

下一代空间激光骨干网络全光处理技术*

陆红强¹, 汪 伟², 黄新宁^{✉3}, 刘建伟¹

(1 西安应用光学研究所 西安 710069

2 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

3 扬州大学物理科学与技术学院 扬州 225000)

摘要: 构建以高速激光链路为传输主体的空间激光骨干网络, 是保障空间数据高速传输、提升信息共享率与时效性、实现信息服务网络全球覆盖的重要技术手段。空间数据容量的快速增加要求网络节点处数据处理带宽与之相适应且具备一定扩展性和兼容性。由于空间激光骨干网络节点较少、数据快速传输的特点, 围绕我国下一代空间激光骨干网络节点处高带宽、低延迟的数据处理需求, 基于交叉相位调制 XPM 和四波混频 FWM 两种光学三阶非线性效应分析并讨论了骨干节点处高速激光链路的交换/组播、制式转换及中继/再生全光数据处理技术, 为我国下一代空间信息网络建设及高速激光链路的全面应用提供支撑。

关键词: 空间激光骨干网络; 三阶光学非线性效应; 全光处理

中图分类号: TN929.13 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)06-0056-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220318001

引用格式: 陆红强, 汪伟, 黄新宁, 等. 下一代空间激光骨干网络全光处理技术[J]. 遥测遥控, 2022, 43(6): 56–63.

All-optical processing techniques for next-generation laser-based space backbone-networks

LU Hongqiang¹, WANG Wei², HUANG Xinning³, LIU Jianwei¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710069, China;

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

3. College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China)

Abstract: The laser-based space backbone-networks are important technological approaches to guarantee the high-speed transmission of the space data, as well as to promote the information sharing efficiency and finally to realize the global-area-coverage of the space information service network. The increasing space data capacity requires compliant bandwidth of the adopted processing methods, and the method should also be extensible and compatible. This paper aims at the high-bandwidth and short-latency data processing requirements in the next-generation laser-based space backbone-networks, combining with the backbone-network's characteristics of simple-construction and fast-data-transmission, and proposes the all-optical processing techniques for the aforementioned networks based on the optical third-order nonlinear effects in medium with highly-nonlinear coefficient. The all-optical methods for the laser-link switching/multicasting, the format conversion and the data-relaying/regeneration are discussed and these methods can be used to support the construction of the next-generation space information networks.

Key words: Laser-based space backbone-networks; 3rd optical nonlinear effects; All-optical processing

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220318001

Citation: LU Hongqiang, WANG Wei, HUANG Xinning, et al. All-optical processing techniques for next-generation laser-based space backbone-networks[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(6): 56–63.

*基金项目: 国家自然科学基金(No. 51705121)

✉通信作者: 黄新宁(huangxinning@yzu.edu.cn)

收稿日期: 2022-03-18 收修改稿日期: 2022-10-19

引 言

空间信息网络具有链路建立快、移动性强、不受地理位置限制等特点，在航空航天、远洋航行以及导航定位、空间科学研究等国计民生和国防安全领域具有不可替代的作用^[1-3]。空间激光通信技术因其高传输速率、无需申请频段牌照等优势，是实现空间数据实时传输的重要途径，在天基骨干网、深空探测、载人航天器及深海潜器间海量数据传输方面具有巨大应用需求和发展潜力^[4-7]，近年来世界范围内已多次成功在轨演示验证^[8-12]。随着空间平台数量增加以及空间激光通信技术日渐成熟，“点对点”通信的视距要求、信道条件敏感及节点间数据资源共享不及时等问题亟待解决，基于高速激光链路构建空间激光骨干网络，既解决了“点对点”通信系统链路建立中的限制问题，又可实现“一对多”、多调制格式兼容的空间激光通信模式，极大提升了空间探测信息的共享率和时效性，是未来空间海量数据实时传输以及多元平台与网络走向融合的发展趋势，世界航天大国均部署了可覆盖全球的空间激光通信网络研发计划^[13-16]。

