

空间激光通信网络中的全光数据合路技术研究*

郝帅威^{1,3}, 汪 伟¹, 谢小平^{1,3}, 黄新宁^{✉2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所光子网络技术研究室 西安 710119

2 扬州大学物理科学与技术学院 扬州 225001

3 中国科学院大学未来技术学院 北京 100049)

摘要: 针对空间激光通信网络接入节点多路激光链路传输需求, 基于高非线性光纤中四波混频参量效应, 并结合色散控制, 开展全光合路处理技术研究。采用 VPI 10.0 模拟平台构建了时间透镜全光合路系统, 验证了 4 路速率为 10 Gbps 的差分相移键控 DPSK (Differential Phase Shift Keying) 信号光以及通断键控调制 OOK (On-Off Keying) 和 DPSK 混合制式信号光的全光合路可行性, 并对全光合路技术实现中色散、光功率等关键参数对系统性能的影响进行了分析, 为实际系统的设计和应用提供数据支撑。所提出的全光合路技术具有数据处理带宽大、通信制式兼容且系统复杂度低等优点, 可有效降低空间激光通信网络的资源需求与载荷成本, 为下一代空间激光骨干网的发展与全面应用提供有效技术支撑。

关键词: 空间激光通信网络; 全光数据合路; 四波混频; 时间透镜

中图分类号: V443+.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)04-0070-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211227001

引用格式: 郝帅威, 汪伟, 谢小平, 等. 空间激光通信网络中的全光数据合路技术研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 70-79.

Research on the all-optical data aggregation technology in the space laser communication network

JIA Shuaiwei^{1,3}, WANG Wei¹, XIE Xiaoping^{1,3}, HUANG Xinning²

(1. Dept. Photonics Network, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

2. College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225001, China;

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the multi-channel laser link transmission requirements of access node in space laser communication network, the all-optical data aggregation, based on the parametric four-wave mixing (FWM) effect in the high nonlinear fiber combing with dispersion controlling, is proposed and analyzed. The all-optical processing system is constructed on the VPI 10.0 simulation platform and the feasibility analysis is carried out. Four DPSK modulated optical links at data-rate of 10 Gbps each are optically aggregated into one 40 Gbps link. The aggregation of mixed optical links, with OOK and DPSK modulation types, is also validated. Then the fiber dispersion and optical power, which are crucial in the aggregation performance, are separately varied and the corresponding system performance such as eye-pattern diagram and bit error ratio are analyzed. The obtained results can reliably support the practical system design and application. The proposed system in this paper owns several application advantages such as broader bandwidth, modulation transparency and lower complexity. Thus, it is helpful in the cost and space resource demand reduction, and can technically support the comprehensive development and application of the next generation space laser backbone network.

Key words: Space laser communication network; All-optical data aggregation; Four-wave mixing; Time-lens

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211227001

Citation: JIA Shuaiwei, WANG Wei, XIE Xiaoping, et al. Research on the all-optical data aggregation technology in the space laser communication network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 70-79.

*基金项目: 中华人民共和国科学技术部重大项目 (No.2017YFC0803905)

✉通信作者: 黄新宁 (huangxinning@yzu.edu.cn)

收稿日期: 2021-12-27 收修改稿日期: 2022-01-26

引 言

空间激光通信系统具有数据传输带宽大、无需申请频段使用牌照、体积重量功耗低等优势，是空间海量探测数据快速下传的重要技术途径。美国、欧洲、日本等先后成功验证不同链路距离下空间激光通信技术的可行性^[1-3]，我国也已有多个空间激光通信系统成功在轨验证^[4]，“点对点”空间激光通信技术的工程化应用日渐成熟。为抢占空间资源，多个国家和地区纷纷提出全球覆盖的空间信息网络建设规划，如美国航天局 NASA “下一代地球轨道中继卫星”计划^[5]、欧洲航天局 ESA “高通量光学网络”计划^[6]、日本宇航局 JAXA 的“光数据中继卫星”计划^[7]，以及我国的“天地一体化信息网络”重大工程项目等。上述空间信息网络规划中，均基于激光链路构建空间数据传输骨干网络，且数据传输速率将达到 100 Gbps 量级。

当多个空间平台同时请求经激光骨干网络实现探测数据快速回传时，如图 1 所示，在接入节点将多路并行的用户激光链路整合为骨干激光链路，既可提升接入节点的响应效率，保障探测数据的时效性，又能有效利用骨干网络大容量传输的优势。传统“光-电-光”技术途径实现上述骨干网络接入节点的合路处理时，需首先将多个接入链路激光信号解调至电域，实现合路处理后再调制至激光载波上发射出去，进而在骨干网络中继续传输或传至地面站。因此，需要在接入节点配置多台光接收机完成接入链路解调，这对空间平台的体积重量功耗 SWaP (Size, Weight and Power) 资源需求高，且在电域实现合路处理时面临航天级电子器件带宽限制，难以满足未来 100 Gbps 量级的数据处理需求。

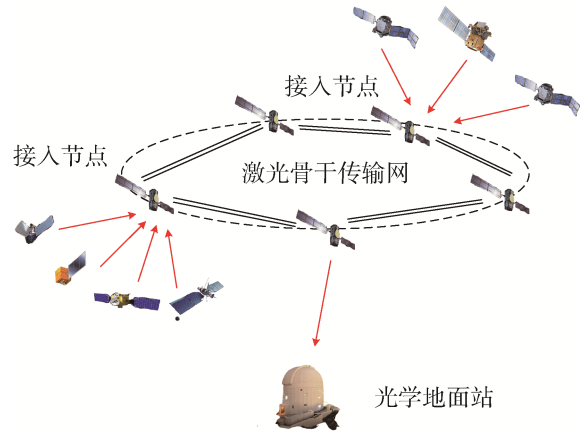


图 1 激光链路接入示意图
Fig. 1 Schematic diagram of laser link access

基于光场的时空对偶特性构建时间透镜，可对光信号进行时频特性转换处理，是近年来光信息处理的研究热点，主要应用领域包括高速光时分复用 OTDM (Optical Time-Division Multiplexing) 信号解压缩^[8-10]、通信制式转换^[11]、脉冲压缩^[12,13]以及微波^[14]等。本文基于高非线性光纤 HNLF (High Nonlinear Fiber) 中的四波混频 FWM (Four-wave Mixing) 效应，构建了具有数据速率透明、通信制式兼容的时间透镜系统，实现了四路速率为 10 Gbps 的光信号全光合路处理，同时针对非线性介质色散、功率匹配、频率间隔等影响全光合路的关键参数进行了分析，为实际工程应用提供参数选择支撑。所构建的全光合路系统具有结构简单、处理带宽大、制式兼容等优点，能够有效降低空间接入节点的载荷成本及 SWaP 需求，可为我国未来空间激光骨干网络的发展与全面应用提供支撑。

