



专题：全光网技术与应用

面向全光网的矢量信号处理技术

邢真, 王宏祥, 纪越峰

(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 因其低时延、高效率的特性, 全光矢量信号处理技术在光网演进过程中具有重要意义, 因此, 对当前全光信号处理的技术背景、应用方案等进行了全面的介绍。首先对全光信号调制格式进行了梳理, 描述了各调制格式的基本特性及接收方式, 并对作为全光信号处理基础的非线性光学效应进行了分类介绍, 说明了各效应的发生条件、发生过程、带来的光学现象及常用的非线性介质。简要阐述了全光信号处理技术的优点, 并对全光信号再生、全光格式转换和全光相位量化这 3 个研究方向进行了详细介绍。最后对全光矢量信号处理技术的应用前景进行了展望。

关键词: 全光网; 矢量信号处理; 非线性光学效应

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019079

Vector signal processing techniques for all-optical networks

XING Zhen, WANG Hongxiang, JI Yuefeng

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: The all-optical vector signal processing technology is of great significance in the evolution of optical network due to its low delay and high efficiency. Therefore, a comprehensive introduction to the technical background and application scheme of the current all-optical signal processing was given. The all-optical signal modulation format was firstly introduced, and the basic characteristics and receiving modes of each modulation format were described. Furthermore, the nonlinear optical effects, which were the basis of all-optical signal processing, were classified and introduced. The occurrence conditions, occurrence process, optical phenomena and common nonlinear media were also illustrated. The advantages of all-optical signal processing technology were briefly introduced and three typical research fields of all-optical signal regeneration, all-optical format conversion and all-optical phase quantization were introduced in detail. Finally, the application prospect of future all-optical vector signal processing technology was prospected.

Key words: all-optical network, vector signal processing, nonlinear optical effect



1 引言

多元化的新兴业务驱动着光通信系统技术朝着更灵活高速的方向发展^[1]。光网络的巨大频谱资源（10 THz）、超大容量（100 Tbit/s）、超高速率（1 Tbit/s）等特点能支撑未来网络高带宽、低时延、高效能等多元化需求的理想承载方案^[2-3]。目前我国首个骨干 ROADM(reconfigurable optical add-drop multiplexer, 可重构光分插复用器) 已经实现动态联网, 迈向全光自动调度的时代^[3]。传输节点从电域交换向全光交换的改变是全光网演进的重要内容之一, 不仅降低了节点功耗、建网成本和机房占地面积, 更是从根本上突破了节点容量的电子瓶颈。

相较于传统光网络数据传输中的“光—电—光”转换模式, 完全基于光信号处理和交换的全光网络系统可有效避免电域处理带宽的限制及由光电转换带来的处理时延, 并可允许任意信号格式、比特率及通信协议的高效传输^[4]。更为重要的是, 通过可调光器件及集中式管控架构的应用, 全光网络内允许多维网络资源的灵活调度, 并以此实现光网络架构的简化、资源利用率提升以及动态业务支撑^[5-6]。

全光矢量信号处理是实现全光数据传输的重要技术, 以实现超高容量超长距离超低时延通信为目的, 同时对多样化网络应用提供灵活支撑, 目前在全光信号处理领域的研究热点主要集中在全光信号再生、全光格式转换和全光相位量化 3 个使能技术上。本文对当前全光信号处理的技术背景、应用方案等进行了综述: 首先介绍了全光信号处理技术背景, 对全光信号调制格式进行了梳理, 描述了各调制格式的基本特性及接收方式; 此外还对作为全光信号处理基础的非线性光学效应进行了分类介绍, 说明了各效应的发生条件、发生过程、带来的光学现象及常用的非线性介质。经过背景铺垫, 简要阐述了全光信号处理技术的

优点, 并从应用的角度对全光信号再生、全光格式转换和全光相位量化 3 个研究方向进行了详细的介绍。内容包括各研究方向在实际网络中的应用场景和研究意义、各领域的研究现状和对实现原理的理论说明及结果分析等。最后对本文的内容进行了总结, 并对未来全光矢量信号处理技术的应用前景进行了展望。

2 全光信号处理技术背景

2.1 全光信号的调制格式

根据信息承载的对象, 全光信号调制格式可以分为基于光强度调制的 ASK (amplitude shift keying, 幅移键控) 格式、基于光相位调制的 PSK (phase shift keying, 相移键控) 格式和基于光强度和相位二维调制的 QAM (quadrature amplitude modulation, 正交振幅调制) 格式等。离散的幅度、相位或幅度相位组合代表了不同的符号, 一个有 M 种有限状态的符号包含了 $n = \lg M$ 比特信息。例如, OOK (on-off keying, 通断键控) 格式作为光强度调制格式的一种特例, 信号光强的高低代表 1 bit 信息, 由于其调制与接收系统简单, 在光通信发展初期被广泛使用。为了提高传输性能, PAM4 (four pulse amplitude modulation, 四脉幅调制) 采用 4 个不同的光强, 因此每个符号周期表示 2 bit 信息, 实现在传输能力不变的情况下, 符号速率减半。此外, 在成本、功耗等方面的优势, 使 PAM4 格式成为了下一代数据中心中高速信号互联的有效方案, 并被广泛应用于 200 Gbit/s、400 Gbit/s 传输接口。幅度调制格式的优势在于可以使用简单低成本的直接检测方式进行接收。当前骨干传输网络正朝着向大容量、超高速率演进, 为了实现单载波 400 Gbit/s 通信, 使用更高阶的调制格式是提升波分侧传输容量的一个重要手段。QPSK (quadrature phase shift keying, 正交相移键控) 格式, 利用载波的 4 个不同相位每个符号携带 2 bit 信息, 偏振复用的 QPSK 是实现长距离单

载波 200 Gbit/s 通信的有效方案。为了进一步提高传输效率, MPSK (multiple phase shift keying, 多进制数字相位调制) 将载波的相位状态扩展至 M 种, 每个符号可以携带 $n = \lg M$ 比特信息, 降低占用带宽的同时也牺牲了一部分抗噪性能。作为一种高级调制格式, QAM 是多电平振幅键控与正交载波调制技术的结合, 其使用频率相同、相位正交的两个载波的幅度变化携带信息, 因此被称为矢量信号, 相对于单载波的调制格式, 信号有效带宽扩展一倍。偏振复用的双载波 16QAM 调制是目前 400 Gbit/s 线路的主流技术之一, 理论上容量可达到 25 Tbit/s 及 500 km 的无电中继传输距离, 实现容量优先的城域骨干网高速传输。在未来全光网的发展中, 为了进一步提升光纤容量, 可能会推广使用 32QAM 甚至 64QAM 等更高阶的调制格式。对于用相位来传递信息的 PSK 和 QAM 格式, 接收时需要载波相位进行精确估计, 目前通常使用的实现方案是锁相环, 即相干解调。相干解调机制的原理, 是将接收信号与其调制信号相乘, 使信息从高频转移到基带信号上, 用以接收。从实现方式上来说, 接收信号与本振激光一同输入混频器中, 再由两个平衡探测器分别接收信号的同相、正交分量。信号接收之后, 可以使用 DSP (digital signal processing, 数字信号处理) 进行载波、相位恢复、时钟恢复、信道失真补偿等操作, 进一步提高接收信号的质量。

2.2 非线性光学效应与介质

非线性光学效应是全光信号处理的基础, 其本质是介质对光的非线性响应。一束或几束光在介质中传播, 根据电场作用产生的电偶极子感应非线性极化的阶数, 可将非线性光学效应分为二阶非线性效应 $\chi^{(2)}$ 和三阶非线性效应 $\chi^{(3)}$ 两类。二阶非线性极化导致三波混频现象, 例如, SHG (second harmonic generation, 二次谐波产生)、SFG (sum frequency generation, 和频产生)、DFG

(difference frequency generation, 差频产生), 三阶非线性极化则与 SPM (self-phase modulation, 自相位调制)、XPM (cross-phase modulation, 交叉相位调制)、FWM (four-wave mixing, 四波混频) 有关。光波的非线性作用直接影响其各自的幅度、相位、波长和偏振态等参量, 实现全光域的信号处理功能。

