DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2017.02.002

付松年[1,2]　向梦[1,2]

面向下一代灵活光网络的数字相干光传输技术

摘要

为了适应不同颗粒度的业务需求,最大化波分复用传输系统的频谱效率,光网络正逐渐朝着更灵活、高效、节能的趋势发展.基于带宽可变收发机(BVT)的灵活光网络传输技术因而得到了广泛的关注与研究.本文概述了国内外支持灵活光网络的数字相干光传输技术的最新研究进展,包括发射端支持传输速率可变的自适应编码、调制技术以及接收端相应的调制码型识别技术,最后对灵活光网络传输的未来研究方向进行了展望.

关键词

灵活光网络;调制和编码;数字信号处理;相干光传输

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

收稿日期 2017-01-24

资助项目 国家高技术研究发展计划(2015AA015502);国家自然科学基金(61575071)

作者简介

付松年,男,博士,教授,主要研究方向为光纤通信系统、光纤无线融合接入和先进调制码型.songnian@ mail.hust.edu.cn

1 下一代互联网接入系统国家工程实验室,武汉,430074

2 华中科技大学 光学与电子信息学院,武汉,430074

0 引言

近年来随着互联网的崛起,人们对带宽的需求急剧增加.根据Cisco的分析,全球的网络协议通信容量(IP traffic)从2014到2019年将以23%的年均复合增长率(CAGR)增长[1].在频带资源一定的情况下,如何提高系统传输的频谱效率成为了研究热点.尽管传统的波分复用(WDM)网络在高速传输方面有很多优点,但WDM光网络是以固定的波长信道间隔,譬如50 G/100 G,作为最小颗粒度给业务分配带宽,在业务多样性的情况下,WDM光网络难以适应不同颗粒度的业务要求,导致系统的频谱效率偏低.另外一方面,灵活光网络打破了传统固定栅格光网络信道间隔固定的约束,由于能够灵活地使用光频谱资源,因而能够满足多种颗粒度业务传输的要求,进而使系统的频谱效率最大化.2009年,Jinno等[2]首次提出了基于OFDM技术的频谱切片灵活光网络的概念,并且详细介绍了灵活光网络作为一种高频谱效率、可扩展的光网络架构能够满足动态高效的带宽服务.随后,这一灵活光网络的思想受到了业界的广泛关注并成为近年来的研究热点.2010年,Jinno等[3]又研究了调制码型和光频谱整形宽度对灵活光网络中带宽分配的影响.2011年,Patel等[4]将灵活光网络的概念推广到Nyquist-WDM传输系统.为了实现光网络传输带宽的灵活可变,可变带宽收发机(BVT)是灵活光网络中不可或缺的支撑器件.图1给出了基于BVT的灵活相干光传输系统框图,主要由数字发射机、光纤链路和数字相干接收机三部分组成.发射端的数字信号处理(DSP)以及数模转换器(DAC)能够显著提升系统的性能和灵活度.发射端的DSP包括编码映射、奈奎斯特脉冲整形及预补偿,之后离线产生的两个偏振方向上的同向和正交分量被加载到DAC完成信号的数字域-电域转化.电光转换后,产生的光信号在光纤链路中进行传输.在接收端完成光电转换后,信号首先由模数转换器(ADC)实现电域-数字域转化,之后在数字域进行相应的DSP对信号进行恢复.接收端的DSP包括前端校正、色散补偿、时钟恢复、频偏纠正、信道均衡、载波相位恢复及解码.本文综述了国际上灵活光网络传输技术的最新研究进展,包括发射端支持传输速率可变的自适应编码和调制技术、接收端的调制码型识别技术,最后对灵活光网络传输的未来研究方向进行了展望.

