

高速光纤通信线路中的色散补偿技术研究

闫 俊

日海恒联通信技术有限公司 河南 郑州 450016

摘 要：随着光通信系统向高速、大容量、长距离方向发展，色散对传输性能的限制日益突出，本文针对高速光纤通信线路中的色散问题，分析了材料色散、波导色散、模间色散与偏振模色散的形成机理及其对系统性能的影响，比较了光域、电域与混合色散补偿技术的原理、结构及应用适配性，探讨了DCF、FBG、DSP均衡器和PMD补偿器等核心技术的补偿机制，结果表明，针对不同传输场景采用差异化补偿策略，有助于显著提升系统的抗扰能力与传输稳定性，为构建高可靠、高速率光网络提供了技术支撑。

关键词：色散补偿；光域技术；电域均衡；偏振模色散

引言

高速光纤通信是现代信息基础设施的核心组成部分，但在传输速率不断提高的背景下，色散问题逐渐成为影响系统性能的关键限制因素^[1]。群速度色散与偏振模色散在高速传输中会引起信号展宽、码间干扰甚至误码率急剧上升，严重影响通信质量。因此，开展对高速光纤通信线路中色散补偿技术的系统研究，明确各类补偿机制的性能特征与适用条件，对于优化传输链路、延伸通信距离、提高系统可靠性具有重要的理论意义与现实价值。

1 光纤通信中的色散理论基础

1.1 色散的类型

色散是指不同频率或波长的光信号在光纤中传播速度不一致，导致脉冲展宽的现象，按其成因和表现形式，光纤通信中的色散可分为四类：材料色散、波导色散、模间色散和偏振模色散（PMD）^[2]。材料色散是由于光纤介质本身折射率随波长变化而引起，特别在1550nm波段较为显著；波导色散源于光在光纤芯与包层之间的能量分布随波长的不同而变化，即波导结构本身影响光速差异；模间色散主要存在于多模光纤中，由于各个模式的传播路径不同，导致同一信号的不同模式到达时间不同；PMD是由光纤结构非对称性引起的双折射效应，两个正交偏振模式之间产生微小时延差异，进而造成脉冲畸变。

1.2 光脉冲在光纤中的传输机制

在光纤中传输的光信号通常以短脉冲形式编码承载信息，然而由于色散效应的存在，不同频率的光分量具有不同的群速度，从而导致群速度色散。群速度色散的

本质是群折射率对波长的导数，其直接后果是脉冲在传输过程中不断展宽，产生码间干扰，导致相邻符号间的重叠，使得接收端无法准确区分各个脉冲位置，严重降低信号判决正确率，尤其在40Gbps以上的高速系统中，传输距离稍长即可能使脉冲彼此覆盖，导致眼图关闭。

1.3 色散对通信系统性能的影响

当光脉冲在传输过程中发生展宽，其波形将变得模糊甚至重叠，造成接收端难以精确判别码元，最终表现为误码率（BER）的显著上升。色散会导致眼图闭合，削弱判决门限的稳定性，增加信号恢复的复杂度。色散与非线性效应相互耦合，在高速、大功率或长距离传输中显得尤为突出。自相位调制（SPM）是由信号本身引起的相位变化，交叉相位调制（XPM）源于信道间相互干扰，四波混频（FWM）是多个频率信号间能量交换的结果，非线性效应与色散相互增强，造成频谱展宽、噪声积累甚至信号干扰的不可预测性。

2 色散补偿的性能指标及方式

2.1 色散补偿的性能指标

色散补偿是为了对光纤中累积的群速度色散和偏振模色散进行有效抑制，从而保持信号脉冲的时域完整性，降低码间干扰（ISI），提高系统的误码性能（BER），并延长高速传输的有效距离。具体指标主要包括色散补偿精度、补偿带宽、信号失真度、系统代价和稳定性等。其中，色散残余容限作为性能衡量的重要参数，用于描述在某一波长范围内允许的最大未补偿色散。为满足40Gb/s及以上高速系统的要求，残余色散一般应控制在 $\pm 200\text{ps/nm}$ 范围内。系统的色散斜率匹配能力为关键考量，特别是在多波长（如DWDM）环境下，需保证补偿器对不同信道具有一致补偿效果。