下面将从全光信号处理应用的角度, 对上面提到的非线性效应做逐一介绍。

(1) SFG

输入两束光中心频率分别为 f_{pump} 的泵浦光和 f_{signal} 的信号光, 且二者关于介质的准相位匹配波长对称, 则会在输入光子成对湮灭的同时于 f_{idler} 处产生新光子, 并有 $f_{\text{idler}} = f_{\text{pump}} + f_{\text{signal}}$ 。特别地, 当 $f_{\text{pump}} = f_{\text{signal}}$ 时, 该过程被称为 SHG, 输出光束为输入光束的二次谐波。

(2) DFG

差频产生的实质与 SFG 同样都是三波混频过程, 不同点在于, 在此过程中, 每个最高频光子湮灭并伴随两个低频光子的产生。中心频率分别为 f_{pump} 、 f_{seed} 和 f_{idler} 的 3 束光波, 满足 $f_{\text{idler}} = f_{\text{pump}} - f_{\text{seed}}$ 及相应的相位匹配条件, 在二阶非线性介质中相互作用, 能量由高频信号向低频信号转移。

PPLN (periodically poled lithium niobate, 周期性极化铌酸锂) 呈非反演对称结构, 其 $\chi^{(2)}$ 不为零, 因其良好的准相位匹配特性、较高的转化效率、较大的波长转换带宽, 是一种重要的 $\chi^{(2)}$ 介质。在 PPLN 中, 通常使用级联的 SFG 和 DFG 过程实现基于二阶非线性效应的全光信号处理^[7-8], 如图 1 所示, 有级联 SFG-DFG 和级联 SHG-DFG 两种模式。

(3) SPM

SPM 是一种非线性折射现象, 即介质折射率与入射光光强相关导致的非线性效应。对光脉冲传输方程进行求解, 可以得到, 自相位调制产生与光

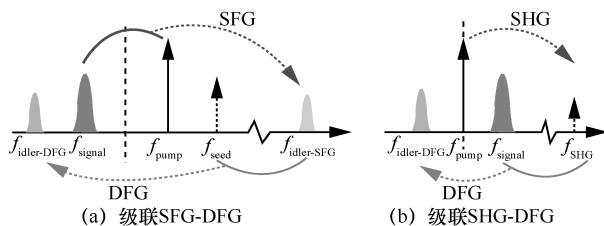


图1 基于二阶非线性效应的全光信号处理

强有关的相移，大小正比于自身光场强度、介质的非线性折射率、有效作用长度等，但脉冲形状不受影响。SPM 通常导致输入脉冲的频谱展宽，但在特殊情况下，例如在光纤的反常色散区域，SPM 可以使脉冲变窄，应用于光孤子的形成。

(4) XPM

XPM 与 SPM 类似，也是折射率与光强相关性产生的非线性相移。然而，XPM 的感应光强来自于除自身外的不同光场，可以是不同频率、不同传输方向，甚至是同一光束的两正交偏振分量。其大小正比于感应光场强度、介质非线性折射率、有效作用强度等，从数值上看，在相同光强下，XPM 产生的相移是 SPM 的两倍。

(5) FWM

FWM 是 4 个光波相互作用的三阶参量过程，由于光子的动量守恒原则，只有当相位匹配条件满足时才能有效发生。假设 4 个波长不同的光束输入三阶极化率 $\chi^{(3)}$ 不为 0 的非线性介质中，由于光场间的相互作用，能量发生转移，不同新频率的光子将产生。依据光子的动量守恒原则，生成新光子的频率、能量等特性由相互作用的光子决定，因此 4 个不同光场的排列组合可以得到相当丰富的结果项，然而每一项的有效程度取决于参与光场的相位匹配程度。在实际应用中，根据输入光场波长数目的不同，可分为简并 FWM 和非简并 FWM 两类，每种种类下，不同的输入光场情况得到不同的物理图像，因而有不同的应用场景。下面详细介绍 4 种全光信号处理中常用的 FWM 模式^[9]。输入两个泵浦光 (pump) 且信号 (signal) 与闲频光 (idler) 在同一频率处，被称为

一模式非简并 FWM，信号能得到相位敏感的增益，常被应用于信号的相位敏感放大或正交分解等，如图 2 (a) 所示。图 2 (b) 描述了仅有一个输入泵浦的简并 FWM，还被称为 MI (modulation instability, 调制不稳定性)，在有闲频光作为输入的情况下，可应用于信号的低噪放大。图 2 (c) 和图 2 (d) 描述的均为二模非简并 FWM，不同的是，在图 2 (c) 中生成的闲频光为信号的共轭，因此被称为 PC (phase conjugation, 相位共轭器)，图 2 (d) 中的闲频光完全复制了信号所携带的相位信息，被称为 BS (Bragg scattering, 布拉格散射)。

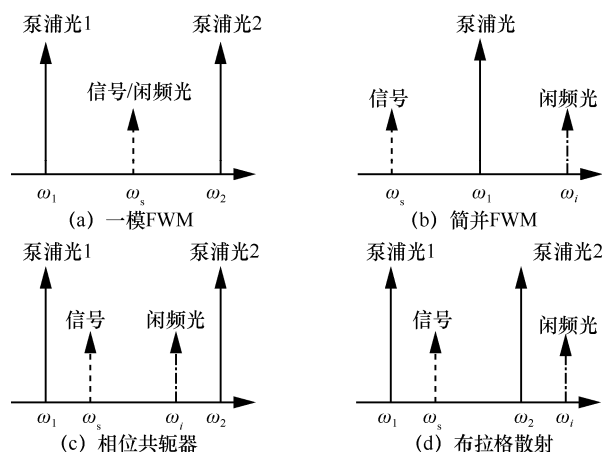


图2 四波混频

常用的 $\chi^{(3)}$ 介质有 HNLF (high nonlinear fiber, 高非线性光纤)、SOA (semiconductor optical amplifier, 半导体光放大器) 以及一些新型材料如光学微腔等。SOA 是一种有源光学器件，对输入信号的光功率要求低、非线性系数远高于 HNLF 等无源波导、体积小易于集成。但其内部载流子恢复时间过长、增益动态特性较慢等缺点制约着其在实际生活中的应用。HNLF 作为无源器件，具有可以提供低噪声、易于获得等优势，然而其非线性效应不够明显，需要几米甚至几十米的光纤才能得到良好的高次谐波，物理体积较大，不利于器件的集成。随着材料学的发展和制备工艺的进步，一些新的材料如光子晶体、硅光波导等被发现具有处理信号速率高、结构可变、集成度

高的特点,吸引了广大研究者的兴趣,目前的相关研究尚在起步阶段。

3 全光矢量信号处理应用

随着 4K/8K 视频、超高清直播等高数据传输业务的发展,云计算、人工智能等新型通信技术的应用,激增的流量需求给光传输网络再次带来了挑战,而全光矢量信号处理技术因其独特的优势在光网络的演进过程中一直备受关注。全光矢量信号处理拥有巨大的带宽资源,处理过程中无需 O-E-O (optical-electrical-optical, 光—电—光) 转换并且具有皮秒级别的响应速度,可以有效解决光网络交换节点中电信号处理受限造成的瓶颈问题^[10]。例如,利用 SOA 中的非线性偏振旋转特性实现超快 A/D (analog/digital, 模拟/数字) 转换,有效解决了电域中由于采样孔的电子抖动和比较器的模糊性带来的高速和高分辨率转换难以实现的问题^[11]。此外,部分非线性光学效应可以在物理层提供格式透明、可重构的处理功能,使交换节点更加灵活高效。参考文献[12]中,通过合理的系统设计,交换节点可以根据不同的业务需求选择其功能。利用全光方式的多播技术,将多通道的每个输入波长携带的信息流发送到多个不同的波长,不仅有效地提高了网络效率和吞吐量,还显著降低了成本和能耗^[13-14]。光域中的超快逻辑门操作可以以高传输线速率实现数字信号处理功能,从而可以通过提高性能来降低网络时延^[15]。由此可见,全光矢量信号处理技术是未来超高速超大容量超长距离光通信发展的关键之一,在本节中,将进一步讨论其在全光信号再生、全光信号格式转换和全光信号相位量化方面的应用。

3.1 全光信号再生

非线性噪声是光通信中的主要挑战之一,对 MPSK、MQAM 等高级调制格式而言,相位的随机性旋转和幅度抖动均会严重影响信号质量,给解调带来困难。传输系统中的 ASE (amplifier

spontaneous emission, 放大器自发辐射) 噪声与信号相位通过光克尔效应相互作用产生非线性相位噪声,并且由于 G-M (Gordon-Mollenauer, 高登—米勒) 效应,该噪声会随着传输距离增加呈三次方积累。因此,在高速大容量通信系统中有效的全光信号再生方案是十分有必要的。