在各空间激光通信网络规划中，骨干激光链路的数据传输容量将达到 100 Gbps 量级^[17-19]，网络节点处的大容量数据高速处理面临新的问题。考虑到空间平台的体积、重量、功耗 SWaP (Size, Weight and Power) 资源稀缺，空间节点的主要功能为数据收集，因此，其获取的大容量数据应尽快下传至地面控管中心，而无需在空间进行过于复杂且精细的高速激光数据处理。全光信息处理技术的颗粒度虽无法精细化至比特量级，但可对光信号的幅度、相位、频率、偏振等多个参量进行处理，且具有响应时间短 (fs 量级)、处理带宽大 (Tbps 量级)、可重构可调谐^[20]等优势，非常适用于空间激光骨干网络中 100 Gbps 量级的高速激光链路处理。由于其无需“光-电”互相转换过程而使得骨干节点的载荷结构极大简化，进而降低了研制成本。

本文基于交叉相位调制 XPM (Cross-Phase Modulation) 和四波混频 FWM (Four-Wave Mixing) 两种非线性效应，分别研究了空间激光骨干网络中物理层高速数据的交换/组播、制式转换以及中继/再生等处理技术在全光域的实现方式，如图 1 所示，可为我国下一代空间全光网络及天地一体化信息网络等重大工程建设提供技术支撑。

1 三阶非线性效应

当频率不同的两束光场 ω_1 和 ω_2 注入非线性介质 (非线性系数 $\gamma \geq 7W^{-1}/Km$) 时，若其光功率达到一定阈值，可由介质的三阶极化率 $\chi^{(3)}$ 激发非线性极化强度 P_{NL} ：

$$P_{NL} = \varepsilon_0 \chi^{(3)} : EEE \quad (1)$$

式中 ε_0 为真空介电常数， E 为电场强度。若两束光不满足相位匹配条件，则 P_{NL} 将引起介质折射率的非线性改变，进而使得介质中传输的光场获得一个与电场强度有关的非线性相移 ϕ_j^{NL} ^[21]：

$$\phi_j^{NL} = n_2 (\omega_j / c) \left(|E_j|^2 + 2|E_{3-j}|^2 \right) z \quad (2)$$

式中 $j=1,2$ ， n_2 为与 $\chi^{(3)}$ 有关的非线性折射率系数， E_j 为入射光场， c 为真空光速， z 为传输方向。式

(2) 中等号右边 $|E_j|^2$ 为光场 (ω_1) 感应自身强度变化引起的相移，称为自相位调制 SPM (Self-Phase Modulation) 效应， $2|E_{3-j}|^2$ 为光场感应另一频率 (ω_2) 光场强度变化引起的非线性相移，称为 XPM 效应。可见通过 XPM 效应，频率 ω_2 处光场的强度调制信息转移至频率 ω_1 处光场的相位上，这一过程可引起光谱展宽。

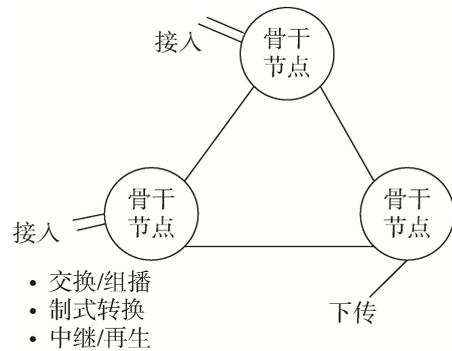


图 1 空间激光骨干网络数据处理示意图

Fig. 1 Data processing demands in the laser-based space backbone-networks

若上述两光场之间满足相位匹配条件，则在 $\chi^{(3)}$ 作用下还可以产生新频率成分-闲频光 (idler)，称为四波混频 (FWM) 效应。在 FWM 效应中产生的闲频光 E_i 与两束注入光之间的能量交互满足净能量和动量守恒：

$$\begin{aligned} E_i &= kE_1^* E_2^2 \\ \omega_i &= 2\omega_2 - \omega_1 \\ \theta_i &= 2\theta_2 - \theta_1 \end{aligned} \tag{3}$$

式中， k 为 FWM 发生的效率， $\theta_j (j=1,2,i)$ 为各光场初始相位。可见，在 FWM 过程中产生的闲频光同时携带了注入光场的强度信息和相位信息。

