

Innovative Application of Optical Signal modulation and Demodulation Technology in Optical fiber Communication systems

Jiaqiang Wang

Shanghai Jianli Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200070, China

Abstract

As an important component of information infrastructure, the technical system of optical fiber communication systems has been continuously evolving over the past two decades along with the expansion of network scale and changes in business forms. Optical signal modulation and demodulation technology directly determines the transmission efficiency, stability and engineering adaptability of optical fiber links, and is a key technical link supporting the continuous upgrading of backbone networks, metropolitan area networks and access networks. Based on the practical experience of optical fiber communication engineering construction in China, in terms of system architecture, equipment selection and operation and maintenance, more practical application requirements for modulation and demodulation technology have been put forward. This article discusses the basic composition of optical fiber communication systems and the principles of optical signal modulation and demodulation. On this basis, it focuses on analyzing several innovative application practices of modulation and demodulation technologies in China's optical fiber communication systems.

Keywords

Fiber optic communication system; Optical signal; Modulation; Demodulation; Technology; Innovative applications

光纤通信系统中光信号调制解调技术的创新应用

王家强

上海建灏建设集团有限公司，中国 · 上海 200070

摘 要

光纤通信系统作为信息基础设施的重要组成部分，其技术体系在近二十年中伴随网络规模扩展和业务形态变化不断演进。光信号调制与解调技术直接决定了光纤链路的传输效率、稳定性与工程适配能力，是支撑骨干网、城域网及接入网持续升级的关键技术环节。结合中国光纤通信工程建设实践，在系统架构、设备选型及运行维护等方面，对调制解调技术提出了更贴合实际工况的应用需求。本文围绕光纤通信系统的基本构成与光信号调制解调原理展开论述，在此基础上重点分析中国光纤通信系统中调制与解调技术的若干创新应用做法。

关键词

光纤通信系统；光信号；调制；解调；技术；创新应用

1 引言

光信号调制与解调技术在高速光纤通信系统中的应用，不仅关系到数据传输速率的提升，还涉及通信系统的稳定性和可靠性^[1]。有鉴于此，文章通过查阅相关文献资料以及结合自身实践情况下就光纤通信系统中光信号调制解调技术的创新应用展开探讨。通过对具体技术应用要点的系统梳理，总结其工程实现路径，并对相关技术发展进行归纳性概括。

2 光纤通信系统概述

光纤通信系统是一种以光为载体并利用光波在光导纤维

维中传输信息的通信技术体系，其基本含义是将电信号通过光发射机中的光源（如半导体激光器）和调制器进行调制，使电信号编码至光载波上，然后通过高纯度玻璃光纤作为传输介质沿着纤芯全内反射传播，最后在光接收机处由光电检测器将微弱的光信号转换回电信号并经过放大、解调等处理恢复成原始信息，在传输过程中可能采用中继器或光纤放大器补偿损耗与波形失真。此类系统在通信骨干网、城域网及接入网中大规模部署，是支撑互联网、移动通信及行业专网的关键基础设施，具备带宽大、衰减低、抗电磁干扰强等工程特点。系统结构包括光发射端、传输链路和接收端三部分，常见调制方式有强度调制直接检测（IM/DD）和更高阶的相位或幅度调制以提升频谱效率；在高性能应用中还结合波分复用（WDM）等复用技术提高单纤传输容量。在国家“网

【作者简介】王家强（1982-），男，中国安徽合肥人，本科，中级职称，从事电子信息工程研究。

络强国”战略下推动光纤宽带及城际干线光通信技术持续演进，向更高比特率、更长传输距离及更高集成度方向发展。

3 光纤通信系统中光信号调制解调技术的创新应用

3.1 基于多级强度映射的光信号调制应用

基于多级强度映射的光信号调制在城域光纤通信系统中的工程应用，主要围绕发射端光强精细控制、链路适配设计、接收判决匹配及长期运行稳定性展开。在发射端，采用强度调制与直接检测体系，通过对激光器输出功率进行多档位分级，将多比特电信号映射为若干离散光强等级，调制器驱动电路需结合激光器阈值特性与线性区间，对偏置电流和调制电压进行联合标定，确保各级光强在实际输出中具备可重复性与区分度。针对城域光纤链路衰减不均与节点跨度差异的特点，在多级强度设计阶段需引入链路预算参数，对光强级间隔进行定量分配，使接收端在典型衰减条件下仍可保持充分判决裕量。系统运行中，通过在发射模块内部布置光功率监测单元，实时采集输出光强变化，并联动驱动电路完成动态修正，以抑制温度漂移和器件老化对映射关系的影响。接收端采用多门限判决结构，根据光电转换后的电压分布设置自适应判决区间，使不同光强等级在噪声干扰下仍能被准确区分，并配合误码监测结果对门限位置进行周期性校正。在工程实施中，还需针对调制器非线性引入预校准机制，通过实验测试获得电光响应曲线，并在驱动端实施补偿控制，以保证多级强度映射在长期运行中的一致性与稳定性。