通过光场在介质中的非线性相互作用,可以实现相位敏感的增益和衰减,对于 MPSK 格式,这种相位压缩功能可以有效消除噪声,实现信号再生。以光纤中简并 FWM 为例,通过求解泵浦光 1、泵浦光 2、信号和闲频光这 4 束光波在 HNLF 中相互作用的耦合波方程,可得到信号与闲频光的关系式^[8]:

$$A_s(z) = \mu A_s(0) + \nu A_i^*(0) \quad (1)$$

$$A_i(z) = \mu A_i(0) + \nu A_s^*(0) \quad (2)$$

在量子光学中,上述关系被称为压缩变换,其中, $A_s(0)$ 和 $A_i(0)$ 表示输入的信号和闲频光, $A_s(z)$ 和 $A_i(z)$ 是在 HNLF 中经过一段距离为 z 的传输后输出的信号和闲频光, μ 和 ν 是代表光纤本身的非线性参量,并且满足 $|\mu|^2 - |\nu|^2 = 1$ 。式(1)、式(2)表明信号得到了与相位相关的增益,通过进一步计算可得,特定相位分量得到 $\mu + \nu$ 的增益,而与之正交的分量增益为 $\mu - \nu$,正是这种增益差异,显示出了 FWM 带来的相位压缩效应。从更直观的角度解释,这种相位压缩效应也可以看作信号与闲频光之间相干叠加的结果。实际应用中,为了实现对 MPSK 信号的再生,需要将上述的相位压缩功能由二阶扩展至 M 阶。研究表明该过程可以通过信号与其 $(M-1)$ 次谐波的共轭叠加实现,其理论描述如下^[16]:

$$|A_s| \exp(j\varphi_s) = \exp(j\varphi) + \frac{1}{M-1} \exp(-j(M-1)\varphi) \quad (3)$$

其中, A_s 和 φ_s 分别为再生后 MPSK 信号的幅度和相位, φ 则为带噪声的输入信号的相位。显然,该过程一共包含了两个步骤:谐波的产生和相干



叠加,并且 FWM 的超快速响应特性使得整个过程以远高于数据调制频率的速度发生。图 3 (a) 描述了 M 阶相位压缩器的原理框图,包括 PIA (phase insensitive amplifier, 相位不敏感放大器) 和 PSA (phase sensitive amplifier, 相位敏感放大器) 两个主要模块,分别实现了谐波产生和相干叠加的功能。带噪声的信号与泵浦光输入 PIA 后,在泵浦光的激励下发生级联 FWM,产生信号的一系列高次谐波。值得一提的是,对于 MPSK 调制格式,信号的 M 次谐波不携带数

据。因此,对 M 次谐波使用注入锁定或其他窄带放大装置进行放大后,可与 PIA 模块的泵浦一起作为泵浦输入 PSA 模块,一同输入的还有滤出的信号及其 $(M-1)$ 次谐波。随后,在双泵浦激励下发生非简并 FWM,生成 $(M-1)$ 次谐波的共轭,并在信号频率处与之相干叠加,实现如式(3)描述的 M 阶相位压缩功能,对 MPSK 信号再生。图 3 (b)~图 3 (d) 是利用上述系统实现全相位信号的 M 阶量化效果图。其中,图 3 (b) 展示了四阶量化时的幅度和相位响应,图 3 (c)

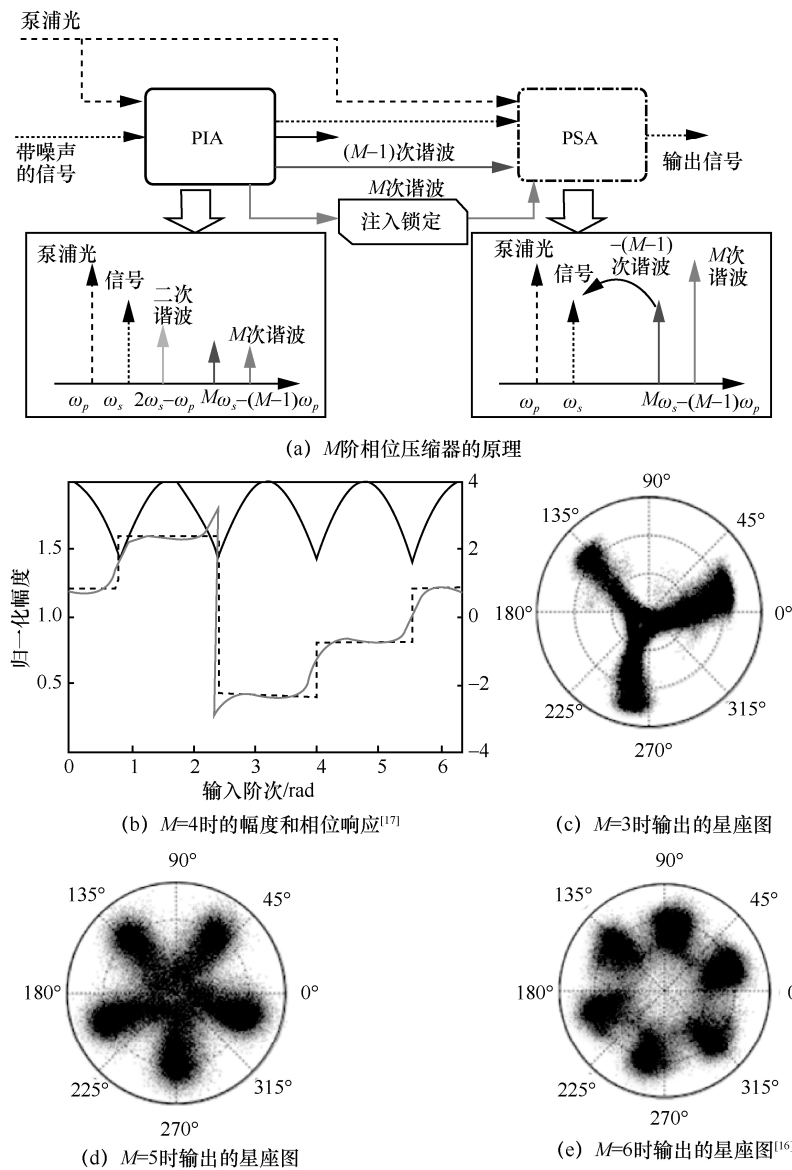


图 3 M 阶相位压缩的原理及量化效果

~图 3 (e) 则显示了全相位信号经过三阶、五阶和六阶量化后的星座图。

原则上,非线性效应不仅具有压缩相位的功能,也可以压缩信号幅度,例如,利用饱和 FWM 的增益平坦区可以去除幅度噪声,并且通过控制光波功率比等参量能够有效地抑制幅度噪声向相位噪声的转化^[18]。此外,通过改变谐波的选取,对式 (3) 进行变形如下,实现信号的幅度相位二维再生:

$$|A_s| \exp(j\varphi_s) = \exp(j\varphi) + \frac{1}{M-1} \exp(-j(M-1)\varphi) + \frac{1}{M+1} \exp(j(M+1)\varphi) \quad (4)$$

式 (4) 的前两项与式 (3) 完全一致,对信号进行相位再生,值得一提的是,此时的相位压缩功能在一定程度上带来了相位向幅度噪声的转化,使信号幅度劣化,这对于幅度同样携带信息

的 MQAM 信号是非常不利的。因此,通过引入式 (4) 中最后一项,叠加 $(M+1)$ 次谐波,将有效抑制信号幅度的劣化,实现信号的幅相再生。参考文献[19]提出了一种两级级联装置,分别对矩形 8QAM 信号的两个幅度等级进行幅相二维再生,原理框图如图 4 (a) 所示,其中, S 代表信号, S^* 为其共轭信号, P_1 、 P_2 、 P_3 表示 3 束泵浦光, H_n ($n=1,2,3,4$) 则分别表示生成的第 n 次谐波。在步骤 1 中,泵浦光 1、泵浦光 2 与信号分别进行非线性作用,生成 5 次谐波并与携带噪声的信号叠加,实现低幅度等级的幅度相位再生,此时高幅度等级的相位有劣化。随后,将步骤一输出的信号与泵浦光 2、泵浦光 3 一同输入 HNLFF,通过双泵浦光非简并 FWM 实现信号与共轭三次谐波的叠加,接着利用饱和最终完成高幅度等级的幅相再生。图 4 (c)、图 4 (d) 分别显示了带有噪声的 8QAM 信号分别经过两个步骤后的星座图,通过对比可以明显看出信号噪声