常用的非线性介质可选择半导体光放大器 SOA (Semiconductor Optical Amplifier)、高非线性光纤 HNLF (High Nonlinear Fiber) 或光子晶体光纤 PCF (Photonic Crystal Fiber) 等具有高非线性系数的器件。如图 2 所示，在非线性介质中，上述 XPM 效应和 FWM 效应常同时产生，在实际光信号处理过程中可根据需求进行选择。

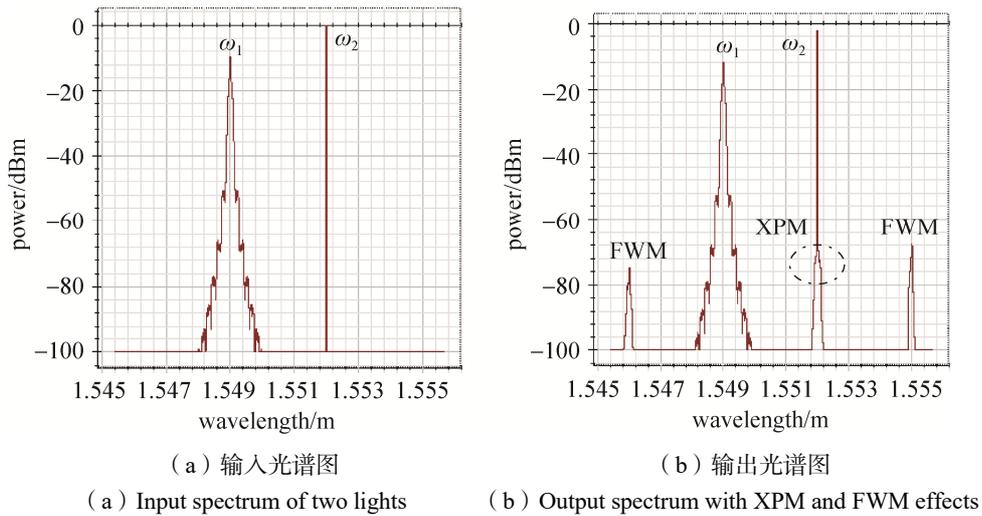


图 2 XPM 和 FWM 非线性效应仿真图

Fig. 2 Simulated diagram of XPM and FWM effects in nonlinear medium

2 全光交换/广播技术

如前所述空间激光骨干网络具有节点少、获取的大容量数据应尽快下传至地面站等特点，此类网络中的高速激光链路交换可采用基于波长地址的全光链路交换 WOCS (Wavelength-based Optical Circuit Switching) 方式实现。与基于微机电系统的 MEMS 光开关实现光链路交换相比，WOCS 具有更优的交换地址可扩展性 (MEMS 一旦器件选定则无扩展性) 和更快的响应时间 (MEMS 为 ms 量级，WOCS 为 fs 量级) [30-32]。以四节点 (不同波长区分节点地址) 激光骨干网为例，如图 3 所示，链路级交换方式可简单快速实现大容量数据交换，从而有效避免因网络阻塞引起的数据时效性降低 (如节点 3→节点 4→节点 1，在节点 3 处进行波长地址全光交换)，也可在原定信道劣化或目标节点处于视距范围外而使得激光链路难以建立时 (如节点 3→节点 2 传输路

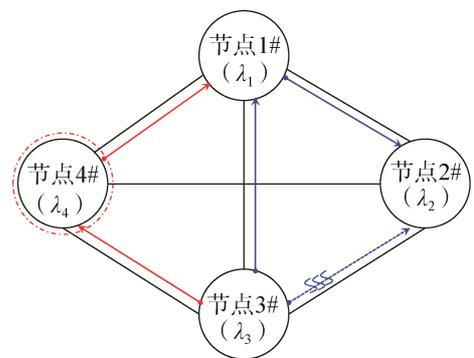


图 3 基于波长地址的全光交换示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wavelength-addressed optical switching application

