

电力通信领域 100 Gbit/s OTN 超长站距传输及抗 SOP 策略分析

Analysis of 100 Gbit/s OTN Ultra-Long-Distance Transmission and Anti-SOP Strategies in Power Communication Field

金娟¹,袁方¹,韩伟²(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610000;2. 雅砻江流域水电开发有限公司,四川 成都 610000)

Jin Juan¹,Yuan Fang¹,Han Wei²(1. Southwest Electric Power Design Institute Co.,Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610000,China;2. Ya Long River Hydropower Development Co.,Ltd.,Chengdu 610000,China)

摘要:

由于电网的特殊性,100G OTN 系统在电力系统的应用中面临超长站距传输和雷击导致的信号丢失告警等问题。在分析 100G OTN 关键技术的基础上,首先针对超长站距传输,出色散和非线性补偿算法优化、二阶拉曼、级联泵浦遥泵放大技术等措施,旨在有效延长单跨段传输距离;其次分析了雷击 OPGW 光缆导致 SOP 波动问题,并提出了改进光缆结构、采用非 PDM 编码方式、设计快速跟踪 PDM 的 DSP 算法以及预留充足 OSNR 余量等策略。

关键词:

100G OTN 系统;超长站距传输;拉曼;遥泵;偏振态

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.08.014

文章编号:1007-3043(2026)08-0079-07

中图分类号:TN913

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Due to the unique characteristics of the power grid, the applications of 100G OTN system in power system face issues such as ultra-long distance transmission and signal loss alarms caused by lightning strikes. Based on an analysis of the key technologies of the 100G OTN system, the measures such as dispersion and nonlinear compensation algorithm optimization, second-order Raman amplification, and cascaded pumped remote pump amplification technologies are proposed for ultra-long distance transmission, aiming to effectively extend the single-span transmission distance. Secondly, the issue of SOP fluctuations in OPGW optical cables caused by lightning strikes is analyzed, and strategies such as improving the cable structure, adopting non-PDM encoding methods, designing DSP algorithms for rapid PDM tracking, and reserving sufficient OSNR margin are proposed.

Keywords:

100G OTN system; Ultra-long span transmission; Raman; Remote pumping; State of polarization

引用格式:金娟,袁方,韩伟. 电力通信领域 100 Gbit/s OTN 超长站距传输及抗 SOP 策略分析[J]. 邮电设计技术,2026(8):79-85.

0 引言

自 2017 年起,公网运营商已超大规模部署 100G OTN 系统,电力系统相对滞后,目前只有国网和南网主干网、个别省公司的省干网开展了建设。电力光缆随电网建设,具有特殊性,其应用场景与公网运营商

差异显著,100G OTN 系统在电力系统中的应用面临特殊的技术问题。

首先,电力光缆随电力一次线路架设,线路较长,尤其是跨地区线路,如直流线路、四川川西、西藏等地,光缆长度常超过 200 km,甚至达 300 km 以上,且环境恶劣,100G OTN 系统在电力系统中需解决超长站距传输的问题。

其次,电力通信主要采用随电力线路建设的

收稿日期:2026-07-08

OPGW 光缆,OPGW 为架空光缆,在雷雨季节易遭雷击,导致 100G OTN 系统链路出现间断性信号丢失告警。

本文主要研究 100G OTN 的关键技术以及在以上 2 个应用场景的解决方案,旨在为 100G OTN 的逐步应用提供坚实的理论和技术支撑。

1 100G OTN 光传输网的关键技术

在 100G OTN 光传输网的发展进程中,技术挑战日益凸显,主要体现在光信噪比(OSNR)要求、色散容限、PMD 容限以及光纤非线性效应等方面。

首先,随着波特率的提升,光接收机的电带宽需线性增加,但光放大器在放大光信号的同时产生的 ASE 噪声也随之增多,从而造成误码率增加,对 OSNR 的要求提升。通常情况下,光信号符号速率提升至原来的 4 倍时,所需的 OSNR 的分贝值会相应增加 6 dB,当传输系统采用 100G 的码型且其线路速率达到 112 Gbit/s 时,对 OSNR 的要求将提升至 16.7 dB,表明其信噪比阈值明显增大。

其次,波特率的提升导致光谱宽度增加,光谱宽度增加后色散容限显著降低。40G NRZ-OOK 信号色散容限为 60 ps/nm,如此小的色散已需要高精度可调色散模块。而对于 100G NRZ-OOK 信号,可调色散模块也因调节精度的问题而不能满足要求,需采用更先进的补偿技术才能使 100G 传输成为可能。