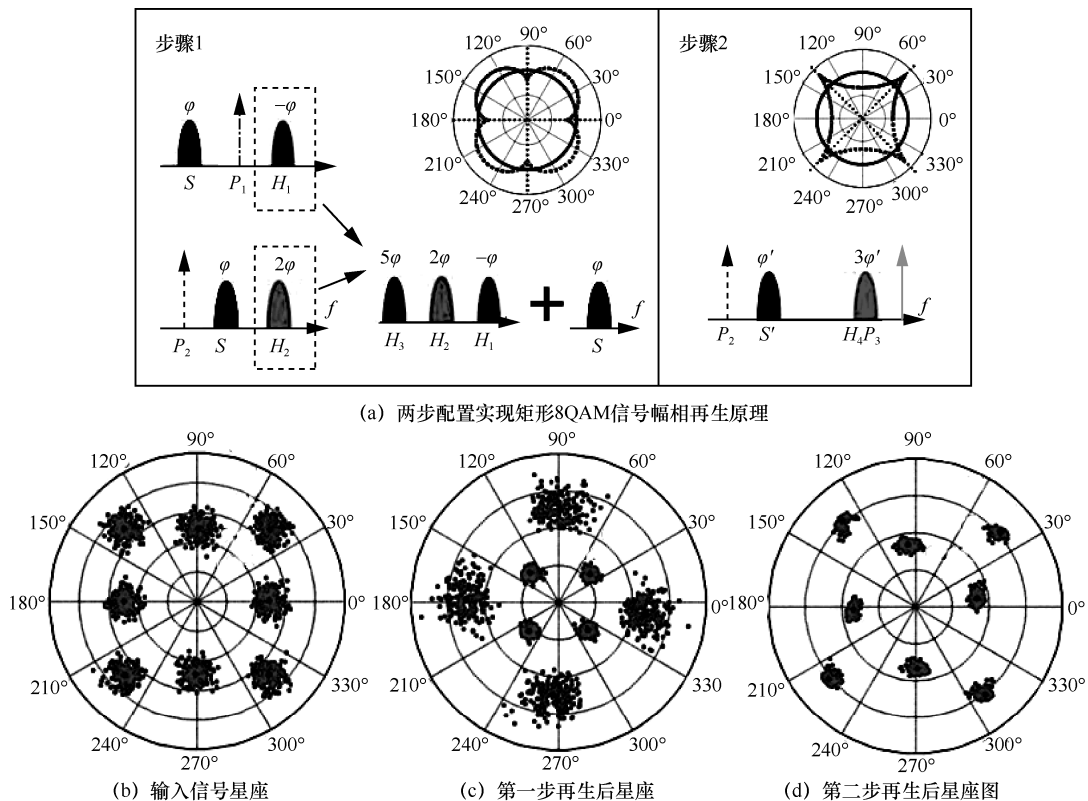


图 4 矩形 8QAM 信号二维幅相再生的原理及效果



在很大程度上被消除。除了级联型结构，也可以借助马赫—曾德尔 (Mach-Zehnder) 干涉仪的双臂结构，实现谐波的叠加^[20]。

若要全光再生技术对多通道的 WDM (wavelength division multiplexing, 波分复用) 系统兼容, 首要考虑的除了实现多通道信号同时再生功能, 还有全光再生器的强非线性可能带来的不同波长信道间的干扰。面对这一挑战, 参考文献[21]提出了非线性作用过程与再生过程相独立的多波长再生方案, 将四路 QPSK 信号分离后分别通过非线性作用生成负三次谐波, 以其中第 1 路和第 3 路两路为例过程如图 5 (a) 所示, 其中 ν_p 代表泵浦光, ν_i ($i=1,3$) 表明第 i 路信号及其谐波, $-\nu$ 代表信号的共轭, 2ν 则是信号的二次谐波, 不同波长光的相位在图 5 (a) 中均有标明。随后利用 OC (optical combiner, 光耦合器) 同时实现四路谐波与信号相干叠加。与普通器相比, 多通道信号的同时再生由 OC 完成, 没有泵浦光等额外光场的参与, 有效避免了非线性效应造成的多通道信号间串扰。图 5 (b)、图 5 (c) 通过输入信号与输出信号的星座图对比, 显示了在不同噪声水平下该系统的再生效果。

参考文献[22]则从另一个角度, 通过使用共轭泵浦光和公共泵浦光减少参与非线性效应的光波数目, 以减少在相干叠加期间非线性相互作用引起的串扰。此外, 为了避免频率重叠, 泵浦光和信号之间的频率间隔被设置为非整数倍。将四通道 QPSK 信号分为两组分别进行再生, 图 6 (a) ~ 图 6 (c) 是以其中一组信号为例的再生过程频谱示意图, 两路信号为一组, S_i ($i=1,2$) 代表第 i 路信号, I_i 为闲频光, P 则代表泵浦光, S_{i-1} 代表信号的共轭。信号与泵浦光输入非线性介质经过 PIA 生成谐波如图 6 (b) 所示, 与之前不同的是, 此时并非选取三次谐波而是负二次谐波及共轭波, 随后再次输入非线性介质, 通过简并 FWM 过程完成信号与负三次谐波的叠加。

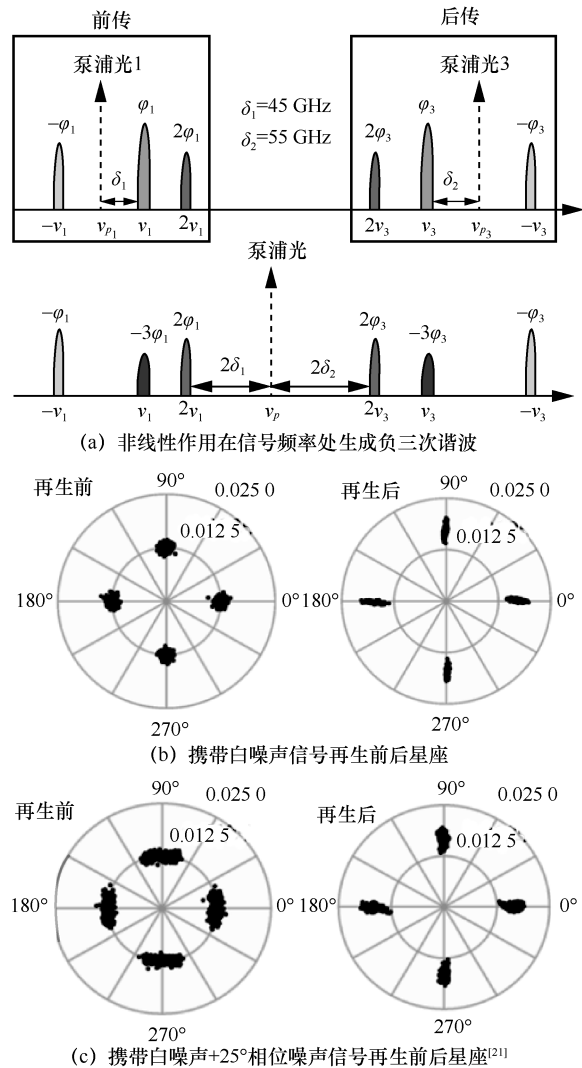


图 5 以两路为例的 QPSK 信号再生原理及不同噪声下信号再生效果对比

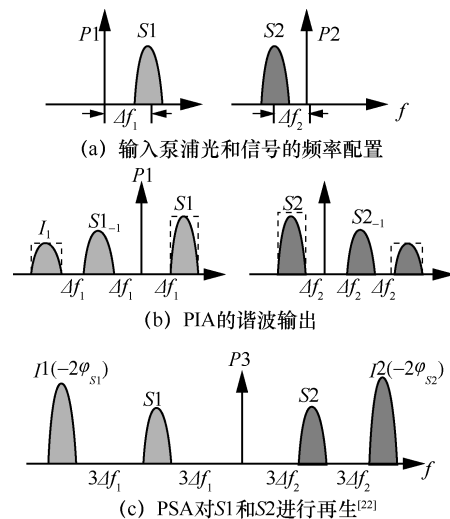


图 6 再生过程频谱示意图

3.2 全光信号格式转换

全光网是一个异构型网络, 主要由核心网、城域网、接入网 3 层组成, 各层面面向的应用不同, 因此其属性也不同, 该属性包括信号调制格式等。一个灵活的网络要能够管理异构信道, 实现各子网之间的互通互联。如上文所述, 非线性光学效应可以避免 O-E-O 转换, 给交换节点提供格式转换能力, 使其成为一个光学网关, 连接异构信道。全光格式转换可以根据其应用场景分为: 一路对一路的格式转换、多路对一路的信号聚合、一路对多路的信号解聚合。在本节中, 笔者将按照上述分类, 介绍全光格式转换在灵活光网络中的应用。