1 全光合路原理与系统

1.1 全光合路原理

光场的时空对偶特性揭示了色散和相位调制在时域-频域的对称关系^[15]，即在时域中对光场进行二次型相位调制并给予相应的色散控制，可实现输入光场的频域至时域转换，完成这一转换的系统又称为时间透镜。若输入

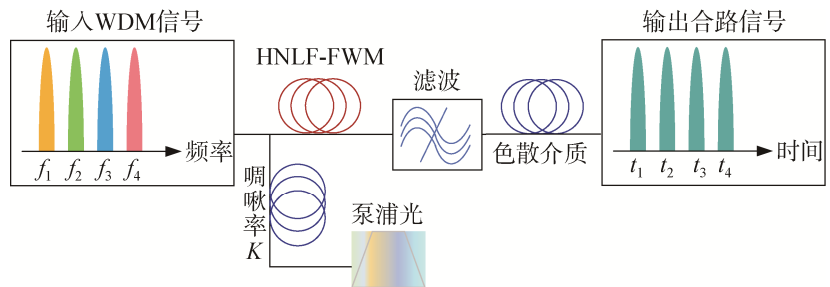


图 2 全光合路原理示意图

Fig. 2 Principle demonstration for the all optical aggregation

光场为多路波分复用 WDM (Wavelength Division Multiplexing) 信号，则经时间透镜处理后可将其频域包络转换至时域，如图 2 所示，实现了多路数据的全光合路处理。空间激光骨干网络接入节点应兼容各

平台数据制式, 而非线性 FWM 参量过程具有通信制式透明、响应瞬时等优点, 故本文基于 HNLF 中的 FWM 效应, 对输入光场进行二次型相位调制。参与 FWM 效应的泵浦光 (Pump Light), 通过一段色散常数为 β_p 、长度为 L_p 的色散介质后, 获得线性啁啾 (啁啾率记为 K), 这样的泵浦光与信号光耦合进入 HNLF 中产生 FWM 效应, 则闲频光 E_i 光场可以表示为:

$$E_i = kE_s^* \times E_p^2 \quad (1)$$

其中 k 为 FWM 效率, E_s 和 E_p 分别为信号光和泵浦光的光场。式 (1) 表明, 在 FWM 过程中泵浦光对闲频光产生了二次型相位调制, 且调制后的闲频光相位函数为^[12]

$$\varphi(t^2) = \frac{t^2}{\beta_p L_p} \quad (2)$$

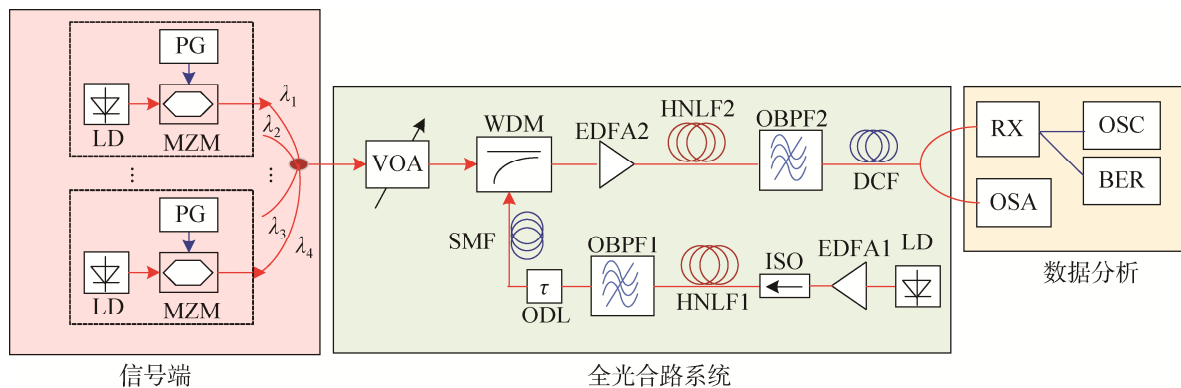
此时闲频光若经过一段长度为 L_i 、色散常数为 β_i 的色散介质时, 当满足关系式 (3) 时, 有:

$$K = -1/\beta_i L_i \quad (3)$$

闲频光时域与输入信号光频域在包络和功率谱上完全一致, 此时输出的闲频光携带了输入端多路波分复用信号光的全部数据, 即实现了全光域数据合路处理。

1.2 全光合路系统

基于前述全光合路理论分析结果, 以 4 路激光链路的合路处理为例, 构建如图 3 所示的全光合路系统。其中发射端产生速率为 10 Gbps, 波长分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 的 4 路波分复用信号光, 用以模拟不同空间平台到达骨干网络接入节点的激光链路; 在全光合路系统中, 首先对泵浦光 λ_p 进行啁啾加载, 具体做法为: 采用掺铒光纤放大器 1 EDFA1 进行功率放大并注入到 HNLF1 中产生超连续谱, 经光带通滤波器 1 OBPF1 滤出需要的泵浦光后注入至一段单模光纤 SMF(Single Mode Fiber), 其长度为 L_p , 色散常数为 β_p ; 经过 SMF 后的泵浦光获得线性啁啾, 且啁啾率 $K = 1/\beta_p L_p$ 。获得线性啁啾的泵浦光与 4 路输入的波分复用信号光经波分复用器 WDM (Wavelength Division Multiplexer) 耦合后, 由 EDFA2 进行功率放大并注入至 HNLF2 发生 FWM 过程; 所产生的闲频光 λ_i 既携带了 4 路信号光的所有信息, 又得到泵浦光的二次型相位调制, 经 OBPF2 滤出后, 注入到色散补偿光纤 DCF(Dispersion Compensation Fiber) 中, 其长度为 L_i 且色散常数为 β_i 。当选择的 DCF 与泵浦啁啾率满足式 (3) 关系时, 其输出端闲频光携带了 4 路波分复用信号光的合路数据; 上述过程中还采用了可调谐光衰减器 VOA (Variable Optical Attenuator) 对信号光功率进行调节, 以及采用光延时线 ODL (Optical Delay Line) 和光隔离器 ISO (Isolator) 对泵浦光进行调整。



注: LD (Laser Diode, 激光二极管); PG (Pattern Generator, 图形发生器); MZM (Mach-Zehnder Modulator, 马赫-曾德尔调制器); RX (Receiver, 光接收器); OSA (Optical Spectrum Analyzer, 光谱分析仪); OSC (Oscilloscope, 示波器); BER (Bit Error Ration Tester, 误码率测试仪)

图 3 全光合路系统示意图

Fig. 3 Implementation diagram for the all optical aggregating system

2 全光合路性能分析

基于图 3 所示的全光合路系统，采用 VPI (VPIphotonics) 10.0 模拟平台搭建时间透镜系统，对上述全光合路系统的处理性能进行分析。

2.1 相位调制格式全光合路性能分析

首先，验证所述全光合路系统对相位调制信号的合路性能。信号端采用差分相移键控 DPSK (Differential Phase Shift Keying) 通信制式，4 路激光链路波长分别设定为 1 554.94 nm、1 555.74 nm、1 556.55 nm 和 1 557.36 nm，控制 MZM 的偏置点产生速率为 10 Gbps 的 4 路 DPSK 信号光。在全光合路系统中，首先对泵浦光加载线性啁啾，取泵浦光中心波长为 1 563.86 nm，带宽为 150 GHz，注入到长度 L_p 为 3.124 km，色散系数 D_p 为 20 ps/(nm·km) 的单模光纤中获得线性啁啾后与信号光耦合；耦合后的光束经 EDFA2 放大至 23 dBm 后注入 HNLF2 中，注入光谱如图 4 (a) 所示，HNLF2 参数设置为：非线性系数 γ 为 11.2/(W·km)，长度 L 为 0.5 km，色散系数 D_0 为 -0.22 ps/(nm·km)。在 HNLF2 中发生 FWM 效应并产生中心波长为 1 571.24 nm 的闲频光，如图 4 (b) 所示，此时的闲频光已受泵浦光的二次型相位调制。利用 OBP2(带宽为 0.6 THz)将闲频光滤出后注入至 DCF，其参数设置为：光纤长度 L_1 为 0.159 km，色散系数 D_1 为 -195.54 ps/(nm·km)。图 4 (a) 和图 4 (b) 中横坐标表示相对于中心光波频率 193.1 THz 的光频率分布，纵坐标表示功率。DCF 输出端得到合路后的光信号为一路速率 40 Gbps 的光时分复用 OTDM 信号，如图 4 (c) 所示，即将波分复用信号频域特性转换至时域，在此过程中 WDM 的数据也完成了合成，从而达到全光合路目的。