3.2 面向长距离传输的相位稳定调制技术应用

面向骨干光纤通信系统跨区域、跨省级长距离传输场景，相位稳定调制技术在工程实践中逐步形成可复制的应用路径，其核心在于通过相位域承载信息以削弱光功率波动对系统性能的约束。在发送端实现中，工程上普遍采用窄线宽外腔激光器配合相位调制器构成稳定光源模块，通过对激光器驱动电流与腔长进行协同控制，降低固有相位噪声对调制精度的影响，并在调制链路中引入偏置点闭环校准单元，确保相位调制深度在长期运行条件下保持一致。在长距离光纤链路中，环境温度变化与机械应力会引发相位随机漂移，因此在系统设计阶段同步配置光纤链路温度感知与相位补偿机制，利用前向参考信号与回传相位信息构建跟踪回路，对慢变相位偏移进行实时修正，从而减轻外界扰动对调制状态的累积影响。在接收端解调环节，工程应用中通常结合相干检测结构与数字相位恢复算法，通过对载波相位进行连续估计与锁定，提高长距离传输条件下的相位判决可靠性，并避免因相位跳变导致误码突增^[2]。在设备选型与系统集成过程中，运营级工程往往依据实际光纤段衰减特性和色散分布，对相位调制格式与符号速率进行针对性匹配，同时在开通调试阶段依托链路测试数据对相位噪声容限、跟踪带宽及补偿参数进行多轮校正，使调制方式能够适应不同线路区段的传

输条件并保持稳定运行。

3.3 适配接入网场景的简化调制技术应用

在光纤接入网建设实践中，面向大规模用户密集接入与设备快速部署需求，简化型光信号调制技术逐步形成以工程可实施性为导向的应用体系，其核心在于对传统调制结构进行功能收敛与参数压缩，通过降低调制自由度来减少发送端电路规模与调试复杂度。在具体工程实现中，发送端通常采用幅度或相位变化规则明确、调制阶数受控的调制方式，并结合接入网链路长度短、光功率预算有限的特点，对调制深度进行工程化约束，使光源输出在保证误码性能稳定的前提下避免过度非线性工作，从而提高器件一致性与批量生产适应性。针对接入网中用户分布差异明显的问题，调制速率配置以端口级为单位进行分层设计，在主干分光节点保持统一速率设定，在用户侧接入端依据业务承载需求进行适度下调，以降低光模块功耗并延长设备运行周期。在现场运维层面，简化调制技术通过减少参数联动关系，使调制状态调整可在不改变硬件结构的条件下完成，技术人员可依据光功率监测与误码反馈对调制幅度进行微调，从而实现快速恢复链路稳定性。结合接入网业务负载随时间波动的运行特征，系统在运行过程中可依据用户在线状态与业务类型变化，对调制配置进行周期性修正，使光信号传输状态始终维持在可控区间内，并避免频繁切换带来的系统扰动。在多地工程应用中，该类简化调制方案已形成与接入网建设节奏相匹配的技术路径，其设计思路充分体现了在复杂网络环境下对可靠性、可维护性与工程适应性的综合权衡。

3.4 基于自适应判决的光信号解调应用

光纤通信系统中，基于自适应判决的光信号解调应用主要围绕相干接收结构中的判决策略动态调整展开。实际项目中，在光电探测与模数转换完成后，接收端首先依据采样信号的幅度分布与相位离散特性进行初始统计分析，通过计算星座点能量集中度与相位偏移均值确定当前信号的噪声水平，并据此在判决模块中引入可调判决阈值，而非固定门限方式^[3]。该方法在中长距离传输场景中可有效适配光纤损耗与放大噪声变化。随后，在符号判决过程中，自适应判决逻辑结合前级载波相位恢复结果，对I、Q两路信号分别建立动态判决区间，当检测到相位抖动或幅度漂移时，判决区间随之线性修正，以保证判决边界始终与实际星座分布保持一致。在偏振相关失真存在的情况下，自适应判决通常与判决反馈均衡结构协同工作，通过利用已判决符号对残余码间串扰进行反向补偿，使判决输入信号的聚类特性得到改善。该过程中，判决结果并非直接输出，而是作为均衡参数更新的重要参考量，实现解调与均衡的闭环协同。此外，在多种调制格式并存的系统中，自适应判决模块可根据符号统计特征自动调整判决映射关系，使解调过程在调制格式切换时保持连续性。上述做法在高速干线与城域网光纤通信系统中已形成较为成熟的技术应用路径。