3.2.1 格式转换

一路对一路的信号格式转换能力在发送端和接收端可以使信号发送器和接收器更加灵活, 在

不同子网之间则可以交换节点作为“翻译”的角色, 实现异构网络的兼容。理想情况下, 信号格式转换不仅要保证信息的完备性, 即没有信息的丢失, 还要合理利用带宽资源, 不产生冗余信息造成资源的浪费。参考文献[23]提出了 QPSK 向 BPSK 格式转换的方案, 实现原理如图 7 (a) 和图 7 (b) 所示。转换过程经两步完成: 利用简并 FWM 将 QPSK 信号正交分解为 I/Q 两路 BPSK 信号; 将 I/Q 两路经过串/并变换合成为一路 BPSK 信号。在串/并变换过程中, 需要通过时钟恢复设备来确保输入信号和时钟信号之间的同步以避免引入码间串扰, 此外, 还需要通过校准光路并采用反馈设备来防止 BPSK 的符号错位, 确保两个并行 BPSK 在合并之前的时延是相同的, 避免破坏信息的完整性。由图 7 (c) 可得, 信号经格式转换后 EVM (error vector magnitude, 误差矢量幅

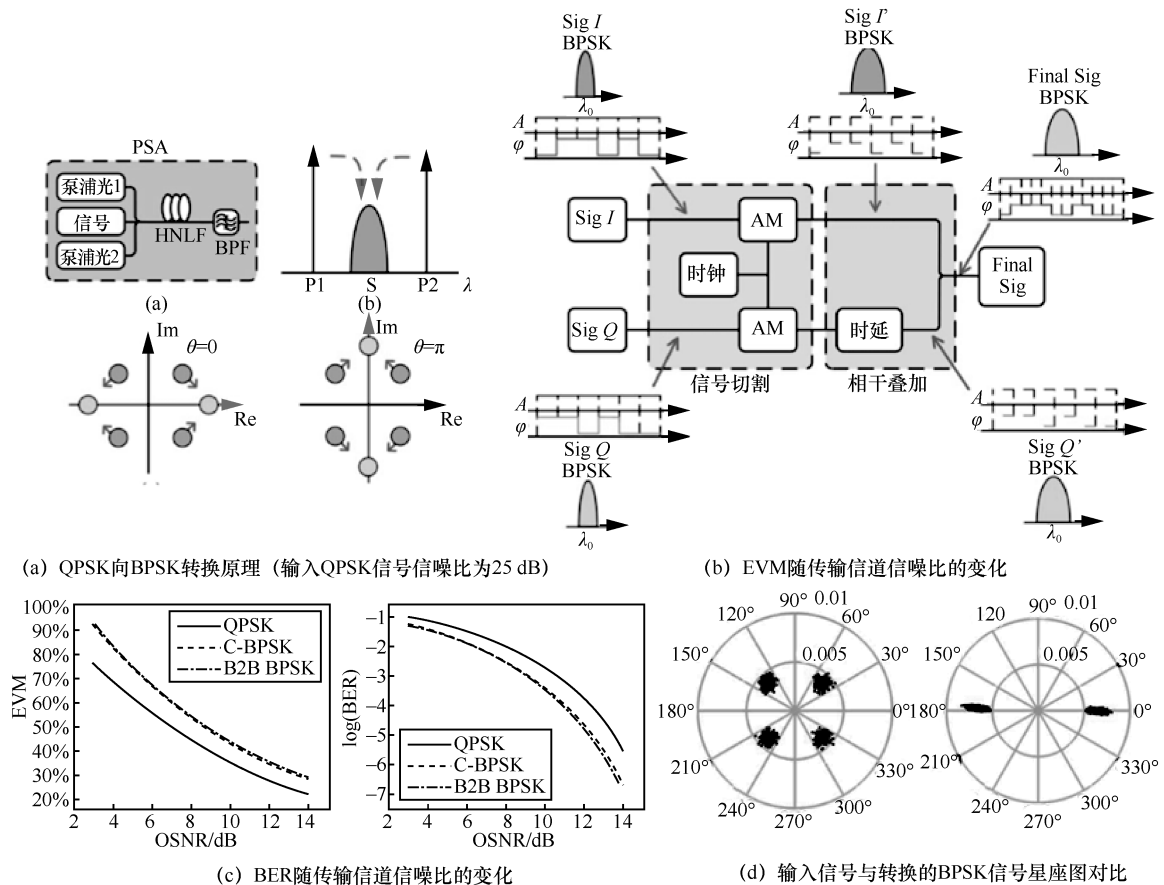
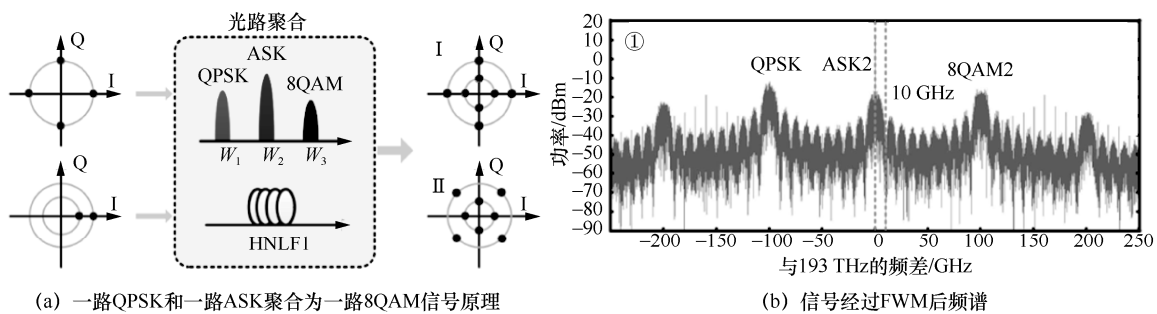


图7 QPSK 向 BPSK 格式转换原理、EVM 和 BER 随信噪比的变化及转换前后星座图对比

图8 QPSK 和 ASK 向 8QAM 信号聚合原理及输出频谱图^[24]

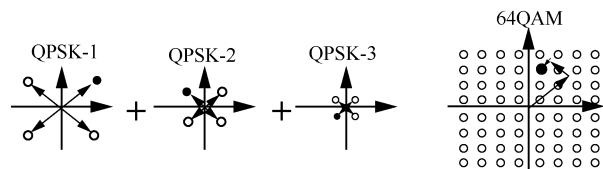
度)及 BER (bit error rate, 误比特率) 性能均有所提升, 并且在输入信号质量较高的情况下 (信噪比为 25 dB), 转换信号几乎与背靠背信号达到同一水平。其原因如图 7 (d) 所示, FWM 过程可以有效地抑制输入信号的相位噪声, 且其几乎完全抵消了相干加法过程中产生的噪声。