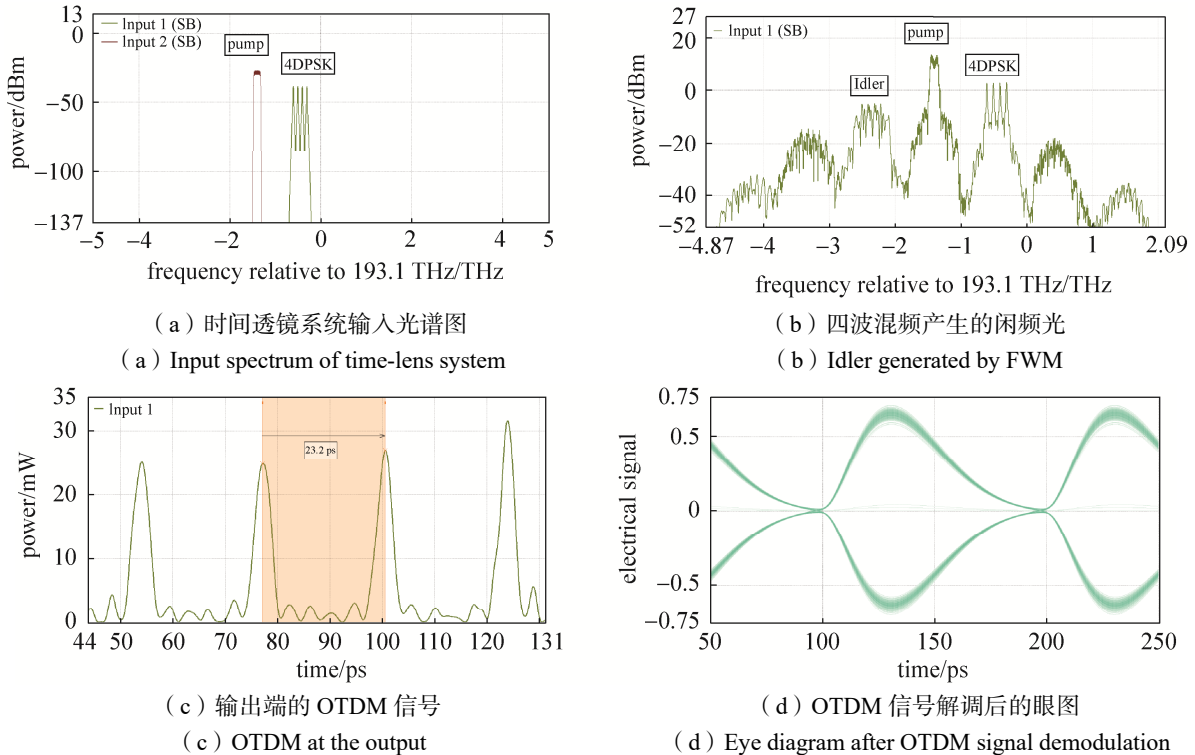


图 4 4 路 DPSK 信号全光合路处理

Fig. 4 All-optical data aggregation for 4 channels DPSK

在接收端利用接收机将得到的合路信号进行解调，接收机解调过程为：利用带宽为 10 GHz 的幅度调制器 AM(Amplitude Modulator)对得到的 OTDM 光信号采样，再经 1 bit 光延时干涉仪进行相位解调。得到解调后的信号眼图如图 4 (d) 所示，其中横坐标代表解调后电信号的时域时间分布，纵坐标表示接收信号解调后的时域电信号的相对强度，本文中所有数据都是通过同一接收测量方法得到，所以相对强度即可表明不同输入信号条件下的系统性能。解调后信号眼图张开清晰，对 16 384 bits 的数据进行误码

对比, 全光合路处理引入的误码率为 0。结果表明, 所构建的全光合路系统能够实现 4 路速率为 10 Gbps、通信制式为 DPSK 的光信号全光合路处理, 且引入误码极低, 具有良好的全光合路处理功能。

2.2 混合调制格式全光合路性能分析

本节验证所述全光合路系统对混合调制格式光信号的合路性能, 以满足在激光骨干网络接入节点处, 同时响应不同通信制式激光链路的接入请求这一现实功能需求。调整图 3 中信号端 MZM 的偏置电压和驱动幅值, 得到速率为 10 Gbps、波长分别为 1 554.94 nm 和 1 556.55 nm 的 2 路强度调制 OOK (On-Off Keying) 信号光和波长为 1 555.74 nm、1 557.36 nm 的 2 路 DPSK 信号光。全光合路系统中, 泵浦光的线性啁啾加载过程各器件参数设置保持不变, 线性啁啾处理后的泵浦光与 4 路混合通信制式的信号光耦合后注入 HNLF2 中, 耦合光谱如图 5 (a) 所示。在 HNLF2 中由 FWM 效应产生闲频光, FWM 输出光谱如图 5 (b) 所示, 在这一过程中线性啁啾的泵浦光同样对闲频光产生二次型相位调制作用。再利用 OBPF2 滤出闲频光并注入 DCF 进行色散控制后, 得到数据合路后的 1 路 40 Gbps 信号光, 其时域波形如图 5 (c) 所示, 其中缺失的 2 个时隙为 OOK 通信制式中的“0”码元。可见所构建的全光合路系统具备通信制式兼容的特性, 能够同时实现相位调制和强度调制混合的激光链路同时合路处理, 使空间激光骨干网络接入节点的响应能力更强。

在接收端利用接收机对得到的 1 路 40 Gbps 合路信号进行解调分析, 接收机仍采用带宽为 10 GHz 的幅度调制器对得到的 40 Gbps 合路 OTDM 光信号进行采样, 然后分别利用直接探测方式对 OOK 信号进行解调、利用 1 bit 光延时干涉仪对 DPSK 信号进行解调。图 5 (d) 给出解调后的一路 OOK 信号眼图, 张开度清晰, 表明信号质量好; 解调后的 DPSK 信号眼图与图 4 (d) 类似。分别对 OOK 通信制式和 DPSK 通信制式对 16 384 bits 的数据进行误码对比, 接收端其误码率均为 0, 表明所构建的全光合路系统在进行混合制式合路处理时仍然具备良好的合路性能。