径不可用)，提供备用传输路径以保障信息及时传输（选择备用路径节点 3→节点 1→节点 2），这在时效性要求较高的灾害监测、救援等应用场景中十分必要。

骨干节点处的 WOCS 处理应兼容不同空间平台激光链路在数据速率、通信制式方面的差异，故可采用对链路强度、相位信息均透明的 FWM 效应实现，以满足节点兼容性要求。同时 WOCS 的交换性能应不受接入激光链路特性（如偏振、功率、波长）影响，且覆盖足够宽的波长地址范围，因此基于 FWM 效应实现 WOCS 时可采用两束泵浦光并使其偏振态平行或正交，也可采用单个泵浦源并控制其偏振态与非线性介质成特定角度^[22]。以单泵浦光为例，如图 4 所示，控制其偏振方向 45°入射具有双折射轴的光子晶体光纤 PCF（Photonic Crystal Fiber）中，当光纤长度满足一定条件时^[23]，输出端 FWM 效率几乎不受入射信号光偏振态随机变化影响。

利用上述实验装置，在信号输入端分别采用强度调制 OOK（On-Off Keying）、二进制相移键控 BPSK（Binary Phase-Shift Keying）和正交相移键控 QPSK（Quadrature Phase-Shift Keying），并在输出端采用相应解调方案，验证了基于 FWM 效应实现 WOCS 的可行性及通信制式兼容性，如表 1 所示，结果表明这一技术方案适用于空间激光骨干网络的高速激光链路全光交换处理。

当接入数据需要同时分发给多个目标节点时，在骨干节点上可以采用全光方式实现数据组播。具体实施方法如图 5 所示，根据组播数目设定 FWM 效应中的泵浦光数量及波长，即可实现同一数据向多个波长地址节点发送。

3 全光制式转换技术

当激光链路在骨干网络中所选择的传输路径条件劣化，或受到其他因素影响使激光链路不具备全速率传输条件时，可选择降低数据速率传输，以保障链路通畅性；此外，在同样的数据速率和误码率条件下，采用相位调制（如 BPSK）的理论接收灵敏度小于强度调制（如 OOK），即相位调制信号在接收端对入射光功率的要求更低^[24]，这使得相位调制更适于长距离传输；而当两个不同制式的网络之间需要进行数据交互时，也需要进行通信制式的转换处理。如图 6 所示，上述骨干

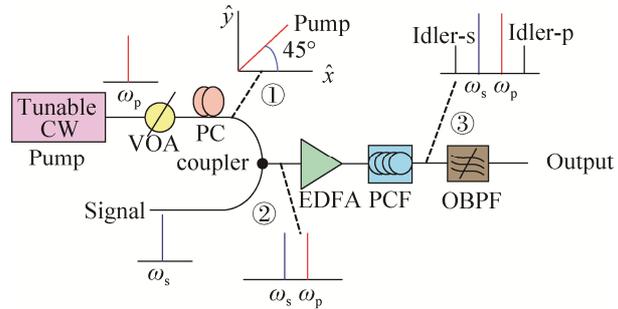


图 4 单泵浦 FWM 效应偏振无关实验设置图
Fig. 4 Experimental setup for polarization-insensitive FWM effect

表 1 波长地址全光交换实验结果
Table 1 Experimental results for the wavelength-addressed switching

通信制式	OOK	BPSK	QPSK
数据速率	5 Gbps	5 Gbps	10 Gbps
偏振敏感性	<0.6 dB		
波长地址范围	1 535.01 nm–1 564.74 nm		
变换效率及平坦性	>-15 dB@平坦度优于 1 dB		
接收灵敏度损耗（@BER=1E-7）	<0.8 dB	<0.6 dB	<0.9 dB