3.2.2 信号聚合

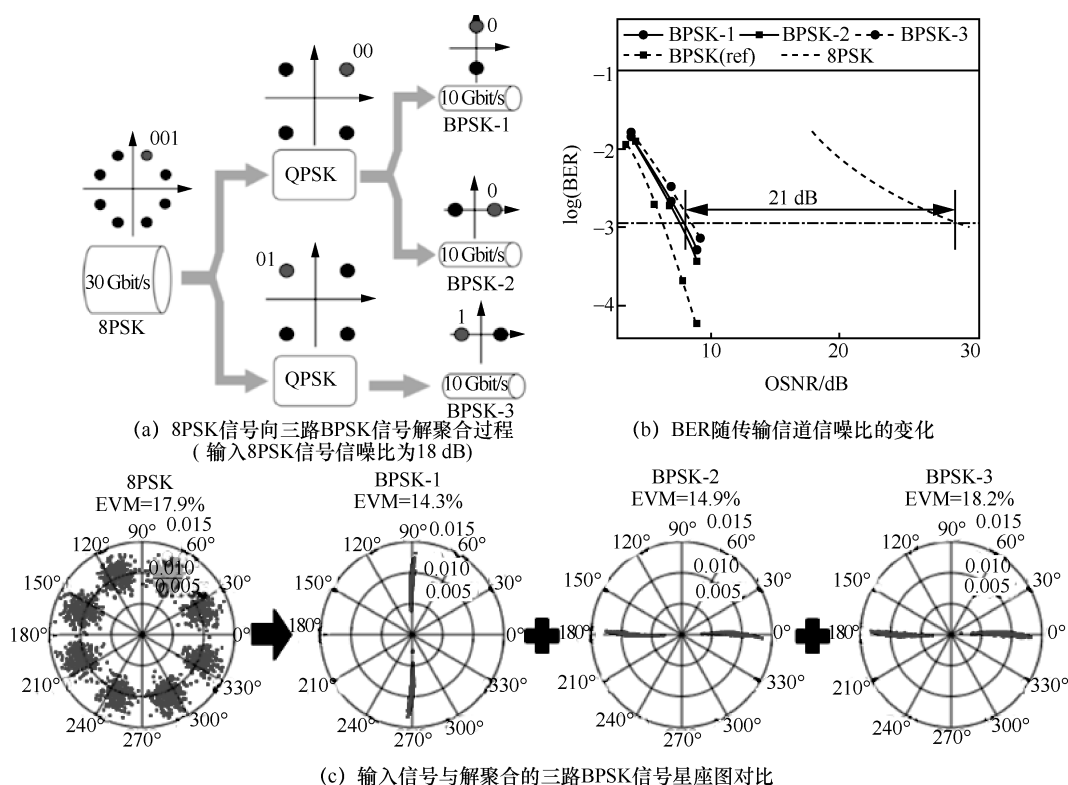
在一些场景中, 期望将多个较低数据速率调制格式聚合在一起成为更高阶的调制格式, 提高网络中光纤资源的有效利用率。例如, 参考文献[24]将低速光路中的 QPSK 和 ASK 信号聚合成一路高速 8QAM 信号以利于长途传输。如图 8(a)、图 8 (b) 所示频率为 W_1 的 QPSK 和频率为 W_2 的 ASK 信号在光纤中发生二模简并 FWM, 能量转移至 W_3 处并聚合为 8QAM 信号, 值得一提的是, 生成的 8QAM 信号有 I、II 两种形式, 并且 I 和 II 的差异因 XPM 产生的相位差形成, 由 ASK 信号两个幅度等级的比值决定。利用全光的方式, 还可以处理更复杂的调制格式, 例如 64QAM 的聚合。通过使用向量加法的概念聚合 3 个 QPSK 信号, 如图 9 所示, QPSK 信号的每个星座点可以被认为具有一定幅度和相位的 4 个可能矢量之一, 因此将 3 个独立的 QPSK 信号组合在一起恰好有 $4^3=64$ 种不同的组合可以创建 64QAM 的星座^[7]。利用 PPLN 中的 SFG-DFG 过程, 实现了上述的矢量叠加。

3.2.3 信号解聚合

信号解聚合是与信号聚合相反的过程, 在某

图9 三路 QPSK 信号矢量叠加为一路 64QAM 信号^[7]

些场景下, 需要将较高阶调制格式分解为较低阶调制格式。例如, 高阶调制格式具有更高的频谱效率, 适合在核心网络中做长途传输, 然而, 在接入网中可能仅需要较低阶的调制格式利于资源分配及用户的接收。参考文献[25]提出了一种用于一路 8PSK 信号到三路 BPSK 信号的全光解聚的方案, 该方案可以看作前面介绍的向量加法聚合信号的逆过程。8PSK 信号向三路 BPSK 信号解聚合过程如图 10 (a) 所示, 该方案共有 3 个步骤: 通过四级相位压缩将 8PSK 转换为 QPSK; 将 QPSK 信号解聚合为两路 BPSK 信号; 提取 8PSK 信号的二次谐波, 并通过相位压缩将其转换为第三路 BPSK 信号。用浅色圆圈对其中一位信息进行标记, 表明解聚合过程中的信息流向。与前面介绍的格式转换类似, 全光方法对信号解聚同样带来了抗噪声性能的提升。BER 随传输信道信噪比的变化如图 10(b) 所示, 达到误码率门限值时, BPSK 信号所需信噪比相比 8PSK 信号低 21 dB, 意味着相同条件下 BPSK 信号能传输更远的距离, 这要归功于相位压缩的影响 (如图 10 (c) 所示) 以及 BPSK 格式本身相比与 8PSK 对 BER 计算的较大相位噪声容限。

图10 8PSK信号向三路BPSK信号解聚合原理及信号BER与信噪比的关系及星座图对比^[25]

全光正交解复用是将高级调制格式信号正交分解到I、Q两路上去的过程,也是信号解聚合的一种特殊情况。前面提到,高级调制格式由于相位携带信息,需要相干接收等较为复杂的装置进行接收,若是提取其两路分量并转化为幅度调制格式,则可以用光电探测器直接接收,提高用户接收效率。参考文献[26]提出了一种光学矢量正交解复用器方案,用于将输入的MQAM信号解聚合为两个PAM信号,装置结构如图11(a)所示,是一个以SOA为反应介质的环形结构。输入信号与泵浦光在顺时针和逆时针两个传播方向分别进行非线性作用,利用简并FWM的相位挤压效果,在耦合器的出口同时获得输入信号的I路和Q路分量,过程如图11(c)所示。图11(b)分别描述了经过FWM过程后I、Q两路的相位和幅度响应,对于I路同相分量得到增益,正交分量被压缩,对于Q路则与之相反。将信噪比为25 dB的64QAM信号输入系统,经过上述过程后,如

图11(d)所示,被正交分解为两路8PAM信号,且相位噪声得到了一定程度的压缩。根据图11(e)可以看出,对于输入该64QAM信号,其解复用的8PAM信号在BER门限处得到了8.2 dB的信噪比提升,并且两路8PAM拥有几乎相同的BER曲线。

对于非矩形的MPSK格式,也可以进行类似的正交分解过程,但解聚合后可能存在信息的冗余^[27]。此外,对灵活光网络而言,聚合与解聚合过程可以组合使用,根据业务需求、网络环境的不同改变信号调制格式,实现资源灵活分配。例如,为了提高传输效率将两路信号聚合成一路,进行长距离传输后再将信号恢复为两路^[24]。

3.3 全光信号相位量化

量化器在光信号模数转换领域的具有重要地位,量化精度是影响结果的关键因素,从理论上来说对信号的精确量化似乎难以达到,因为它需要无限多个傅里叶分量合成,但相位量化使问题

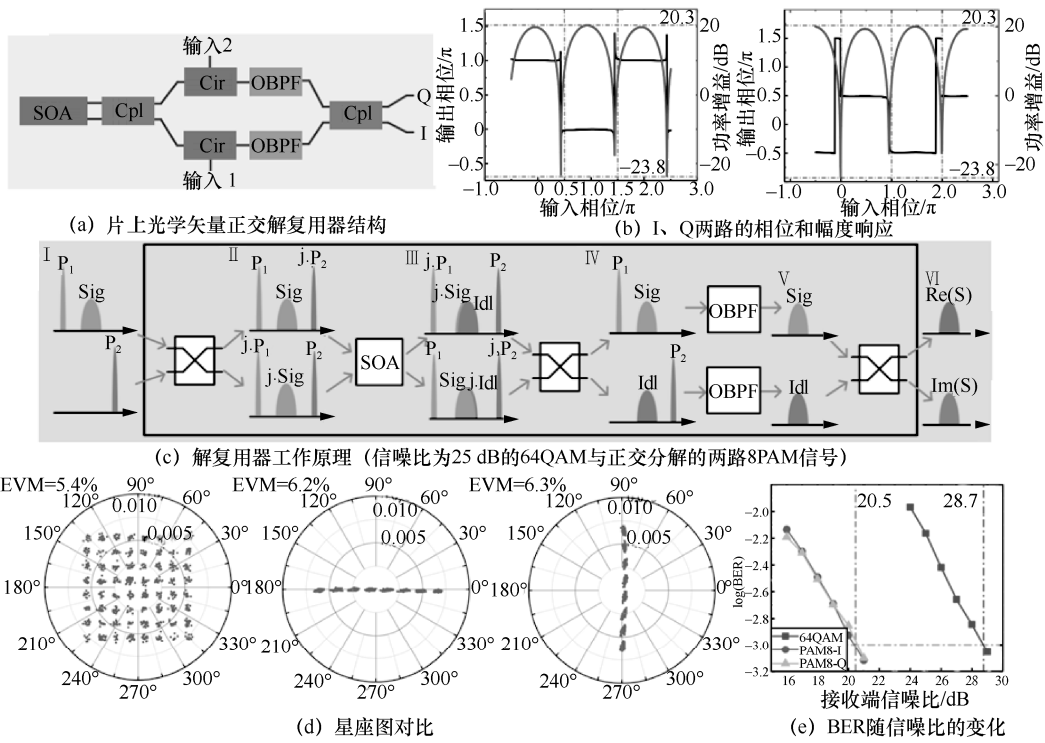


图 11 片上正交解复用器的结构及原理, 正交两路的相位、幅度响应, 输入输出星座图对比及信号 BER 随信噪比的变化^[26]