再次,提升波特率会导致偏振模色散(PMD)容限下降。具体而言,42.8 Gbit/s 的非归零关键控(NRZ-OOK)信号具有约 2.3 ps 的 PMD 容限,而 112 Gbit/s 的 NRZ-OOK 信号的光 PMD 容限则降低至不足 1 ps,已难以满足工程实际需求。因此,在 100G 传输系统中,PMD 问题变得尤为突出,传统的强度调制直接检测(IM-DD)技术已无法满足要求,亟需新的解决方案。

最后,传输光纤中的 Kerr 非线性效应来自于光脉冲对光纤的折射率的改变,Kerr 效应会对光脉冲产生时域相位扰动,这些相位扰动会经由光纤的色散效应转化为光脉冲的波形畸变,从而损害系统性能。此效应的强弱受光功率、光谱宽度、调制码型、光纤色散及跨段数目等因素影响。一般而言,光信号的调制速率越高,对光纤非线性效应的忍耐程度越低,采用相位调制、RZ 码型等特殊的码型调制技术,可增强对该效应抵抗能力。

为克服上述的物理限制因素的挑战,满足 100G 的

传送需求,目前业界的应对策略如下。

a) 降低光谱宽度,提高单位光谱带宽上的比特速率。

b) 采用对 OSNR 要求更低、抗传输损伤能力强的调制码型。

c) 采用数字信号处理技术,克服光纤色散效应和 PMD 效应的影响。

1.1 100G 系统调制技术(PDM-QPSK)

光谱带宽与波特率紧密相连,波特率提升会导致光谱展宽,但需受限于 WDM 信道间隔,以避免信道间干扰。在 100 Gbaud/s 波特率下,普通调制方式难以满足 50 GHz 间隔要求,而 QPSK 与偏振复用技术则提供了解决方案。PDM-QPSK 通过四级相位调制与偏振复用,将 112 Gbit/s 速率下的波特率降至 28 Gbaud/s,降低了对光电器件带宽的要求,使目前成熟光电器件工艺可用于制作 100G 系统所需光电器件,100G 系统能得到广泛应用,同时提升了光谱效率和 OSNR、色散容限、PMD 容限、非线性效应抵抗等系统性能^[1-5]。PDM-QPSK 调制方式如图 1 所示。

然而,偏振复用也面临偏振耦合与 PMD 效应的挑战,需通过相干接收和数字信号处理来克服,以确保信号的准确分离与传输质量。

1.2 相干接收技术

PDM-QPSK 调制技术主要解决了 OSNR 问题,但仍面临色散和 PMD 容限过小的问题。从原理上讲,色散效应是在频域光电场的相位上引入了高阶调制,PMD 效应是在时域光电场的 2 个正交偏振方向上引入了不同时延,在传统检测的光接收模式下,会导致接收眼图畸变和码间干扰。传统补偿方法如 DCM 和 TDCM 虽能控制残余色散,却限制了网络灵活性。PMD 补偿则依赖码型自身的容忍度和 OSNR 余量来实现。光学 DSP 处理通过探测光信号电场,进而采用线性补偿抵消色散和 PMD 效应,其技术关键在于测量 PDM-QPSK 电场和在电场上实现补偿。电场测量可通过“相干接收”来解决,补偿实现可通过 DSP 技术来完成^[6-9]。

相干接收是实现光场实部和虚部探测的有效方法。内差相干接收机将光信号分解为 X、Y 偏振,与本地振荡光在 90° 光学混频器中相干,再经 PIN 管探测,可分别得到 X 轴、Y 轴的电场。