3.5 面向多信道系统的并行解调技术应用

骨干光纤通信系统的多信道传输架构中,面向多波长并行承载特征的光信号解调环节,在实践中逐步形成了以并行解调为核心的接收处理模式,其技术实现并非简单复制单通道解调结构,而是围绕多信道并行接入、同步处理与稳定判决进行系统化重构。在接收端结构设计中,通常依据光层信道规划方案,将不同波长信号在光电转换后分别映射至独立解调单元,各解调通道在模拟前端即完成带宽匹配与通带约束,通过定制化电滤波参数抑制相邻信道泄漏引起的串扰分量,避免进入数字域后形成不可逆的判决偏差。在多通道并行运行条件下,普遍引入统一时钟参考与分布式相位对齐机制,对各解调链路的采样时刻进行精细标定,使符号边界保持一致,从而降低由路径延迟差异引发的相位旋转与幅度漂移问题。针对基于正交频分复用(OFDM)等多载波调制方案的并行解调技术,实际应用中将WDM与相干光OFDM集成,并在解调端通过FFT并行子载波分离处理,每个子载波对应一个并行解调通路,通过循环前缀去除、频域均衡与相位补偿的协同处理,实现多载波信号的并行解调与误码率控制,此外为抑制光纤非线性与通道间干扰,采用频域数字均衡与交织解调策略在各并行通路间共享信道估计信息,有效降低了跨通道干扰的影响并提高了系统整体吞吐率^[4]。在大规模并行解调应用中,为降低通道间非线性影响与提升信噪比,可在并行DSP架构中引入以RNN等机器学习模型为基础的多通道均衡模块,通过并行处理单元同时对相邻WDM通道的信号进行联合均衡和误差反馈更新,该方法在实验验证中表明相较于单通道补偿策略可显著提升多通道系统的误码性能并降低整体计算复杂度,从而在并行解调结构中实现更高效的多信道性能优化。

3.6 适用于现场维护的解调参数可视化应用

在光纤通信系统现场运行与维护实践中,围绕光信号解调过程构建面向维护人员的参数可视化应用,是近年来解调技术工程化落地的重要创新方向。该类应用以接收端光电转换及后续解调链路为基础,在不改变原有光传输结构的前提下,对解调过程中形成的关键物理与统计参数进行现场可视化处理。具体做法上,首先在光接收模块输出端同步提取

幅度、电噪声、电信号抖动及误码统计等基础解调参数,通过本地高速采样单元进行实时汇聚,并在维护终端中以时间序列曲线和稳定区间标识方式直观呈现,使维护人员能够直接观察信号稳定性变化。随后,在解调处理单元内部对判决门限、采样相位偏移及信号失真度等参数进行并行计算,并通过图形界面以叠加标记形式映射至解调波形显示界面,实现解调状态与参数变化的同步展示,避免传统文本参数解读带来的理解偏差。在此基础上,引入多参数关联显示机制,将误码率变化与接收光功率、噪声幅度等参数进行同屏联动展示,当某一参数出现异常波动时,其关联参数同步高亮,便于现场快速判断异常来源。针对复杂现场环境,还可通过分段记录解调参数变化轨迹,在可视化界面中形成可回溯的运行曲线,用于对瞬态干扰或间歇性衰减问题进行分析^[5]。同时,结合现场常见故障特征,在可视化系统中预设解调参数阈值区间,当参数超出合理范围时,通过图形颜色变化或区段标注方式进行提示,而非直接给出结论性判断,从而保持维护决策的技术可控性。

4 结语

综上所述,光信号调制解调技术作为光纤通信系统性能发挥的重要基础,其应用效果直接影响整个光纤通信系统的运行质量。对此,上文基于研究与实践出发,首先就光纤通信系统内涵展开论述,随后重点围绕其光信号调制与解调技术的创新应用提出一些看法,期望能够为推动中国光纤通信高质量发展提供助力。

参考文献

- [1] 刘翠,薛鹏.高速光纤通信系统中的信号调制与解调技术[J].电声技术, 2023(11).
- [2] 苏忠翰.光通信系统新型收发架构高性能调制解调技术研究[D].北京邮电大学,2023.
- [3] 林建辉、王炳轩、孙杰.船岸连接系统光通信数据调制解调设计与实现[J].船舶工程, 2020(S01):4.
- [4] 胡少华.高速光纤通信系统不同信号损伤下的性能增强技术研究[D].电子科技大学,2022.
- [5] 李辉.光纤通信中光信号传输性能优化研究[J].工程管理与技术探讨, 2024, 6(8):184-186.