模块部署于发射与接收两端，构成保障高速传输性能的关键技术基础。在发射端，数字信号处理负责完成前向纠错编码、概率整形映射及预均衡等操作，为信号注入抗干扰能力。接收端的处理任务更为繁重，需对经信道劣化的信号进行时钟恢复、偏振解复用、频偏估计与相位补偿等一系列操作。数字信号处理通过自适应均衡算法补偿光纤色散与偏振模色散引起的波形失真，利用盲相位搜索等算法校正激光器相位噪声，并借助非线性补偿技术部分抵消克尔效应的影响。这些处理过程协同工作，显著提升了系统对各类线性与非线性损伤的容限，是实现高速光纤通信系统大容量、长距离传输不可或缺的技术支撑。

4.2 核心抗噪数字信号处理算法

在高速光纤通信系统中，核心抗噪数字信号处理算法构成抵御传输损伤的技术支柱。自适应均衡算法通过不断更新滤波器抽头系数，有效补偿由色散与偏振模色散引起的码间干扰。针对相位噪声与频偏问题，盲相位搜索与载波相位恢复算法能够准确估计并校正接收信号的相位旋转误差。前向纠错编码通过引入冗余校验位，为系统提供可量化的编码增益，显著提升对随机错误的纠正能力。非线性补偿算法，如数字反向传播与 Volterra 级数均衡器，通过数值计算方式

部分抵消光纤克尔效应引起的信号失真 [4]。此外，基于恒模算法的偏振解复用技术能够在不依赖训练序列的情况下，实现偏振态的实时跟踪与分离。这些算法在接收端构成协同处理链路，通过逐级消除不同性质的传输损伤，共同提升系统在恶劣信道条件下的容噪能力与恢复精度。

4.3 数字信号处理技术的噪声抑制机制

数字信号处理技术的噪声抑制机制主要通过算法级联与协同处理实现。该机制针对不同噪声特性采取相应抑制策略：对于线性损伤，自适应均衡算法通过频域或时域滤波补偿信道频率响应，有效抑制码间干扰；针对相位噪声，载波恢复算法通过相位估计与旋转操作消除相位漂移，提高星座图稳定性。前向纠错编码则通过解码过程中的迭代计算，利用冗余信息检测并纠正传输错误，直接提升系统误码性能。非线性补偿算法通过数字域构建反向传输函数，部分抵消克尔非线性引起的信号失真。这些算法构成级联处理链路，通过时域、频域与概率域的多维信号处理，逐级消除各类损伤，最终实现噪声背景下信号波形的有效恢复与判决可靠性的显著提升，从而扩展系统操作裕量并增强整体抗干扰能力。

5 概率整形与数字信号处理的联合抗噪机制

5.1 联合优化方案设计框架

概率整形与数字信号处理的联合优化方案设计框架，采用分层协同与闭环反馈的系统架构。该框架在发射端通过概率整形映射器生成非均匀分布的星座符号，其整形参数根据信道状态预估进行动态配置。经过整形的信号随后进入数字信号预处理模块，完成针对预期非线性损伤的预均衡与预失真操作。在接收端，设计包含多级级联的数字信号处理链路，首先通过盲均衡与相位恢复算法补偿线性损伤，进而采用基于机器学习或数字反向传播的非线性补偿器处理高阶失真。核心机制在于构建从接收端到发射端的反馈通路，将接收信号的信噪比、非线性噪声残留等特征参数回传至发射机，据此自适应地调整概率整形的分布匹配函数与数字信号处理的均衡器系数。该闭环设计实现了发射信号特性与接收处理算法的联合迭代优化，形成针对时变信道特性的自适应抗噪系统。

5.2 技术协同与性能增强原理

概率整形与数字信号处理的技术协同通过功能互补实现系统性能的协同增强。概率整形技术通过优化发射信号的概率分布，降低高功率符号的出现频率，从而从源头上减弱非线性效应的激发强度。数字信号处理则在接收端对经信道劣化的信号进行精确补偿，有效纠正线性与非线性损伤。二者协同的核心原理在于：概率整形构建了更利于数字信号处理算法操作的接收信号特性，降低了后续均衡与相位恢复的复杂度；同时，数字信号处理对残余失真的补偿能力，又为概率整形采用更积极的分布优化策略提供了容错空间。这种前后级联的协同机制产生了显著的性能增益，不仅改善了系统的信噪比容限，还通过降低非线性损伤提升了最大传输距离，实现了单一技术难以达到的整体抗噪性能 [5]。

5.3 联合方案的实现流程

概率整形与数字信号处理联合方案的实现流程遵循明确的级联处理顺序。在发射端，输入比特流首先通过分布匹配器完成概率整形映射，生成具有非均匀分布特性的幅值序列。该序列经过前向纠错编码后，与相位信息结合构成完整的调制符号。随后，数字预均衡模块对信号进行预失真处理，以补偿预期的信道损伤。在接收端，光电转换后的电信号依次经过自适应均衡、时钟恢复和偏振解复用等线性补偿阶段。载波相位恢复算法随后校正频偏与相位噪声。经过初步恢复的信号被送入非线性补偿模块进行进一步处理。最终，软解映射器利用接收信号的统计特性，结合先验概率信息生成软判决比特，供后续纠错解码使用。整个流程通过反馈信道将接收端评估的信道状态信息回传至发射机，实现概率整形参数与数字信号处理算法的联合自适应调整，形成闭环优化系统。

6 结语

综上所述，本研究通过系统分析高速光纤通信中的噪声特性，建立了概率整形与数字信号处理的联合抗噪体系。研究表明，概率整形通过优化发射信号分布有效抑制非线性损伤，数字信号处理通过算法级联补偿传输损伤，二者协同工作可显著提升系统抗噪性能。联合方案采用闭环优化架构，实现了信号特性与处理算法的自适应匹配，在系统容量、传输距离和误码性能方面均取得明显改善。该研究为突破高速光纤通信噪声限制提供了有效解决方案，未来可在动态优化机制与硬件实现方面进一步深入研究。

参考文献

[1] 章程.高速光纤通信相干检测系统中线性损伤补偿算法的研究[J].光通信技术,2023,47(2):45-52.

[2] 邵雪静.高速相干光通信系统中信道均衡补偿的研究[J].光电子技术,2024,44(1):28-35.

[3] 魏宝国.高速光纤通信系统中的OFDM调制解调技术的仿真与实现[J].通信学报,2023,44(3):112-119.

[4] 徐霞.高速光纤通信相干检测系统色散抑制的研究[J].光学精密工程,2022,30(5):78-85.

[5] 李国光.某气象雷达信号处理平台设计与实现[J].现代雷达,2024,46(2):63-69.