2.2 补偿方式分类

作者简介：闫俊（1984.06-），男，汉族，籍贯：河南省封丘县，本科，工程师，研究方向：通信工程

色散补偿技术主要分为光域补偿、电域补偿和混合补偿三大类。光域补偿以色散补偿光纤（DCF）、啁啾光纤光栅（FBG）和GT标准具为主，依靠物理结构对不同波长信号传播路径的调控实现色散平衡，适用于传输链路中的前置或后置补偿。电域补偿主要依托数字信号处理（DSP）技术，通过接收端的电子均衡器如前向均衡（FFE）、判决反馈均衡（DFE）等，实现信号波形的恢复与失真抑制，尤其适合动态变化的色散环境。混合补偿结合了光域与电域优势，在传输段使用光域器件进行粗补偿，在接收端通过DSP进行精细调整，适合于需要长距离、宽带宽、高码率传输的现代光网络架构中。

2.3 补偿方式比较分析

不同色散补偿方式在补偿能力、系统损耗、实现复杂度、经济成本和适应性等方面各有优劣^[3]。以40Gb/s系统为例，DCF可实现约-85ps/nm/km的负色散补偿，适合大跨度传输，但其插入损耗高（约0.5~1dB/km），且非线性效应明显，系统代价大；FBG具有低损耗（< 0.5dB）、低延迟、小尺寸等优势，但带宽较窄、温度稳定性差，适用于短段精准补偿；电域DSP方案在灵活性和实时性方面表现出色，特别适用于色散动态变化或PMD严重的环境，但对ADC采样率和算法算力要求高，导致功耗大、器件成本高。表1为三种方案的性能对比情况。

表1 不同色散补偿方式的性能对比

补偿方案	补偿能力	插入损耗	实现复杂度	成本	动态适应性
DCF	高	高	中	高	差
FBG	中	低	中	中	差
DSP	中-高	无	高	高	强

3 光域色散补偿技术

3.1 DCF技术

色散补偿光纤（Dispersion Compensating Fiber, DCF）主要用于抵消单模光纤（SMF）中正色散的特种光纤，其色散系数为负值，在1550nm波长附近一般可达-85ps/nm/km，显著高于常规G.652光纤的正色散值（约+17ps/nm/km）。DCF的基本补偿原理是通过串联一段具有与SMF相反色散系数的光纤，使两段光纤的总色散趋于零。

DCF的部署形式主要有三种：前置补偿、后置补偿和对称补偿。前置补偿将DCF置于发送端，可在光信号进入传输光纤前进行预修正；后置补偿在接收端实施，适用于消除已累积的色散；对称补偿将DCF均匀部署于光纤链路两端，有利于抑制非线性效应，提高系统稳定性。

从结构角度分析，DCF分为单模和多模两种类型。单模DCF具有较低的模式耦合干扰，适用于高精度色散控制，但存在较高的插入损耗和非线性限制；多模DCF可实现更大的负色散量，适用于宽带宽补偿场景，但容易引发模间干扰和偏振相关损耗。

3.2 啁啾光纤光栅（FBG）

啁啾光纤光栅（Chirped Fiber Bragg Grating, C-FBG）是通过改变光纤折射率周期性结构的栅距，实现对不同波长信号产生不同反射延时的色散补偿器件，其基本原理基于光纤光敏性，通过紫外激光照射，在光纤纤芯中形成具有变化周期的折射率分布。周期变化使得不同波长的光在不同位置反射，实现波长选择性延迟，从而抵消由于色散造成的信号脉冲展宽。写入方法

主要包括全息干涉法和相位掩模法，其中相位掩模法因其重复性好、工艺稳定性高而被广泛应用于批量制造^[4]。

C-FBG的反射带宽通常在几个nm至十几nm之间，反射率可达90%以上；调啁结构使其群时延特性随波长单调变化，从而提供连续的负色散补偿能力，适合补偿窄带或特定信道的色散，在波分复用（WDM）系统中表现出良好的信道选择性。

系统集成方面，FBG通过熔融拉锥或V型槽对准工艺与普通光纤实现低损耗连接，其典型插入损耗低于0.5 dB，便于嵌入现有链路中。FBG可封装于温控模块中，以减缓其对温度变化的敏感性。由于其结构紧凑、体积小和无源特性，适用于空间受限或功耗要求严格的场合。

4 电域色散补偿技术

4.1 均衡器补偿原理

电域色散补偿通过均衡器结构对接收信号进行数字滤波，校正因色散引起的波形畸变，恢复原始码元信息。前向均衡器（Feed-Forward Equalizer, FFE）为线性滤波器结构，其通过对输入信号进行多抽头延迟处理，以当前及过去若干个采样点的加权和作为输出，从而补偿色散造成的码间干扰（ISI）。判决反馈均衡器（Decision Feedback Equalizer, DFE）在FFE基础上增加了反馈路径，利用已判决的历史符号信息对当前输出进行校正，适用于严重ISI条件下的高速系统。系统在均衡器作用下可显著改善眼图开度、降低误码率（BER），但DFE可能出现判决错误传播的问题，对噪声敏感，需在结构与算法配合上加以控制。