1.3 收端数字信号处理 DSP 技术

DSP 均衡技术是通过与色度色散及 PMD 效应相

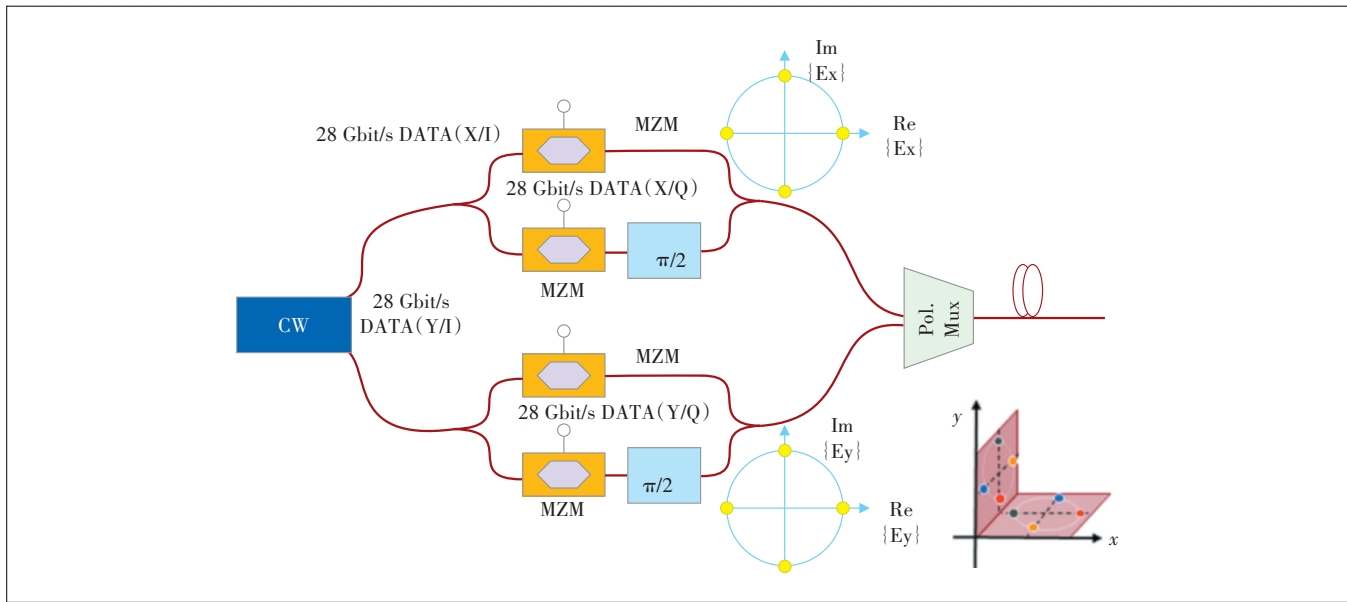


图1 PDM-QPSK调制方式

反的滤波器函数,在电域上补偿光场损伤,恢复清晰码元。该技术分为FDEQ和TDEQ,分别在频域和时域处理色散与PMD。经相干接收的4路信号经ADC采样后,通过FIR滤波器实现色散、PMD补偿和偏振恢复,最终完成BER判决和纠错。DSP技术提高了100G系统的色散容限和DGD容限,使系统组网更灵活,已成为主流技术配置。

采用电域DSP技术,100G系统能实现40 000~60 000 ps/nm色散与70~90 ps DGD容限,省去DCM模块,PMD不再是传输障碍,系统组网更灵活。

综上所述,PDM-QPSK、相干接收与DSP技术的结合已成为100G传输系统的主流配置,其逻辑框架如图2所示。

2 100G OTN 系统超长站距措施

100G OTN技术可以极大地提高系统的传输容量,但在电网系统中又面临着超长距离光传输的问题。特别是在直流线路、川西、西藏等偏远地区,超长站距(常超过200 km,部分达300 km)、高海拔恶劣环境等对100G OTN系统构成严峻挑战。因此除传统技术外,还需要新的放大技术来支撑,包括色散补偿和非线性补偿算法的优化、二阶拉曼放大技术、多泵浦光级联关键技术,以延长单跨段传输距离,提升电力通信系统的运维效率与可靠性。