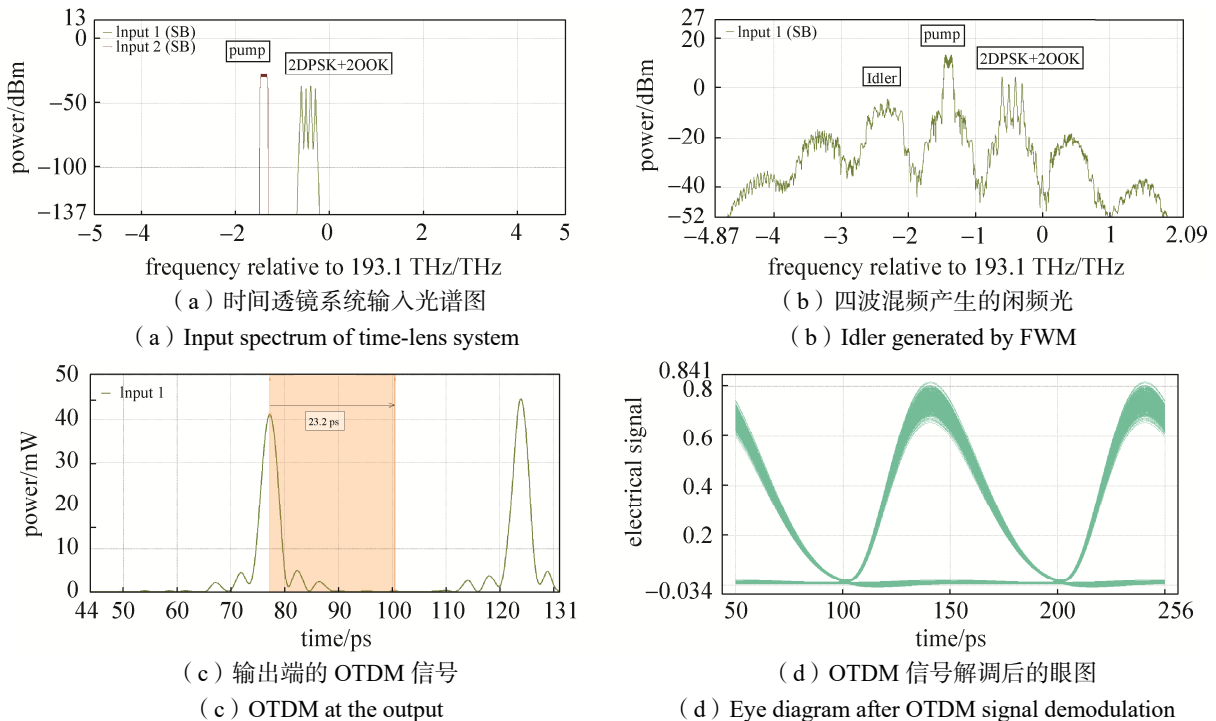


图 5 混合通信制式全光合路处理

Fig. 5 All-optical data aggregation for hybrid communication formats

3 关键参数影响分析

3.1 色散

首先, 分析全光合路系统中, 用于泵浦光线性啁啾加载的单模光纤高阶色散对全光合路性能的影响,

因为高阶色散（尤其三阶色散）的存在将引入非线性啁啾，从而使得所需的二次型相位调制无法精确实现，导致合路系统性能下降。保持 SMF 色散常数 β_p 不变，改变 SMF 色散斜率 D_p 值(进而改变其三阶色散常数)分别为 $0 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 、 $0.02 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 、 $0.04 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 和 $0.06 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ，将得到的合路信号进行解调并计算其误码率，部分解调眼图如图 6 所示。可以看出，随着 SMF 色散斜率的增加（从而三阶色散值增大），全光合路后的信号逐渐畸变且误码率增大，表明 SMF 的高阶色散使得泵浦光的非线性啁啾分量增大，导致 FWM 过程中闲频光得到非二次型相位调制，使得输出的合路信号畸变。当 SMF 的色散斜率 $< 0.06 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 时，可实现较好的全光合路功能。因此，实际系统中 SMF 的高阶色散应尽量小，以降低其对合路系统性能影响。

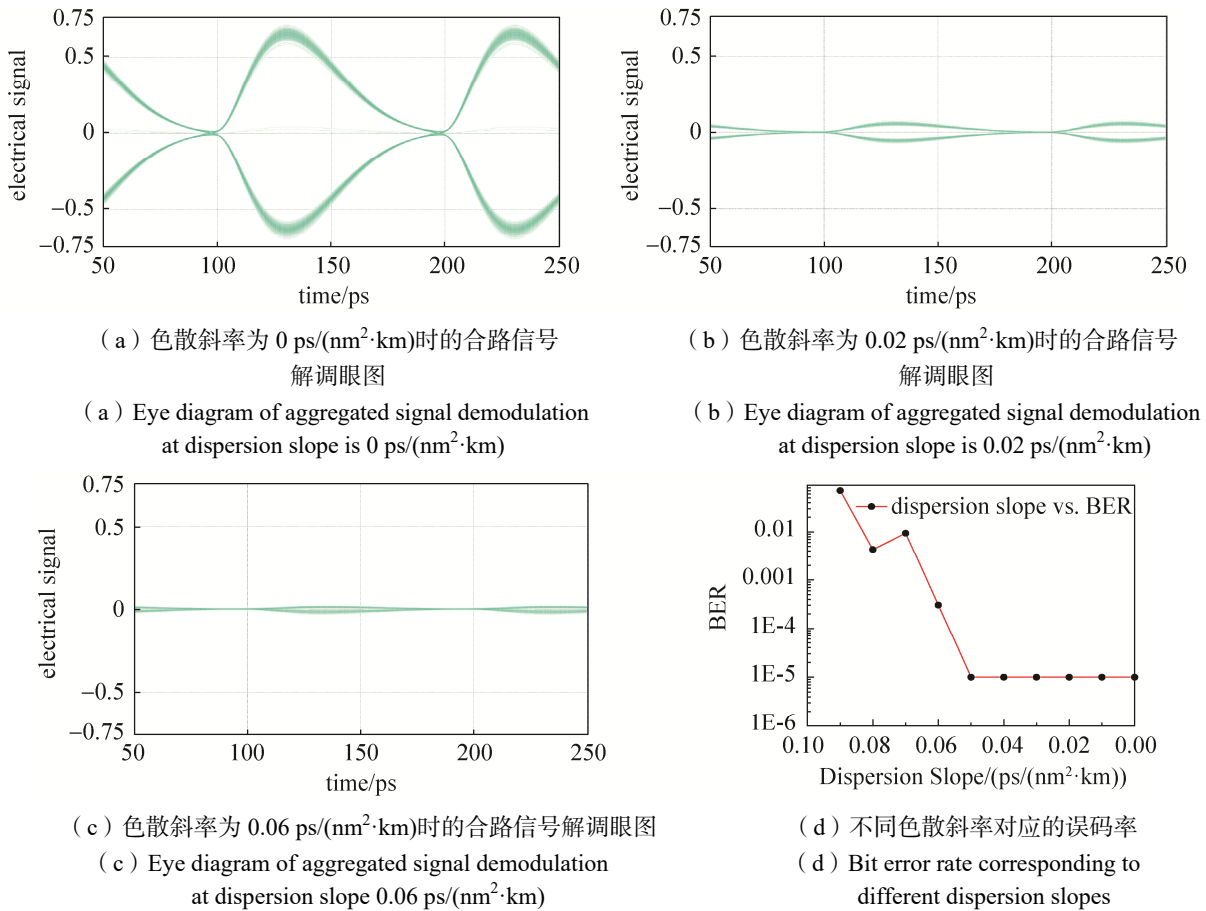


图 6 SMF 高阶色散对全光合路性能影响

Fig. 6 The impact of the SMF high-order dispersion on the all-optical aggregation performance