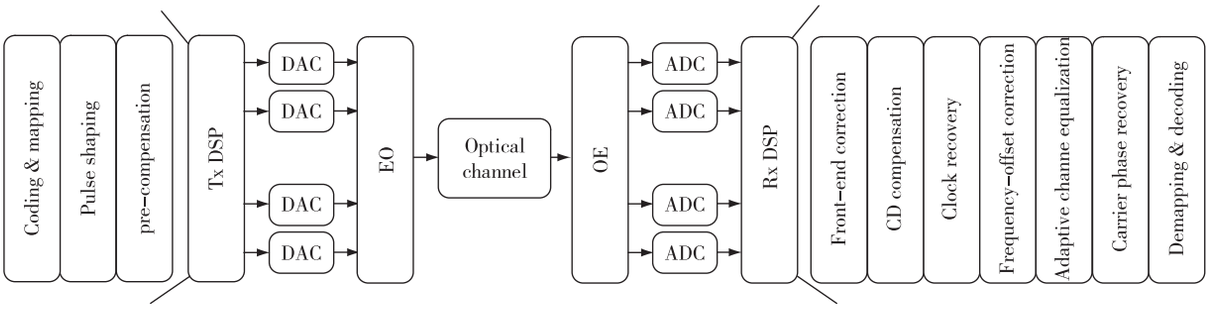


图 1　基于 BVT 的灵活相干光传输系统结构框图

Fig. 1　Structure of flexible coherent transmission system based on BVT

1　发射端编码和调制

一般来说,发射端可以通过改变一个参数譬如调制码型、系统符号速率、编码速率来完成可变速率传输,例如 200 Gbit/s、400 Gbit/s 等.2012 年,Teipen 等[5]实验研究了通过改变标准 M-QAM 调制码型来实现传输速率的改变,相比于改变系统符号速率,强调了其在系统重构上的优势.同年,Gho 等[6]提出通过联合改变调制码型以及前向纠错编码(FEC)的编码速率来实现传输速率的改变.2014 年,Fischer 等[7]提出使用多维调制码型实现传输速率的改变.2015 年,Rozental 等[8]首次实现了无中断速率转换.2016 年,Guiomar 等[9]提出使用时域混合 QAM 实现了传输速率的改变.值得注意的是,业界更多的研究集中在改变调制码型,无论是考虑标准的 M-QAM、Hybrid QAM 或者多维调制码型,来实现未来灵活光网络的可变速率传输.

1)标准的 M-QAM 被最早用来实现传输速率的改变.图 2 给出了不同 M-QAM 的星座图,考虑 28 Gbaud 的系统符号速率以及 7% 的 FEC 开销,使用 DP-QPSK 调制码型可以实现 100 Gbits 传输,使用 DP-16QAM 调制码型可以实现 200 Gbits 传输.但是我们看到,相邻 M-QAM 调制码型之间的颗粒度间隔很大,使用 M-QAM 系统的灵活性比较差.

2)为了解决 M-QAM 调制码型间颗粒度大的问题,多维编码调制格式开始进入人们的视野.编码调制首先将信号空间的信号点分解为不同的子集,之后人为引入冗余度并且只允许子集信号点之间的传输.通过引入冗余度的大小可以自适应地完成传输速率的改变,另外编码调制也会带来一定的编码增益.整体而言,主要有两种编码调制的方式即格型编码以及网格编码[10-11].图 3 给出了基于 Schläfli 四维空间格子的几种格型编码调制码型的星座图,可以看到使用多维编码调制格式可以得到更精细的颗粒度间隙.但是我们也要看到对于多维编码调制格式其相应的编解码比较复杂,会增加 BVT 的实现复杂度.

3)另外一种可以自适应地完成传输速率的改变是采用时域混合 QAM 调制码型(TDHQ)[12-13],它通过在数据结构中周期性地插入不同的 M-QAM 调制格式来改变传输速率.图 4 给出了 TDHQ 的时域结构,可以看到 TDHQ 每个符号携带的比特数由 QAM1 和 QAM2 调制码型的比特数以及相应的排列结构决定.通过改变 QAM1 和 QAM2 的符号数可以实现 TDHQ 的比特数在两种调制码型之间的连续变化.相比于采用多维编码调制格式实现传输速率的