2.1 色散和非线性补偿算法优化

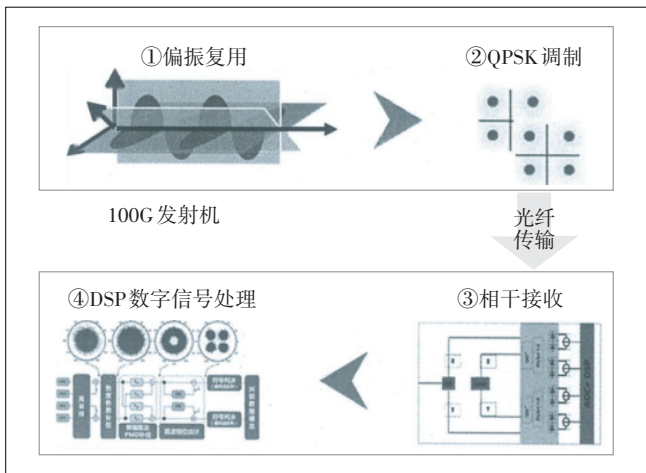


图2 100G OTN系统关键技术示意

色散补偿算法的优化可采用改进均峰功率监控的色散估计方式,其原理如图3所示。

首先对接收到的信号进行自相关运算,并利用Wiener-Khinchine定理初步估计链路色散的大致范

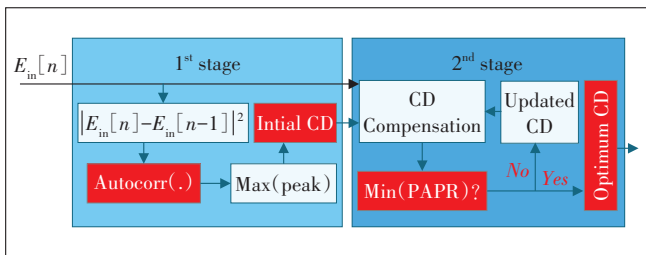


图3 改进均峰功率监控色散估计与补偿

围。然后在初步估计的基础上,利用接收信号的均峰功率进行色散的精确估计和补偿,从而提升色散估计的精度和速度。实验结果表明,改进均峰功率监控的色散估计方式,得到的估计值与实际色散值几乎一致,且收敛速度快于传统方法^[10-12]。在电力无中继传

输系统中,该算法能提升系统误码率性能,与传统方法相比,在 7% FEC 处,提升了约 1.4 dB。

非线性补偿算法的优化可采用背向传输的非线性补偿方式,其原理如图 4 所示。

该补偿算法主要针对 PDM-QPSK 信号,用于补

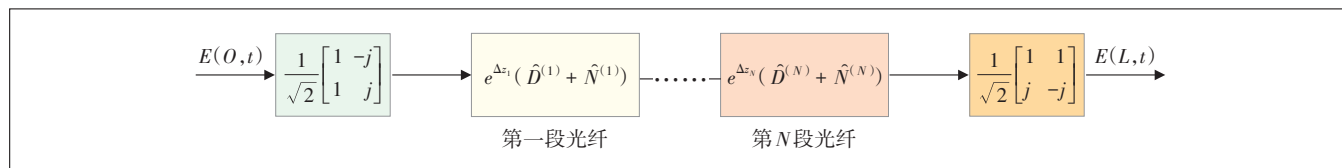


图4 背向传输法基本原理

偿自相位调制效应。该算法综合考虑了两正交偏振态信号的自相位调制、交叉相位调制以及拉曼泵浦源对信号的交叉相位调制效应,实现了全面的非线性补偿。实验结果显示,在 300 km 标准单模光纤无中继传输后,采用该算法可将 PDM-QPSK 信号的人纤功率提升 3 dB。

色散和非线性补偿算法优化方式实现了色散的动态、自适应、高精度补偿,提高了估计与补偿速度,有效提升了传输性能,在高性能无中继光纤通信系统中具有潜在应用价值。

2.2 二阶拉曼放大技术

二阶拉曼泵浦技术是实现长距离无中继传输的关键技术之一。该技术通过泵浦光与信号光之间的拉曼频移,实现对信号光的放大。具体而言,当泵浦光经过一次拉曼频移后,会产生强的 Stokes 光,该 Stokes 光可进一步作为新的泵浦源,泵浦更长波长的光,从而实现信号的二阶放大。在二阶拉曼泵浦过程中,需采用更高功率和更低波长的泵浦源。拉曼频移约为 13.2 THz,以 1 550 nm 的信号光为例,要对其放大,需要 1 450 nm 的泵浦光,而 1 450 nm 的泵浦光又需要 1 350 nm 的二阶泵浦光进行放大^[13]。这种逐级泵浦的方式,使信号光能够获得足够的增益,从而实现长距离传输。

针对二阶 13xx nm 泵浦源的需求,传统方案常选用拉曼光纤激光器,其虽具备输出功率高的优势,但也存在体积庞大、成本高、转换效率随拉曼频移次数增加而降低以及相对强度噪声较大等不足。鉴于二阶拉曼对功率要求不高,可通过复用 2 个相同波长的半导体激光器,并利用偏振复用合波装置(PBC)进行功率耦合和退偏处理,结合 WDM 实现多波长耦合输

出。该方案能优化拉曼输出的增益平坦性,并降低噪声指数,满足二阶拉曼泵浦源的需求。

在二阶拉曼放大器的结构方案中,一阶分布式拉曼放大器采用后向泵浦法,利用 1 425~1 465 nm 激光器产生的一阶泵浦光经 WDM 合波后,对 1 545~1 565 nm C 波段信号光进行分布式放大。二阶分布式拉曼放大器则在一阶基础上增加 1 340~1 360 nm 二阶泵浦源,二阶泵浦光先对一阶泵浦光进行放大,而后放大的一阶泵浦光再对信号光进行放大。二阶泵浦源成为主要能量来源,实现高增益,且一阶泵浦源受二阶泵浦补偿,使放大更平稳。目前常用二阶拉曼共泵结构,该结构集成泵浦源,便于模块化管理,并充分利用光纤放大长度,具有更大的优势。二阶共泵拉曼放大器如图 5 所示。