然后，分析 HNL2 色散系数对全光合路性能的影响，这是因为 FWM 效应要求信号光和泵浦光满足相位匹配条件，而 HNL2 的色散作用将破坏这一匹配要求。将 HNL2 的色散系数依次设定为 $-0.02 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 、 $-0.22 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 、 $-0.32 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 、 $-0.42 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 和 $-0.62 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ，其余参数设置不变，将得到的合路信号进行解调并计算其误码率，结果如图 7 所示。可以看出随着 HNL2 色散系数绝对值增加，全光合路后的信号光畸变加剧，误码率显著增加，当色散系数绝对值小于 $0.32 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 时，合路信号无输出。这是因为，随着 HNL2 色散系数绝对值增加，信号光和泵浦光之间走离效应加剧，两者相位匹配度降低而使 FWM 效率下降，从而生成的闲频光功率降低，全光合路系统性能严重劣化，当 HNL2 的色散系数在 $-0.32 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \sim -0.12 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 时，FWM 效应才可高效率发生。因此，实际系统中泵浦光波长应选在 HNL2 零色散波长附近，且 HNL2 色散系数绝对值应尽可能小。

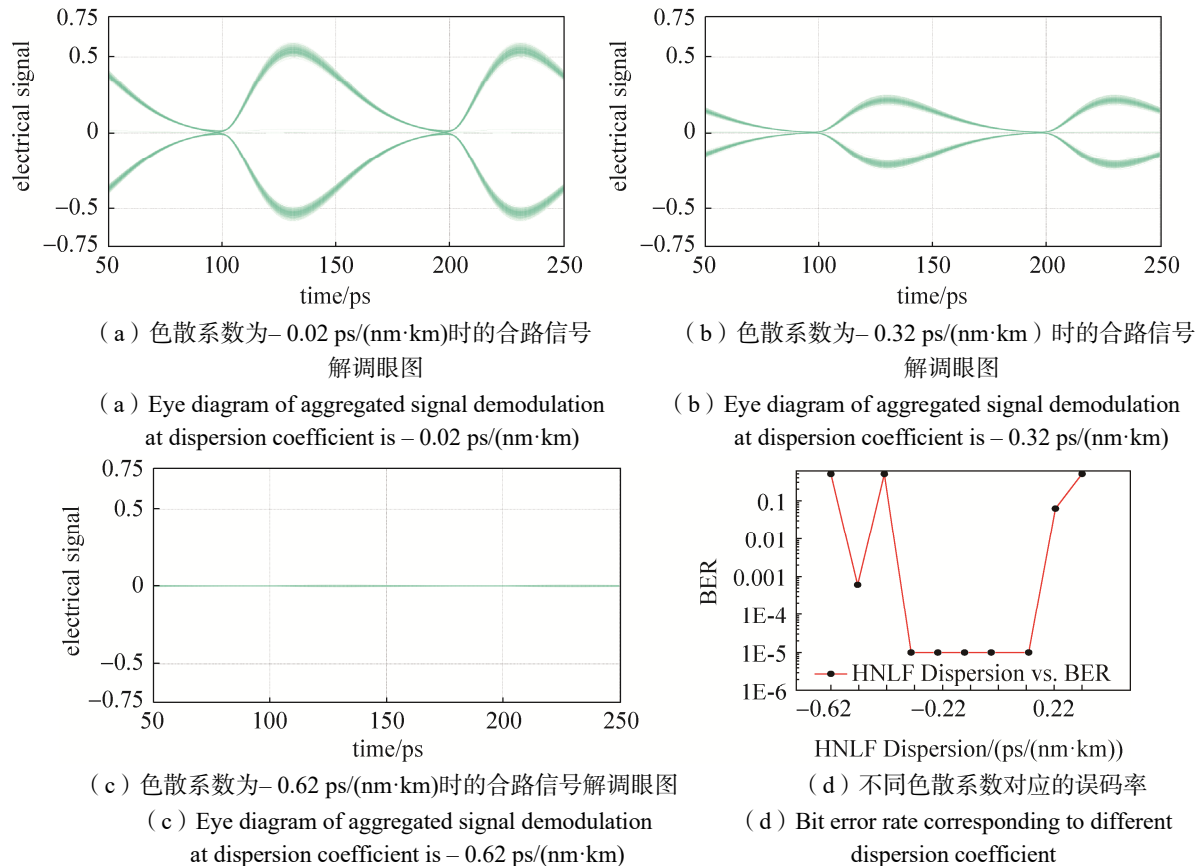
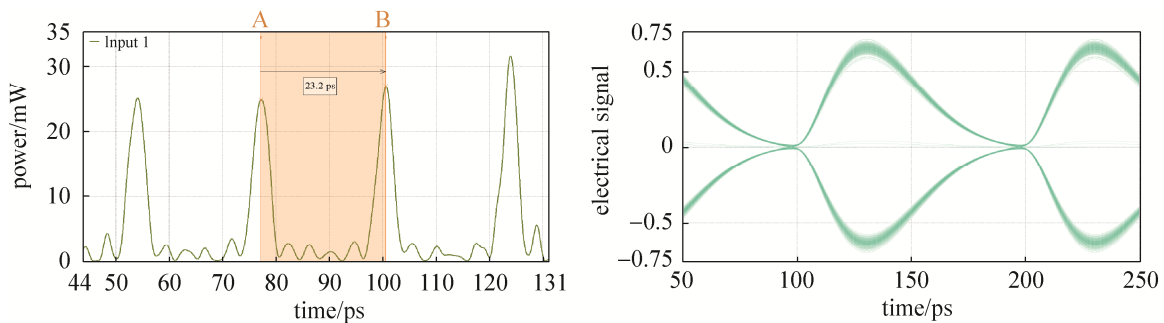


图 7 HNLF2 色散系数对全光合路性能影响

Fig. 7 The impact of the HNLF2 dispersion on the all-optical aggregation performance