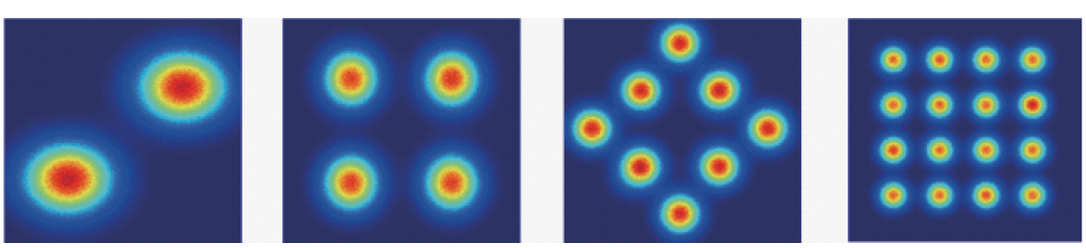


图 2　标准 M-QAM 的星座图

Fig. 2　Constellation of standard M-QAM

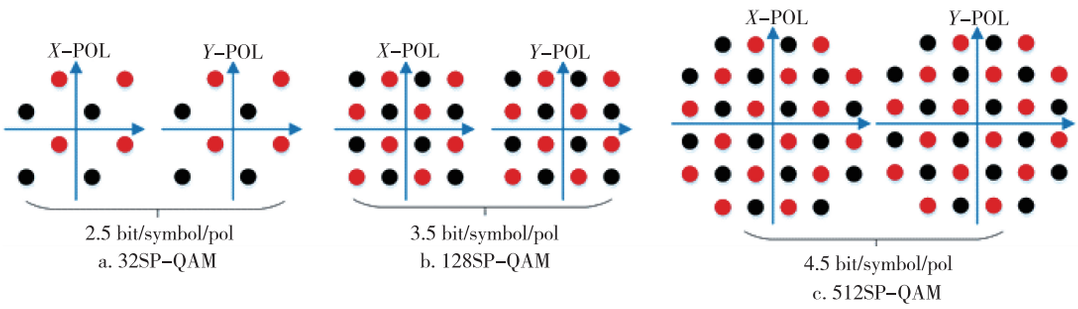


图 3　格型编码调制码型星座图(SP:Set-Partitioning)

Fig. 3　Constellation of lattice coding modulation formats

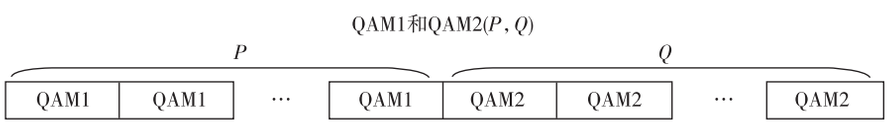


图 4　TDHQ 结构

Fig. 4　Structure of TDHQ

改变,采用 TDHQ 部署更简单也比较直接,但是也存在一些相应的问题,譬如需要优化两种调制码型的功率比,需要额外的手段解决 TDHQ 中高阶调制码型遭受的更严重的非线性效应.最后对 TDHQ 进行解映射时,需要实时地追踪相应的调制码型.

2　接收端的调制码型识别

在接收端的 DSP 中信道均衡、载波相位恢复、判决解码都依赖于已获知接收到信号的调制码型.在灵活光网络中,发射端发射的调制码型变得越来越不可预测,因而有必要在接收端对信号的调制码型进行识别.近年来调制码型识别(MFI)也已成为了研究热点.2012 年,Khan 等[14]提出了基于信号的异步幅度分布以及人工神经网络进行 MFI,这种方式实现比较简单,但是精确度不高,特别是针对高阶调制码型性能很差.2013 年,Borkowski 等[15]提出在斯托克斯空间内采用最大期望值算法进行 MFI,并实验验证了该方法适用于 QPSK/8QAM/16QAM 调制码型.2014 年,Isautier 等[16]提出在斯托克斯空间通过分析信号的高阶统计量来实现 MFI.同年,他们又针对 TDHQ 调制码型提出了一种 MFI 方式,但是该方案需要额外的步骤检查接收到信号模的统计分布,此外,它不能简单地扩展到高阶的 TDHQ 调制码型,譬如 Hybrid 8QAM/16QAM [17].2014 年的 OFC(国际光纤通信会议)上,Liu 等[18]提出通过分析信号的功率分布来实现 MFI.2015 年,Bilal 等[19]提出根据接收到信号的峰均功率比来进行 MFI,但是这种方法首先需要估计信号的光信噪比.同年,Boada 等[20]对在斯托克斯空间进行点簇分类聚集的各种 MFI 方案进行了分析比较,包括 MFI 的识别度以及实现复杂度.2016 年,Khan 等[21]首先分析了信号的功率分布然后基于深度机器学习的方式实现了 MFI.以上所提 MFI 方案主要可以分为两大类,一类是在斯托克斯空间通过判断点簇的个数或者高阶统计量来进行 MFI,另外一类是基于接收到信号的功率分布来进行 MFI.但是这些 MFI 方案不能简单地扩展到更复杂的调制码型,譬如 TDHQ 以及多维的调制码型.此外,这些 MFI 方案由于需要很高的运算复杂度,无法追踪调制码型的快速逐块变化.下面将具体介绍这两类 MFI 方案.