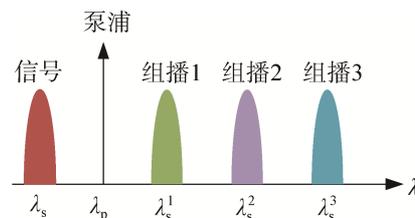


图 5 基于 FWM 效应实现全光组播
Fig. 5 All-optical multicasting based on the FWM effect

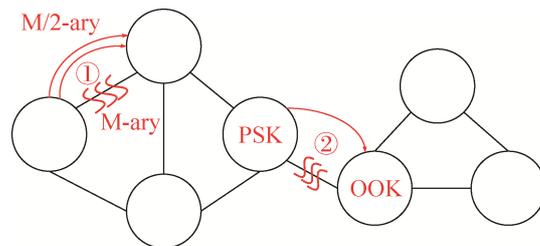


图 6 通信制式转换示意图
Fig. 6 Schematic diagram for the format conversion application

节点处的通信制式处理均可借助非线性手段在全光域实现。

前面已知当两束光同时非线性介质中传输时, 若其中一束携带强度调制信息, 则在 XPM 效应作用下, 另一束光将获得与该强度信息相关的非线性相移。当链路光功率预算不足需提升接收端灵敏度时, 可在骨干节点处将通信制式从 OOK 转换成具有更高接收灵敏度的 BPSK 调制链路。如图 7 所示, 当位于 λ_1 处强度调制的信号光与本地位于 λ_2 处的脉冲探测光 (Plused-Probe) 同时注入到高非线性光纤 (HNLF) 中时, 在 XPM 作用下探测光获得相位调制, 且相位调制信息与信号光强度信息相关^[25]:

$$\Delta\phi_2 = 2\gamma L_{\text{eff}} P_1 \quad (4)$$

其中, γ 为 HNLF 的非线性系数, L_{eff} 为有效长度。此时在 HNLF 输出端将探测光 λ_2 滤出, 并采用自差相干探测的方式进行解调, 得到的眼图如图 7 (b) 所示, 实现了通信制式从 OOK 向 BPSK 全光转换处理。

当传输路径不具备全速率传输时, 对于高阶相位调制光信号还可基于 FWM 效应实现 M 阶至 M/2 阶制式转换处理, 在骨干节点处进行降速率处理以保障链路畅通。

第一种方法是基于 FWM 过程的相位擦除效应。从式 (3) 可知 FWM 过程中新产生的闲频光与两束注入光之间具有稳定相对相位关系, 当节点处接入的信号光 λ_s 为 M 阶相位调制时, 与本地泵浦光 λ_p 在 HNLF 中产生 FWM 效应, 如图 4 所示, 取信号光一侧闲频光 λ_{i-s} , 其相位为:

$$\phi_{i-s} = 2\phi_s - \phi_p \quad (5)$$

与信号光相比, 闲频光 λ_{i-s} 为 M/2 阶相位调制, 数据速率减半。应用这一相位擦除过程, 可在骨干节点处将 QPSK 信号全光转换为 BPSK 信号, 转换后的 BPSK 信号携带的数据为 QPSK 信号 I/Q 分量中一路完整数据^[26], 且相比于背靠背直接传输的 BPSK 信号, 在同样误码率条件下, 接收灵敏度损耗小于 1 dB^[22]。这种全光制式转换系统简单, 在已知 QPSK 信号两路正交分量数据的前提下, 可以确保其中一路数据及时下传, 其缺点也很明显: 转换过程中 M 阶相位信息中有一半数据被丢弃。

若需要在全光制式转换过程中保持数据完整性, 可采用相位敏感 PS (Phase-Sensitive) FWM 效应实现。PS-FWM 要求在高非线性介质输入端, 参与 FWM 过程的信号光与本地泵浦光之间应保持稳定的相位关系, 即 $2\phi_s - \phi_{p1} - \phi_{p2} = c$, 可利用 FWM 效应的相位相关性使长距离传输的信号光与本地泵浦光之间相位锁定, 以满足 PS-FWM 过程发生条件, 如图 8 所示。采用光频梳源作为本地泵浦光, 取相邻 (或同样频率间隔) 的 4 束光作为泵浦 (泵浦 1,2,3,4), 则 4 束泵浦光之间相位锁定; 利用光处理器取其中一束 (泵浦 1) 作为泵浦源,