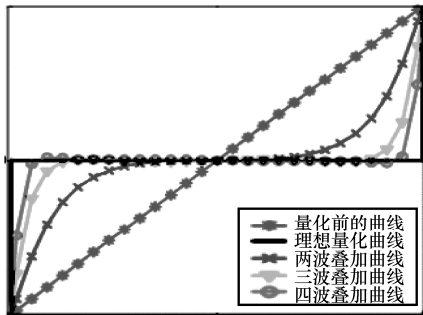
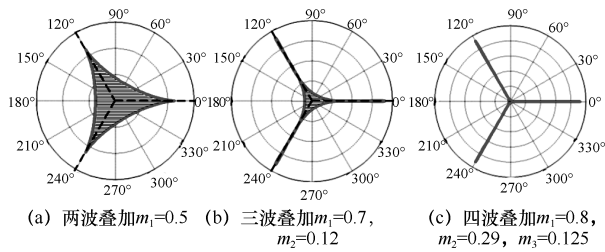
变得简单一些, 因为相位仅在 0 和 2π 的有限区间内变化。全光相位量化与相位再生原理类似, 均利用谐波叠加产生的相位压缩效应, 然而, 仅使用式 (3) 和式 (4) 所描述的原理对量化器来说是不够的。首先, 对于二阶以上的信号, 其量化图样远达不到精度要求。其次, 对于高级调制格式, 其 $(M-1)$ 或 $(M+1)$ 次谐波在实际中难以获得, 此外, 传统量化方案所带来的相位噪声向幅度噪声的转换会给信号本身带来影响。因此, 使用全光方式进行相位量化时, 需要对叠加谐波的选择、谐波幅度比等参量进行调整。为了克服上述问题, 参考文献[28]提出了一种基于多波干涉的高精度全光多级相量化方案, 对于 N 阶相位量化:

$$|A_{\text{out}}| \exp(j\varphi_{\text{out}}) = \exp(j\varphi) + m_1 \exp[-j(N-1)\varphi] + m_2 \exp[j(N+1)\varphi] + m_3 \exp[-j(2N-1)\varphi] + \dots + m_n \exp\{(-1)^n j \lceil n/2 \rceil N + (-1)^n \varphi\} \quad (5)$$

其中, A_{out} 和 φ_{out} 分别为量化信号的幅度和相

位, φ 则为量化前相位, $\lceil \cdot \rceil$ 符号代表向上取整运算。式 (5) 中的每一项代表一个谐波的相干叠加, 参与干涉的谐波数目越多, 量化精度越高, 因此可以根据实际要求, 灵活指定方案。以三阶相位量化为例, 图 12 (a) ~图 12 (c) 分别模拟了对全相位信号使用两波干涉、三波干涉和四波干涉的相位压缩情况, 可以明显看出, 越多的谐波进行叠加阴影区域面积越小, 量化精度越高。从图 12 (d) 的相位响应也可以得到, 四波叠加的曲线与理想量化曲线最为接近。

除了叠加谐波的数目, 信号与叠加谐波之间的幅度比值 m 也是影响量化精度的原因之一, 参考文献[29]的研究则通过计算量化信号相位的一阶绝对中心矩来评估相位量化的性能, 并给出了全相位信号的 M 阶光学相位量化的 m 值解析解的详细推导。前面提到, 由于当 M 较大时难以产生 $(M-1)$ 个相位谐波, 传统方法对高阶量化的适用性较弱。另外, 在实际的相位量化系统中, 通过非线性效应产生谐波并与信号进行叠加, 其



(d) 理想量化和两波、三波、四波干涉的相位响应
图 12 三阶相位量化图及相位响应^[28]

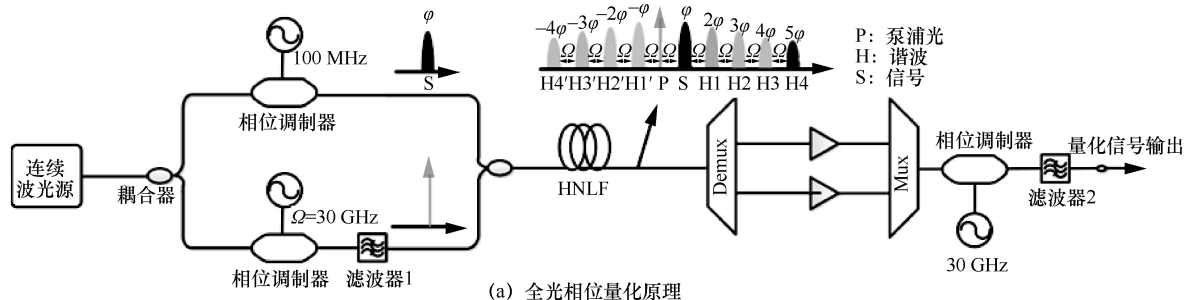
幅度比不容易控制。为了克服上述问题,参考文献[30]提出了一种新的全光相位量化方案,它通过同一非线性过程产生的两个低阶谐波的干涉实现了 M 阶量化,原理如下:

$$|A_{\text{out}}|e^{j\varphi} = \begin{cases} e^{-j\varphi(M/2-1)} + m_1 e^{j\varphi(M/2+1)}, & M=4n \\ e^{-j\varphi(M/2-2)} + m_{11} e^{j\varphi(M/2+2)}, & M=4n+2 \\ e^{-j\varphi(M-1)/2} + m_2 e^{j\varphi(M+1)/2}, & M=2n+1 \end{cases} \quad (6)$$

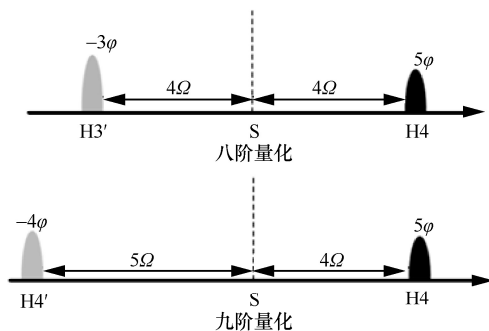
其中, A_{out} 和 φ_{out} 分别为量化信号的幅度和相位, φ 则为量化前相位, $M > 2$, $n=1,2,3,\dots$ 。并且通过使用相位调制器进行频率搬移,可以直接调整两个谐波之间的幅度比。以信号的八阶和九阶相位量化为例,图 13(a) 为量化器的结构,泵浦光与信号输入 HNLF 中进行非线性光学作用生成高次谐波,根据量化的阶数选择需要的谐波,通过相位调制器将谐波搬移至信号频率处并进行相干叠加,对于八阶相位量化和九阶相位量化,选择的谐波配置如图 13(b) 所示。通过图 13(c) 的星座图可以直观地看出信号量化效果。

4 结束语

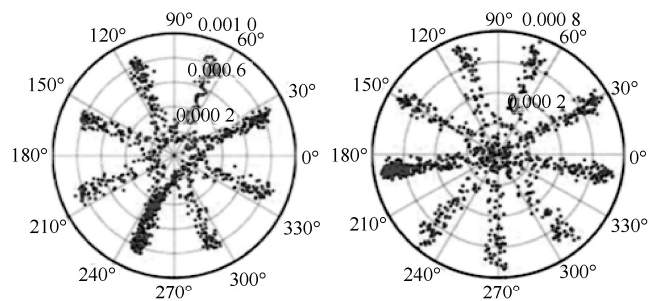
对网络容量提升和功能多样化的持续需求给当前的光网络带来了巨大的挑战,全光矢量信号