综上所述,二阶拉曼泵浦技术通过合理选择泵浦源和优化放大器结构,可有效放大信号光,从而满足长距离无中继传输的需求。

2.3 无源中继放大技术和级联泵浦遥泵放大技术

在 100G 大容量超长跨距光传输系统中,当 EDFA 和 RFA 无法满足接收端光信噪比要求时,远程泵浦光

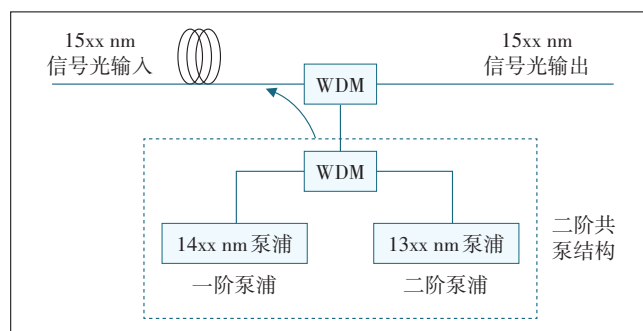


图5 二阶共泵拉曼放大器

放大器(ROPA)成为一种有效的解决方案。ROPA 通过在传输线路中引入远程增益单元(RGU)来提高系统功率预算和延长传输跨距。其由远程泵浦单元(RPU)和RGU组成,RGU通常由掺铒光纤(EDF)和相关无源光器件组成,部署在传输电路的中间位置;而泵浦源则位于传输系统的接收端或发送端^[14-16]。RPU提供的高功率泵浦光通过光纤传输至RGU中的掺铒光纤,激励铒离子,从而实现信号光的受激放大。

在OTN系统中,还需考虑RGU对信号光放大增益平坦的问题,因此需增加增益平坦滤波器。此外,不同波长信号光在光纤中的传输损耗不同,且存在能量转移现象,导致光纤线路末端信号功率差异较大。为解决此问题,ROPA通常采用旁路结构。

随着电网长距离输电的发展,遥泵系统应用场景日益增多,推动了遥泵放大技术的持续发展。遥泵技术发展方向包括:

a) 优化RGU噪声。

(a) 优化RGU光路结构,选择低插损的无源器件,降低RGU自身插损。

(b) 增加反射器件,提高泵浦利用效率。

(c) 采用多级增益结构,充分利用正反向泵浦能量。

b) 提高遥泵RGU增益。

c) 提高泵浦能量,延长泵浦输送距离。

(a) 优化泵浦非线性效应,提高一阶泵浦入纤能量。

(b) 多芯RPU复用,提高RGU增益能量。

(c) 二阶或高阶RPU,提高RGU增益能量。

(d) 采用多阶拉曼、多阶遥泵混合传输系统。

这些技术的发展将进一步推动大容量超长跨距光传输系统的广泛应用。

2.4 电力通信 100G OTN 系统遥泵的应用

目前商用较多的是一阶随路遥泵系统,多个实际工程项目均采用了该技术实现长距离传输,例如:2018年藏中联工程左贡—芒康段落的100G实验电路(跨段距离超400 km)、2017年新疆电力伊犁—库车100G电路(跨段距离400 km)、国网冀北OTN骨干传输网工程沽源—太平长距项目(跨段距离286 km)以及雅江直流塔下中继站—飞山变段落的100G实验电路(跨段距离超400 km)。

然而,随着光通信技术的不断进步,多芯RPU、高阶遥泵以及高阶拉曼+高阶遥泵混合传输系统等新型

方案也逐渐受到关注。这些方案目前以应用研究为主,商用案例较少,但其在提升传输性能、延长传输距离方面具有一定优势。例如:多芯RPU采用旁路+随路设计,可有效提高泵浦进入RGU的功率,进一步延长传输距离;二阶(多阶)遥泵技术通过采用1 340~1 360 nm泵浦+1 425~1 465 nm泵浦方式,在光纤中13xx泵浦对14xx泵浦功率进行放大后,再进入RGU中,因此可增加RGU的安装位置距离。和一阶遥泵相比,一般可延长10 km左右。