与信号光 S 注入到 HNLF1 中产生 FWM 效应 (pre-FWM), 产生的闲频光 S' 复制了 S 的所有信息并与泵浦 1 具有稳定相位关系 ($\phi_{s'} = 2\phi_1 - \phi_s$), 此时取泵浦 1 和闲频光 S' 与其余泵浦光 2,3,4 共同注入 HNLF2 中, 输入光之间相位关系锁定, 则在 HNLF2 中产生 PS-FWM 效应, 通过调节 S'

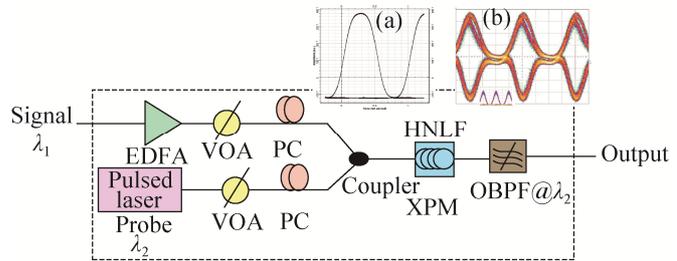


图 7 基于 XPM 效应的 OOK 至 BPSK 制式转换示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the all-optical format conversion from OOK to BPSK based on the XPM effect

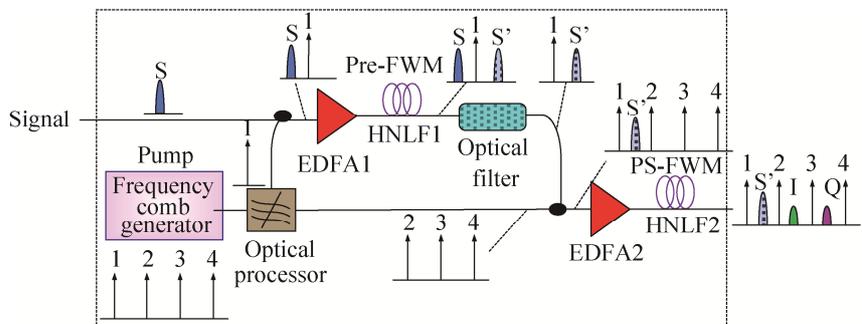


图 8 无数据丢失的 QPSK 至 BPSK 制式转换示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the format conversion from QPSK to BPSK without data-loss

的相位，新产生的闲频光将分别携带信号光的 I 分量和 Q 分量^[27]，实现了 QPSK 调制数据转换为两路 BPSK 信号。这一全光制式转换过程保障了数据完整不丢失，但系统结构较为复杂。此外，为消除 pre-FWM 过程中因传输路径不同引起的相位失配，还应考虑引入相位补偿回路以确保 PS-FWM 输入端各光束之间稳定的相位锁定关系。

4 全光中继/再生技术

高速激光链路在天基激光骨干网络中经中继节点转发时，因空间长距离传输导致光功率衰减且信号质量劣化，需要在每个中继节点进行光信号再生处理方可进一步转发，以保障数据高性能传输。对于相位调制信号，采用“光放大+滤波”的中继方式不能达到信号质量改善的目的^[28]，针对相位噪声的抑制和相位调制信号的全光再生，可采用前述 PS-FWM 效应来实现。

在 PS-FWM 过程中，当信号光和泵浦光的相对相位 $\phi_{rel} = \phi_{p1} + \phi_{p2} - \phi_s \geq 0$ 时，泵浦光能量转移至信号光处，如图 9 (a) 所示，此时信号光得到的功率增益为^[29]：

$$G = \cosh(gL) + \frac{i}{g} \left[\frac{\kappa}{2} + \gamma \eta \exp(-i\phi_{rel}) \right] \sinh(gL) \quad (6)$$

其中， g 为与泵浦光功率 P_p 相关的参量增益， L 为非线性介质长度， γ 为非线性系数， κ 为信号光和泵浦光之间的相位失配量。在这一过程中，信号光功率增益随泵浦光功率增加而增加，且相位传递函数趋于阶梯形，如图 9 (b) 和图 9 (c) 所示，若信号光为二进制相位调制（如 BPSK），则在 PS-FWM 过程中不仅获得功率增益，且相位噪声被压缩，对于同等劣化光信号，相比于直接接收，经过全光中继处理后的系统误码率提升约 4 量级（即 10^{-3} 提升至约 10^{-7} 量级），表明基于 PS-FWM 效应的全光中继处理可以有效提升相位调制激光链路的信号质量，使得相位信息得以再生^[16]。