(a) 全光相位量化原理



(b) 八阶和九阶相位量化频率配置



(c) 对全相位信号的八阶量化和九阶量化星座图

图 13 全光相位量化原理框图、八阶和九阶量化的频率配置及量化星座图^[30]



处理是实现未来全光数据传输的重要技术, 以实现超高容量、超长距离、超低时延通信为目的, 同时对多样化网络应用提供灵活支撑。在本文中, 首先介绍了全光信号处理技术背景, 对全光信号调制格式进行了梳理, 并对基本非线性光学效应和常见的非线性介质进行了分类介绍。在应用方面, 介绍了全光信号再生技术对信号的相位、幅度进行二维再生的理论基础, 并举例说明了再生系统的实现方式。对于全光格式转换, 分析了一路对一路信号格式转换的意义, 解释了光学聚合和解聚概念, 以复用或解复用不同的调制格式。此外, 阐述了全光相位量化对量化精度的需求, 并对当前的量化方案进行了介绍。

总体说来, 全光矢量信号处理技术有着能够帮助未来全光网实现更灵活高效、超大容量、超长距离传输的潜力。然而, 在实际应用中仍面临一些挑战, 例如: 例如非线性过程和高功率放大引起的副作用, 带来一些不需要的串扰项; 受限干一些非线性介质的物理体积, 使系统体积过大不利于集成; 以及系统本身可能会导致一些 OSNR 的下降等问题。这些都需要全光矢量信号处理技术朝着更加可控、更易集成、更趋完善等方向进行进一步研究。

参考文献:

- [1] 崔秀国, 刘翔, 操时宜, 等. 光纤通信系统技术的发展、挑战与机遇[J]. 电信科学, 2016, 32(5): 34-43.
CUI X G, LIU X, CAO S Y, et al. Development, challenge and opportunity of optical fiber communication system technologies[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 34-43.
- [2] HANTORO G D, WIBISONO G. GPON performance analysis for 5G backhaul solutions[C]//TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Conference, Oct 28-31, 2018, Jeju Island, Korea. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1544-1547.
- [3] RAZA M R, FIORANI M, ROSTAMI A, et al. Dynamic slicing approach for multi-tenant 5G transport networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(1): A77-A90.
- [4] JI Y, ZHANG J, ZHAO Y, et al. Prospects and research issues in multi-dimensional all optical networks[J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(10): 101301.
- [5] JI Y, ZHANG J, WANG X, et al. Towards converged, collaborative and co-automatic (3C) optical networks[J]. Science China Information Sciences, 2018, 61(12): 121301.
- [6] WILLNER A E, FALLAHPOUR A, ALISHAHI F, et al. All-optical signal processing techniques for flexible networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018.
- [7] FALLAHPOUR A, ZIYADI M, KORDTS A, et al. Experimental generation of a 64-QAM by optically aggregating three independent QPSK channels using nonlinear wave mixing of multiple Kerr comb lines[C]//CLEO: Applications and Technology, May 14-19, 2017, San Jose, USA. Washington DC: OSA Publishing, 2017: JTh2A. 59.
- [8] FALLAHPOUR A, ZIYADI M, MOHAJERIN-ARIAEI A, et al. Experimental demonstration of tunable optical de-aggregation of each of multiple wavelength 16-QAM channels into two 4-PAM channels[C]//2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, USA. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [9] MCKINSTRIE C J, RADIC S. Phase-sensitive amplification in a fiber[J]. Optics express, 2004, 12(20): 4973-4979.
- [10] WILLNER A E, KHALEGHI S, CHITGARHA M R, et al. All-optical signal processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(4): 660-680.
- [11] WEN H, WANG H, JI Y. All-optical quantization and coding scheme for ultrafast analog-to-digital conversion exploiting polarization switches based on nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers[J]. Optics Communications, 2012, 285(18): 3877-3885.
- [12] CUI J, WANG H, LU G W, et al. Reconfigurable optical network intermediate node with full-quadrature regeneration and format conversion capacity[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(20): 4691-4700.
- [13] QIN J, LU G W, SAKAMOTO T, et al. Simultaneous multi-channel wavelength multicasting and XOR logic gate multicasting for three DPSK signals based on four-wave mixing in quantum-dot semiconductor optical amplifier[J]. Optics Express, 2014, 22(24): 29413-29423.
- [14] QIN J, JI Y, WANG H, et al. Multichannel wavelength multicasting for two QPSK signals based on FWM in SOA[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(1): 010601-010601.
- [15] QIN J, WANG H, WANG D, et al. QPSK wavelength multicasting based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(11): 110601.
- [16] KAKANDE J, SLAVÍK R, PARMIGIANI F, et al. Multilevel quantization of optical phase in a novel coherent parametric mixer architecture[J]. Nature Photonics, 2011, 5(12): 748.
- [17] BOGRIS A, PIKASIS E. Enhanced multi-level phase quantizer for the optical processing of M-PSK signals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(10): 2571-2577.

- [18] BOTTRILL K R H, HESKETH G, PARMIGIANI F, et al. Optimisation of amplitude limiters for phase preservation based on the exact solution to degenerate four-wave mixing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2774-2787.
- [19] WANG H, LI G, JI Y. Phase and amplitude regeneration of a rectangular 8-QAM in a phase-sensitive amplifier with low-order harmonics[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 506-509.
- [20] WANG H, LI F, JI Y. All-optical simultaneous phase and amplitude regenerator based on a modified Mach-Zehnder interferometric phase sensitive amplifier[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(2): 026101.
- [21] WANG H, LUO T, JI Y. Multi-channel phase regeneration of QPSK signals based on phase sensitive amplification[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2018(6): 1-7.
- [22] WANG H, WANG Q, BAI L, et al. All-optical simultaneous multichannel quadrature phase shift keying signal regeneration based on phase-sensitive amplification[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(1): 016111.
- [23] CUI J, WANG H, JI Y. Optical modulation format conversion from one QPSK to one BPSK with information-integrity- employing phase-sensitive amplifier[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(18): 5307-5312.
- [24] LIU H, WANG H, JI Y. Simultaneous all-optical channel aggregation and de-aggregation for 8QAM signal in elastic optical networking[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 1-8.
- [25] PAN L, WANG H, JI Y. All-optical deaggregation from 8PSK to $3 \times$ BPSK based on FWM in HNLF[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): 1246-1252.
- [26] CUI J, LU G W, WANG H, et al. On-chip optical vector quadrature de-multiplexer proposal for QAM de-aggregation by single bi-directional SOA-based phase-sensitive amplifier[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 763-772.
- [27] WANG H, WANG Q, JI Y. All optical format conversion of 8-PSK to 4-PAM signals based on phase sensitive amplification[C]//Asia Communications and Photonics Conference, Nov 10-13, 2017, Guangzhou, China. Washington DC: OSA Publishing, 2017: Su2A.18.
- [28] WANG H, HE C, LI G, et al. All-optical phase quantization with high accuracy based on a multiwave interference phase sensitive amplifier[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1-8.

- [29] WANG H, LIU T, TONG K, et al. Analytical solution of amplitude ratio in optical phase quantization based on phase sensitive amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3198-3204.
- [30] WANG H, PAN L, LU F, et al. All-optical multi-level phase quantization based on phase-sensitive amplification with low-order harmonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5833-5840.

[作者简介]



邢真(1992-), 女, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为光网络与全光信号处理。



王宏祥(1973-), 男, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为光网络与全光信号处理。



纪越峰, 男, 北京邮电大学教授、学位评定委员会主席, 国家重点实验室常务副主任, 兼任国务院学位委员会学科评议组成员, 教育部高等学校教学指导委员会委员, 工业和信息化部通信科学技术委员会委员, 中国通信学会会士, 中国电子学会会士, 英国 IET Fellow; 国家杰出青年科学基金、国家级教学名师奖、新世纪百千万人才工程国家级人选等获得者; 曾任国家“973”计划项目首席科学家、国家“863”计划项目首席专家、国家级教学团队带头人和教育部创新团队带头人; 研究成果多次获得国家技术发明奖二等奖、国家科学技术进步奖二等奖和国家级教学成果奖二等奖。