4.2 电域补偿在接收端的集成应用

随着高速光通信系统对灵敏度与容错性的要求不断提升,电域补偿技术在接收端的集成应用日益成为主流。光接收模块通常集成数字信号处理(DSP)芯片,执行色度色散与偏振模色散(PMD)的联合补偿。DSP首先对采样信号进行傅里叶变换,评估其频域失真特性,再通过调节均衡器权重矩阵,实现时域脉冲整形与偏振状态的优化恢复。该方式的优势在于能够实时响应链路状态变化,具备较强的适应性和补偿精度。

5 偏振模色散(PMD)补偿技术

5.1 PMD形成机理

偏振模色散(Polarization Mode Dispersion, PMD)源于光纤内部微结构非对称性所引起的双折射效应。由于实际光纤无法达到完美圆对称,传播过程中存在两个正交的主偏振态(Principal States of Polarization, PSP),它们具有不同的群速度,造成信号脉冲在时域上产生差分群时延(Differential Group Delay, DGD)。PMD主要表现为DGD引起的脉冲展宽和偏振态随时间、频率和环境变化而演化的不稳定性^[5]。

5.2 PMD补偿器分类

PMD补偿器按照结构和调控方式的不同主要可分为三类:旋转型、偏振控制器型和PLC型(基于Mach-Zehnder干涉结构)。旋转型补偿器通过机械旋转波片、偏振片等光学器件调节光波的偏振态,以人为方式抵消累积的DGD,结构简单但响应速度慢,难以适应动态变化的传输环境;偏振控制器型补偿器结合了液晶或压电材料,通过快速调整偏振状态方向并引入延迟单元实现动态补偿,已广泛应用于40Gb/s及以上系统中,具备一定自适应能力;PLC型(Planar Lightwave Circuit)补偿器依托集成光学技术,将偏振分束器、马赫-曾德尔干涉器(MZI)和热光调制器集成于一片光芯片上,具有高稳定性、紧凑结构和高速响应等优势。

5.3 PMD补偿技术的系统实现

PMD补偿技术的系统实现依赖于高速动态反馈机制与精确的偏振状态调控策略,尤其在传输速率达到40Gb/

s及以上时,PMD对系统的影响呈现非线性增强特性,需具备毫秒级甚至微秒级的响应速度。系统通过集成偏振控制器与可调延迟模块,结合误码率(BER)反馈或眼图开度评估算法,构建实时动态闭环补偿系统。系统通过实时采集接收信号的性能指标,判断当前PMD状态,继而调节补偿器内部参数,实现对DGD及偏振态漂移的抑制。为提升稳定性与鲁棒性,部分系统采用基于机器学习的状态预测模型,预估偏振变化趋势,从而提前调整补偿参数。

6 结语

综上,本文围绕高速光纤通信中的色散补偿问题,从色散的分类与机理入手,全面分析了其对系统性能的影响机制,涵盖脉冲展宽、误码率上升及非线性效应叠加等核心问题。在此基础上,系统论述了光域、电域及混合补偿技术的原理结构与适用场景,重点阐释了DCF、FBG、均衡器和PMD补偿器等典型技术的实际应用优势与实现路径。研究表明,面向不同通信需求构建多层次、可调节的色散补偿体系,是实现超高速、超长距离传输的关键保障。未来,结合集成光学、智能控制与高速数字信号处理技术,构建低功耗、高精度的动态补偿系统,将成为推动光通信系统进一步发展的重要方向。

参考文献

- [1]邵婉婷.光纤通信系统中色散补偿光子晶体光纤的研究[D].江苏:南京邮电大学,2023.
- [2]申静,刘亚男.基于光纤通信系统色散补偿技术的研究[J].长江信息通信,2022,35(12):163-166.
- [3]刘亚男.基于波分复用系统的多种色散补偿技术的研究[D].辽宁:沈阳工业大学,2023.
- [4]赵淑君,刘伟.改进k-means的多域光纤通信非线性失真补偿方法[J].激光杂志,2024,45(5):182-186.
- [5]李日森,李萍,王裕如,等.光纤系统中编码方式对系统性能影响以及色散补偿[J].大连工业大学学报,2021,40(1):51-56.