最后,混合传输方案通过融合高阶拉曼和多级遥泵技术,实现了光信号的分布式放大,进一步提升了传输性能。然而,该方案的实际效果尚需进一步研究验证。

2.5 高功率放大器使用要求

前述的二阶拉曼技术和遥泵技术均采用高功率的泵浦单元,在使用时须注意以下几个方面。

a) 输出功率很高,若光纤跳线端面存在灰尘,光纤端面上的污物会吸收光能量发热,很容易造成跳线损伤甚至烧毁,影响系统性能。

b) 增益介质是传输光缆本身,因此传输光缆的种类以及质量对拉曼光纤放大器的性能有很大影响。

c) 在拔插光纤头时,严禁在拉曼放大器工作状态下进行操作,以防强激光烧伤眼睛。

d) 严禁大角度折弯光纤,严格遵守拉曼光纤放大器尾纤的弯曲半径(最小为30 mm)要求,不能有很大的折弯,否则会烧坏尾纤。

e) 对于线路上多个光跳纤节点,有条件时尽量采用光缆直连方式,使用法兰对接容易产生光信号散射,影响线路的传输质量。

3 100G OTN 系统抗 SOP 措施

作为国内电力通信领域首次大规模应用的100G OTN系统,广东电力100G OTN系统采用FONST 6000 U20/U30设备。2018年,系统内多个跨段频发LOF告警。经排查分析发现,雷击导致OPGW光缆光信号偏振态SOP波动,引发设备误码。

3.1 原理分析

在非相干时代,10G信号采用单偏振态强度调制方式,对SOP变化不敏感。而在相干时代,100G及超100G信号采用偏振复用技术,对SOP变化极为敏感。10G/100G系统调制方式如图6所示。

100G OTN系统面临色散和偏振模色散(PMD)容

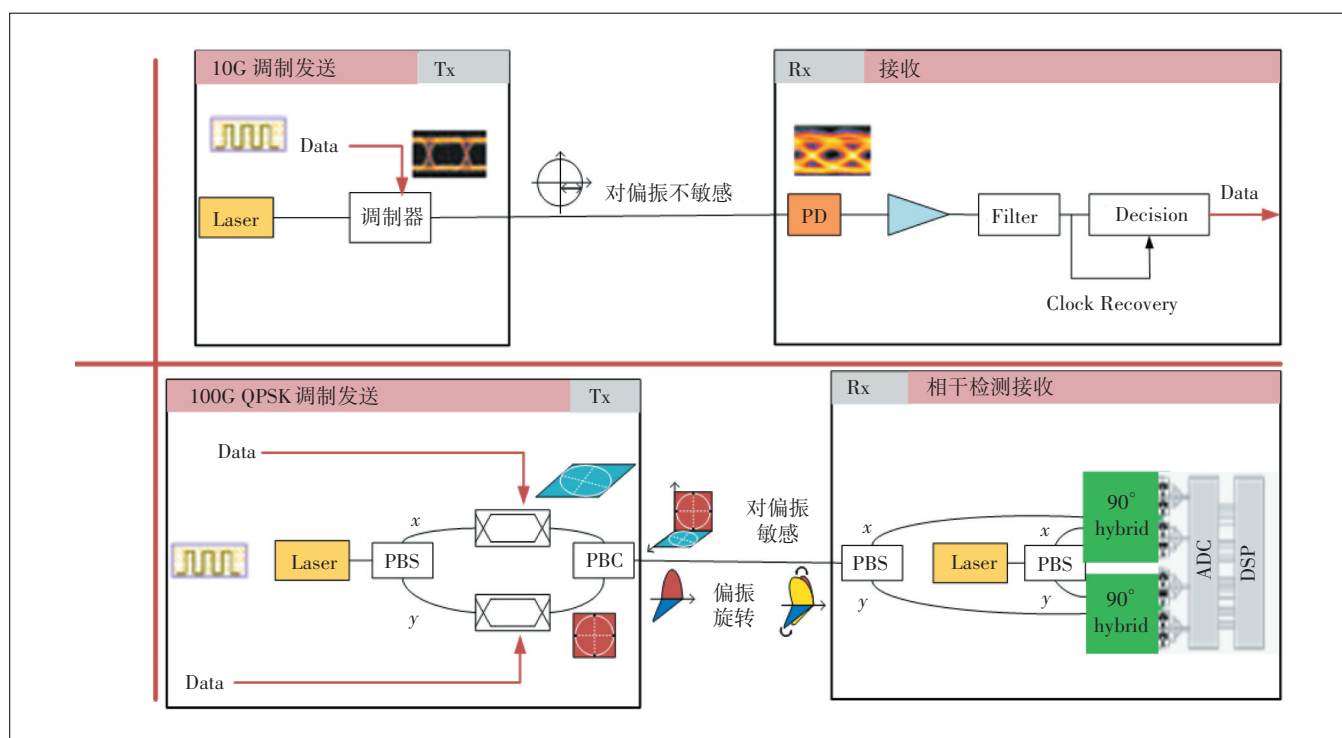


图6 10G/100G系统调制方式

限过小的问题,而通过收端 DSP 信号处理技术,可以补偿出光场上存在的 PMD 损伤^[17-18]。

采用 DSP 信号处理技术补偿偏振模色散(PMD),首先需要测量偏振模色散。然而,偏振模色散无法仅用差分群时延一个参数准确描述,须用邦加球上偏振模色散矢量(偏振态 SOP)表示,补偿则通过斯托克斯矢量补偿法实现。因此,快速检测偏振态并实现快速补偿成为 DSP 技术补偿 PMD 的关键。若偏振态变化速率超出 DSP 处理能力,系统将无法及时检测并补偿,导致信号误码。