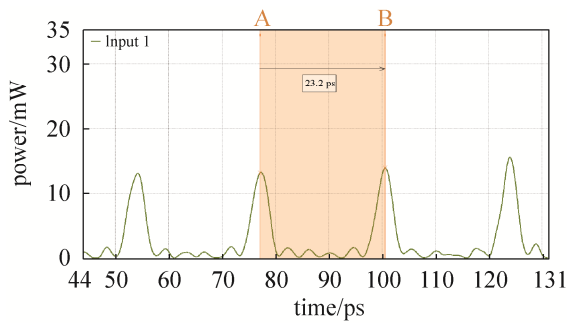
3.2 功率

首先分析输入信号光功率对全光合路性能的影响。以速率为 10 Gbps 的 DPSK 信号为例, 当取误码率为 10^{-7} 时, 其理论极限接收光功率为 -47 dBm , 考虑实际系统与理论值的差距, 预留 5 dB 功率冗余, 取全光合路的 4 路 DPSK 信号输入功率在 $-38 \text{ dBm} \sim -42 \text{ dBm}$ 范围内, 以 1 dB 为步长变化, 其余参数设置不变, 分析输入信号光功率对全光合路系统性能的影响, 结果如图 8 所示。可以看出, 随着输入信号光功率降低, 全光合路后的 OTDM 光信号功率也相应降低; 对 16 384 bits 数据进行误码对比时发现, 输入光功率波动并不会在全光合路系统中引入新的误码, 全光合路性能仍可保持极低误码性能。因此, 输入信号光功率虽然影响 HNLF2 中 FWM 效应的效率, 但因对其相位匹配要求无影响, 故在实际系统中只要输入信号光功率达到 EDFA2 响应范围, 即可实现性能良好的全光合路处理。



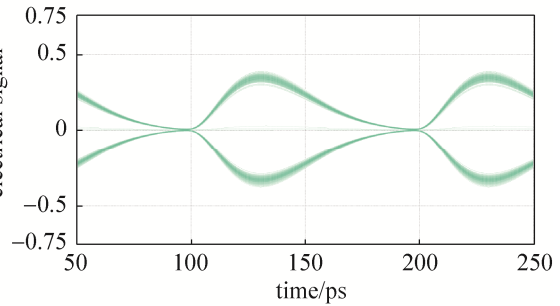
(a) Waveform of aggregated signal at incident optical power is -38 dBm

(b) Eye diagram of aggregated signal at incident optical power is -38 dBm



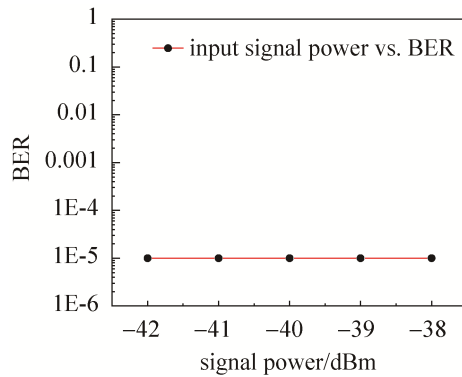
(c) 输入光功率为-42 dBm 时的合路信号波形图

(c) Waveform of aggregated signal at incident optical power is -42 dBm



(d) 输入光功率为-42 dBm 时的合路信号眼图

(d) Eye diagram of aggregated signal at incident optical power is -42 dBm



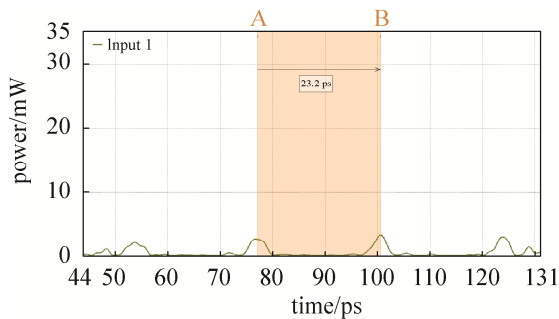
(e) 不同输入信号功率对应的误码率

(e) Bit error rate corresponding to different input signal power

图 8 不同入射光功率下的合路信号波形图、眼图及误码率曲线

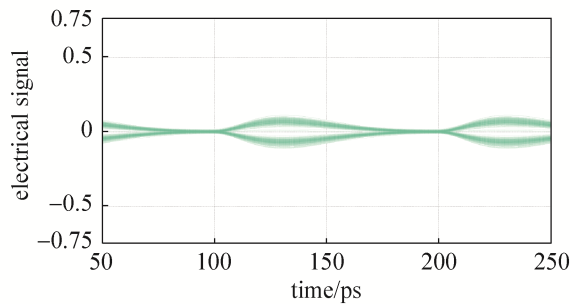
Fig. 8 Obtained waveforms, demodulated eye diagrams and BER curves of aggregated signal under different input power

然后分析 FWM 效应中泵浦光与信号光功率比 P_p/P_s 对全光合路性能的影响。取单路 DPSK 信号光功率为-38 dBm, 改变泵浦光功率, 保持其他参数设置不变, 得到的全光合路结果及误码率曲线如图 9 所示。可以看出随着 P_p/P_s 增大, 全光合路后得到的 OTDM 光信号功率增加且解调后的眼图逐渐张开。这是因为泵浦光功率越高, 在 FWM 过程中对闲频光的二次型相位调制效果越好, 且产生的闲频光功率也越高, 因而全光合路后得到的 OTDM 信号光性能越好。因此在实际系统中, 在资源允许时可适当提高泵浦光功率, 以使全光合路系统性能更优。