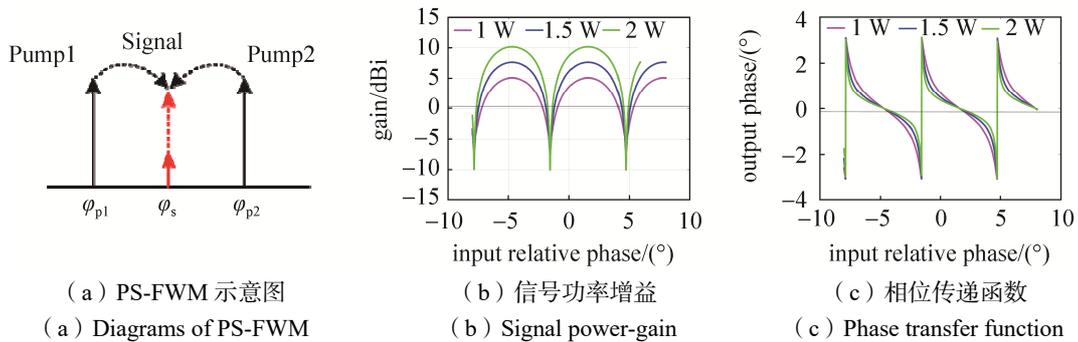


图 9 全光中继示意图
Fig. 9 Diagrams of all-optical relaying

5 结束语

随着国家战略高边疆拓展、基于“地面 5G+天基卫星”架构的 6G 技术研究推进以及商业航天的蓬勃发展，未来的空间激光通信网络将朝着超大容量、超远距离的方向发展，承担大容量数据快速传输的天基激光骨干网络应具备处理带宽大、资源需求小等特点，以保障空间高速激光数据的快速实时传输。本文针对天基激光骨干网络节点处超高速激光链路的低时延、高带宽全光数据处理需求，探究了基于三阶非线性 XPM 效应和 FWM 效应实现空间接入节点处全光交换、全光制式转换以及全光中继等“光入-光出”的数据处理技术，具有处理带宽大、系统结构简单的优势，且因为 XPM 效应与 FWM 效应可同时发生，通过合理设置系统结构可实现一套系统多种光数据处理的目的，极大降低对空间节点的体积、重量、功耗等资源的需求量，能够为我国下一代空间全光网络、天地一体化信息网络等建设提供技术支撑。