相干码型依赖于特定算法来监测并追踪 SOP 的变化。当 SOP 的变化速度超出了 DSP 的跟踪极限时,系统将无法实时有效地进行补偿调整,进而引发纠错后的误码现象。具体方式如图 7 所示。

通过对现网光缆的不同敷设方式的 SOP 进行观测和测量发现:地理、普通架空、沿铁路、高架敷设的光缆的 SOP 变化速度为 krad/s 量级,而 OPGW 光缆监测的最大 SOP 变化速度达到 Mrad/s 量级。雷电对 OPGW 光缆的 SOP 影响最大,OPGW 相干光通信面临抗雷击的巨大挑战。

3.2 100G OTN 系统提高抗 SOP 能力的优化思路

造成 SOP 相关问题的主要原因有 3 个:一是

OPGW 光缆的特殊结构,二是采用的 PDM 偏振复用技术;三是 OTN 设备抵抗 SOP 能力主要由 OTN 电层做相干检测的 DSP 实时跟踪处理 SOP 变化的算法能力所决定。

针对该问题,提升系统抗 SOP 能力的改进思路包括以下 4 个方面:一是从 OPGW 光缆绞入系数、绞合节距入手优化光缆结构,降低法拉第效应,但该方案实施难度大;二是采用非 PDM 编码方式,采用 8QAM、16QAM 等非 PDM 方式,虽能从根本上解决 SOP 问题,却与当前高速 OTN 系统的默认配置相悖;三是设计快速跟踪 PDM 的 DSP 算法,这是提升 OTN 设备抗 SOP 能力的关键,通过算法优化,系统能以更小代价承受更高的 SOP;四是在光缆与设备既定的情况下,100G 系统设计时需预留充足光信噪比(OSNR)余量,以应对外部干扰,尤其是雷击影响。鉴于前 2 种策略实施难度较大,当前更侧重提升 DSP 处理能力,并辅以 OSNR 余量设计,确保系统稳定运行。