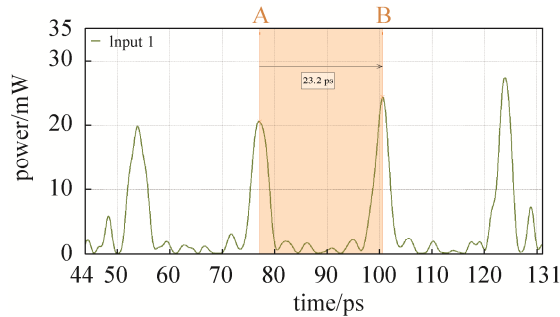
(a) 泵浦/信号功率比为 0.4 时的合路信号光谱图

(a) Waveform of aggregated signal at pump/signal power ratio is 0.4



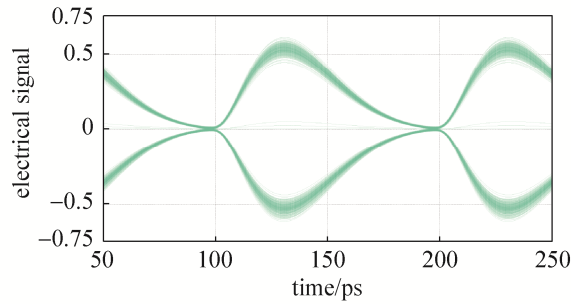
(b) 泵浦/信号功率比为 0.4 时的合路信号眼图

(b) Eye diagram of aggregated signal at pump/signal power ratio is 0.4



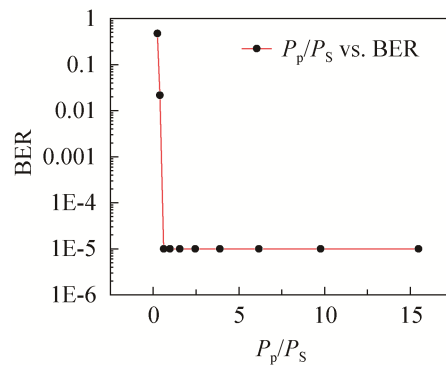
(c) 泵浦/信号功率比为 6.3 时的合路信号光谱图

(c) Waveform of aggregated signal at pump/signal power ratio is 6.3



(d) 泵浦/信号功率比为 6.3 时的合路信号眼图

(d) Eye diagram of aggregated signal at pump/signal power ratio is 6.3



(e) 不同泵浦/信号功率比对应的误码率

(e) Bit error rate corresponding to different pump/signal power ratio

图 9 不同泵浦/信号功率比时的合路信号波形图、眼图及误码率曲线
 Fig. 9 Obtained waveforms, demodulated eye diagrams and BER curve of aggregated signal under different pump/signal power ratio

4 结束语

本文基于高非线性光纤中的四波混频参量效应及色散处理, 构建了可用于空间激光骨干网络边缘节点的全光合路处理系统, 实现了 4 路速率为 10 Gbps、调制格式为 DPSK 的激光链路全光合路处理, 并验证了系统对混合通信制式全光合路处理的可行性。基于 VPI 10.0 对合路后的光信号进行解调分析及误码对比, 结果表明所构建的全光合路系统具有良好的数据合路处理功能, 且兼容混合通信制式, 可有效提高空间骨干网络边缘节点的全光处理能力。接着分析了器件色散、输入光功率等参数对全光合路系统的性能影响, 为实际系统设计和应用提供有力依据。随着“点对点”空间激光通信技术日益成熟, 以激光链路构建骨干网络来支持大容量探测数据快速回传, 是下一代空间信息网络的发展趋势。在空间激光骨干网络边缘节点实现多路激光数据全光合路处理具有带宽大、系统简单、制式兼容等优势, 可有效利用骨干网大容量数据传输优势, 降低系统 SWaP 需求, 为空间信息网络建设及激光链路的全面应用提供支撑。

参考文献

- [1] ROBINSON B S, BOROSON D M, BURIANEK D. A, et al. The lunar laser communications demonstration[C]// 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2011.
- [2] PERDIGUES J, SODNIK Z, HAUSCHILDT H, et al. ESA's OGS upgrades for EDRS: Development status[C]// 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2017.
- [3] YAMAKAWA, CHISHIKI Y S, SASAKI Y, et al. JAXA's optical data relay satellite programme[C]// 2015 IEEE

- International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2016.
- [4] 张若凡, 张文睿, 张学娇, 等. 高轨卫星激光中继链路研究现状及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 1–13.
ZHANG Ruofan, ZHANG Wenrui, ZHANG Xuejiao, et al. Research status and development trend of high earth orbit satellite laser relay links[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 1–13.
- [5] ISRAEL D J, SHAW H. Next-generation NASA earth-orbiting relay satellites: Fusing optical and microwave communications[C]// 2018 IEEE Aerospace Conference, 2018.
- [6] HAUSCHILD T H, ELIA C, JONES A, et al. ESAs Scylight programme: Activities and status of the high throughput optical network "HydRON"[C]// 2018 International Conference on Space Optics (ICSO), 2019.
- [7] ARAKI T. A study of the future optical data relay system; requirements, problems and solution[C]// 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2017.
- [8] PETRILLO K G, FOSTER M A. Scalable ultrahigh-speed optical transmultiplexer using a time lens[J]. Optics Express, 2011, 19(15): 14051–14059.
- [9] MULVAD H C H, PALUSHANI E, HU H, et al. Ultra-high-speed optical serial-to-parallel data conversion by time-domain optical Fourier transformation in a silicon nanowire[J]. Optics Express, 2011, 19(26): 825–835.
- [10] PALUSHANI E, MULVAD H C H, GALILI M, et al. OTDM-to-WDM conversion based on time-to-frequency mapping by time-domain optical Fourier transformation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 18(2): 681–688.
- [11] HILLERKUSS D, SCHMOGROW R, SCHELLINGER T, et al. 26 Tbits/s line-rate super-channel transmission utilizing all-optical fast Fourier transform processing[J]. Nature Photonics, 2011, 5: 364–371.
- [12] KLEIN A, YARON T, PRETER E, et al. Temporal depth imaging[J]. Optica, 2017, 4(5): 502–506.
- [13] 李博. 新型时间透镜及其在超快光信号处理中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [14] 赵小翔. 基于时间透镜的时域成像技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [15] 孔德明. 超高速光传输若干关键技术与实验系统研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.

[作者简介]

郝帅威 1997年生, 博士研究生, 主要研究方向为高速光信号处理。

汪 伟 1982年生, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为空间光通信。

谢小平 1976年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间/海洋高速激光通信网络、空间激光通信和空间光交换等。

黄新宁 1986年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为超快全光信息处理。

(本文编辑: 傅 杰)