参考文献

- [1] 于全, 王敬超. 空间信息网络体系架构与关键技术[J]. 中国计算机学会通讯, 2015, 12(3): 22–26.
- [2] 李德仁, 沈欣, 龚建雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报, 2015, 40(6): 711–715, 766.
LI Deren, SHEN Xin, GONG Jianya, et al. On construction of China's space information network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 711–715, 766.
- [3] 余杰, 范承. 国外空间信息网络发展现状与趋势[J]. 网信军民融合, 2018(7): 73–76.
- [4] ROBERTS W T. Discovery deep space optical communications (DSOC) transceiver[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10096: VN5P100960V.
- [5] 姜会林, 安岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 207–217.
JIANG Huilin, AN Yan, ZHANG Yalin, et al. Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2015, 34(3): 207–217.
- [6] MARKUS K, AHMED A M, SVEN M, et al. Development of a laser communication terminal for large LEO constellations[C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical System and Applications (ICSOS) 2017, 7754111: 53–58.
- [7] 李海涛. 中国深空测控网光通信技术途径分析与发展展望[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 20–32.
LI Haitao. Technical approach analysis and development prospects of optical communication technology in China Deep Space TT&C Network[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(5): 20–32.
- [8] LUZHANSKLY E, EDWARDS B, ISRAEL D, et al. Overview and status of the laser communication relay demonstration[J]. Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII, 2016, 9739: 97390C.
- [9] MIGLIORE R, DUNCAN J, PULCINO V, et al. Outlook on EDRS-C[C]//International Conference on Space Optics 2016, 2017, 10562: 105622U.
- [10] CHISHIKI Y, YAMAKAWA S, TAKANO Y, et al. Overview of optical data relay system in JAXA[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9739: 97390D-1.
- [11] Spacenews. Japan launches JDRS-1 optical data relay satellite for military, civilian use[EB/OL]. <https://spacenews.com/japan-launches-jdrs-1-optical-data-relay-satellite-for-military-civilian-use/>.
- [12] 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.
- [13] 高铎瑞, 李天伦, 孙悦, 等. 空间激光通信最新进展与发展趋势[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 901–913.
GAO Duorui, LI Tianlun, SUN Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication[J]. Chinese Optics, 2018, 11(6): 901–913.
- [14] 江伦, 胡源, 王超, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学系统研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0506001.
JIANG Lun, HU Yuan, WANG Chao, et al. Optics system in one-point to multi-point simultaneous space laser communications[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0506001.
- [15] 央视网. 国家发改委首次明确“新基建”范围[EB/OL]. (2020-04-20)[2022-03-18]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/jyj/e/202004/20200402957398.shtml>.
- [16] 孙悦, 黄新宁, 温钰, 等. 空间激光通信网络中的全光相位再生技术[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(9): 164–172.
- [17] TOMOHIRO A. A study of the future optical data relay system; requirements, problems and solution[C]//IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2017: 199–202.
- [18] HARALD H, CARLO E, ANDREW J, et al. ESAs ScyLight Programme, Activities and status of the Highthroughput Optical Network "HydRON"[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 11180, 111800G.
- [19] DAVID J I, HARRY S. Next-generation NASA earth-orbiting relay satellites: fusing optical and microwave communications[J/OL]. [2022-03-18]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20180001852/downloads/20180001852.pdf>.
- [20] WILLNER A, FALLAHPOUR A, ALISHAHI F, et al. All-optical signal processing techniques for flexible networks[C]//Optical Fiber Communication Conference 2018, 2018.
- [21] 阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010.

- [22] HUANG X, SUH Y, DUAN T, et al. Simultaneous wavelength and format conversions based on the polarization-insensitive FWM in free-space optical communication network[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 1–10.
- [23] ASTAR W, LENIHAN A S, CARTER G M. Theoretical analysis of polarization-insensitive wavelength conversion by four-wave mixing in photonic crystal fibre[J]. Electronics Letters, 2007, 43(25): 1419-1421.
- [24] KAHN J M. Modulation and detection techniques for optical communication systems[C]//Optical Amplifiers and Their Applications/Coherent Optical Technologies and Applications, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2006), paper CThC1.
- [25] CHEN L R, WANG J J. All-optical RZ-OOK to RZ-BPSK conversion with multicasting based on XPM in highly nonlinear fiber[J]. Optics Communications, 2012, 285(16): 3459–3465.
- [26] LU G, TIPSUWANNAKUL E, MIYAZAKI T, et al. Format conversion of optical multilevel signals using FWM-based optical phase erasure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(16): 2460–2466.
- [27] FRANCESCO D R, KJELD D, LEI L, et al. QPSK-to-2×BPSK wavelength and modulation format conversion through phase-sensitive four-wave mixing in a highly nonlinear optical fiber[J]. Optics Express, 2013, 21: 28743–28750.
- [28] HUANG X, XIE X P, SONG J Z, et al. Performance comparison of all-optical amplify-and-forward relaying FSO communication systems with OOK and DPSK modulations[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 1–11.
- [29] ARMSTRONG J A, BLOEMBERGEN N, DUCUING J, et al. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric[J]. Physical Review, 1962, 127(6): 1918–1939.

[作者简介]

陆红强 1979年生，博士，研究员，主要研究方向为机载光电侦察和空间光通信载荷。

汪 伟 1982年生，博士，研究员，主要研究方向为空间光通信。

黄新宁 1986年生，博士，副教授，主要研究方向为超快全光信息处理。

刘建伟 1972年生，硕士，研究员，主要研究方向为机载激光通信。

(本文编辑：杨秀丽)