4 结束语

本文通过对 100G OTN 系统在电力系统中的特殊应用场景及技术挑战进行深入分析,提出了针对性的解决方案。方案从关键使能技术到超长站距措施,再

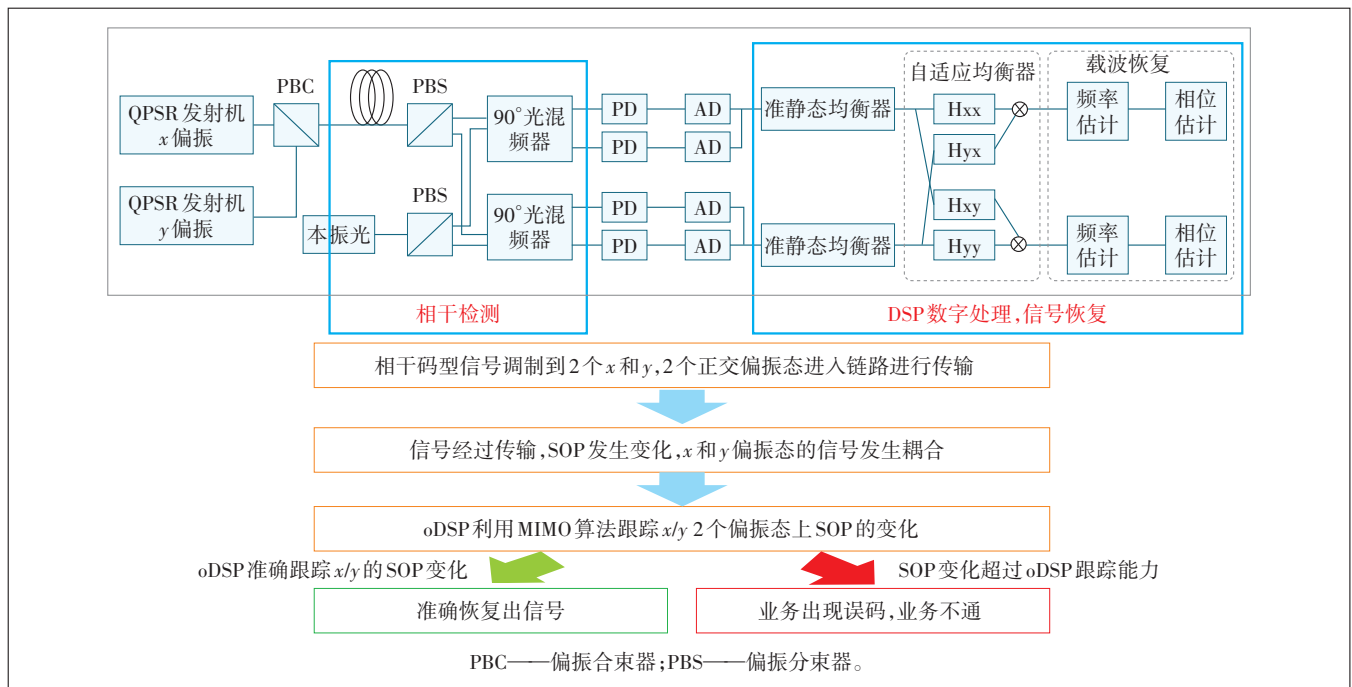


图7 100G 系统信号调制解调过程

到抗 SOP 策略,旨在为 100G OTN 系统在电力系统中的广泛应用提供理论和技术支撑。未来,随着技术的不断进步,100G OTN 系统将在电力通信中发挥更加重要的作用。

参考文献:

- [1] 李纯丹. 100Gbit/s 波分的关键技术及推进策略探讨[J]. 电信工程技术与标准化, 2013, 26(3): 54-58.
- [2] 郭小溪, 王颖, 唐佳, 等. 大容量 100G OTN 关键技术及其在电力通信中的应用研究[J]. 软件, 2017, 38(9): 103-107.
- [3] 马鑫. 大容量 100G OTN 关键技术及其在电力通信中的应用分析[J]. 通讯世界, 2019, 26(11): 108-109.
- [4] 甄学伟, 胡启明, 对 100G OTN 系统关键技术及主要故障的几点思考[J]. 信息通信, 2019, 7: 56-157.
- [5] 司传倡. 100G 波分系统关键技术分析和应用实践[J]. 电子测试, 2021(14): 82-83.
- [6] 何培森. 超 100G 光传输系统关键技术[J]. 中国科技信息, 2022(21): 80-82.
- [7] 贺金花. 100G OTN 技术在骨干网传输系统中的应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [8] 庄海力. 100G OTN 关键技术及多业务承载方案研究[J]. 数码世界, 2019(11): 17.
- [9] 何培森. 超 100G 光传输系统关键技术[J]. 中国科技信息, 2022(21): 80-82.
- [10] 王炫, 程松, 罗清, 等. 基于峰均值功率比的色散估计算法研究[J]. 光通信研究, 2020(5): 24-27, 72.
- [11] 于越. 超高速 OTN 信号相干检测中色散估计与补偿技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
- [12] 杨翔宇. 光纤通信系统中学习型数字反向传播非线性补偿算法的量化研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
- [13] 汪大洋, 曹晶, 李程, 等. 二阶拉曼放大器技术在电力超长站距光传输系统中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2017, 15(8): 60-65.
- [14] 龙诺亚, 王飞, 郑元伟. 超 300km 级别光纤传输技术在电力通信中的研究与应用[J]. 电力大数据, 2022, 25(1): 67-74.
- [15] 岳晓斌, 王海燕, 解鹏, 范志毅, 张静, 胡彬, 郭浩川. 100 G OTN 超长站距通信关键技术研究与应用[J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(12): 49-54.
- [16] 李勇杰, 王辉. $N \times 100$ Gbit/s OTN 超长站距传输技术在电力系统的应用研究[C]//中国电机工程学会电力通信专业委员会. 中国电机工程学会电力通信专业委员会第十四届学术会议论文集. 人民邮电出版社, 2024: 75-79.
- [17] 解文明, 李永嫚, 张艳. 雷击 OPGW 光缆对电力 100G OTN 系统影响分析[J]. 邮电设计技术, 2023(1): 59-63.
- [18] 连伟华. 雷电条件下架空电力光纤通信系统关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2025.

作者简介:

金娟, 毕业于西南交通大学, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统通信设计工作; 袁方, 毕业于四川大学, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统通信设计工作; 韩伟, 毕业于华北电力大学, 高级工程师, 学士, 主要从事电力系统通信建设运维工作。