1)基于斯托克斯空间的 MFI.图 5 给出了 BPSK 和 16QAM 信号在斯托克斯空间的分布,可以看到对于不同的调制码型信号,其映射到斯托克斯空间的点簇个数是不一样的.对于 BPSK/QPSK/8QAM/16QAM 而言,相应的点簇个数为 2/4/16/60,因而可以通过判断点簇个数来实现调制码型识别.具体而言,首先需要将接收到信号的点映射到斯托克斯空间,然后通过具体的归类聚集算法对空间点进行点簇分类,最后根据分类点簇的个数判定信号的调制码型信息.具体的归类聚集算法有 k-means 算法、最大期望值算法(EM)、DBSCAN 算法、OPTICS 算法、频谱聚类算法、最大似然算法[20].k-means 算法和

OPTICS 算法分别在低光信噪比和高信噪比的情况下有比较高的 MFI 识别度,另外它们的复杂度也相对较低,但是需要预先知道光信噪比的粗略值.另外一种基于斯托克斯空间的 MFI 方法是通过获得信号的高阶统计量来完成的[22].图 6 给出了具体的 MFI 操作流程,可以看到首先需要通过判断斯托克斯空间信号点分布的维度将调制码型分为两大类:三维分布的 M-QAM 以及二维分布的{OOK,M-PSK,M-PAM}.对于 OOK/M-PSK/M-PAM 可以通过分析高阶统计量来区分,对于 M-QAM 调制码型又可以将其细分为{M-QAM,M>4}以及{QPSK,BPSK}两类.对于{M-QAM,M>4}调制码型可以通过计算空间相关系数来区分,对于 QPSK/BPSK 可以通过计算四阶统计量来区分.

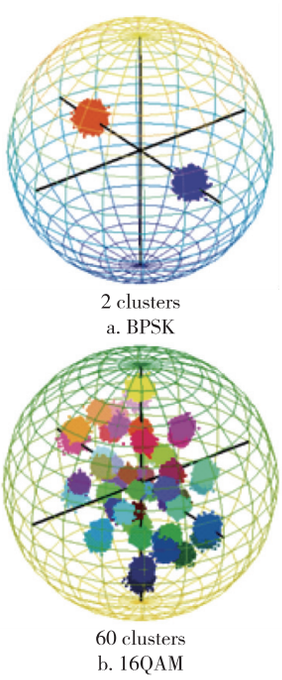


图 5　BPSK/16QAM 信号的斯托克斯空间分布

Fig. 5　Stokes distribution of BPSK/16QAM signals

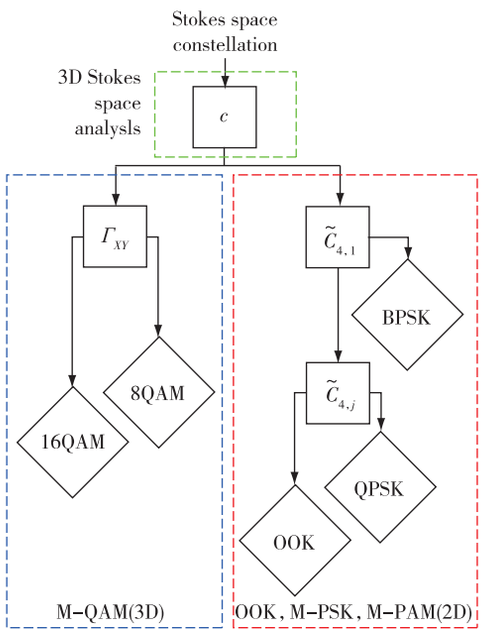


图 6　斯托克斯空间通过判断高阶统计量的 MFI 流程

Fig. 6　MFI flow in Stokes space based on calculating the high-order statistics

2)基于接收到信号功率分布的 MFI.图 7 给出了不同调制码型的星座图以及功率分布.可以看到不同的调制码型具有不同的功率分布,通过判断接收到信号的功率分布可以对调制码型进行识别.具体可以采取设定判决矩阵、机器学习的方式根据功率分布进行 MFI[18,21].

相比于前面所述的 MFI 方案,最近我们提出的两种 MFI 方案不仅能够对任意的调制码型进行识别并且具有很高的精确度,即使是在很低光信噪比的情况下仍然可以达到 100%的正确率[23-24].图 8 给出了 DP-16QAM 信号经过标准单模光纤传输后不同 MFI 方案的性能,可以看到,当传输距离比较短时,3 种 MFI 方案都具有 100%的正确识别概率,但是当

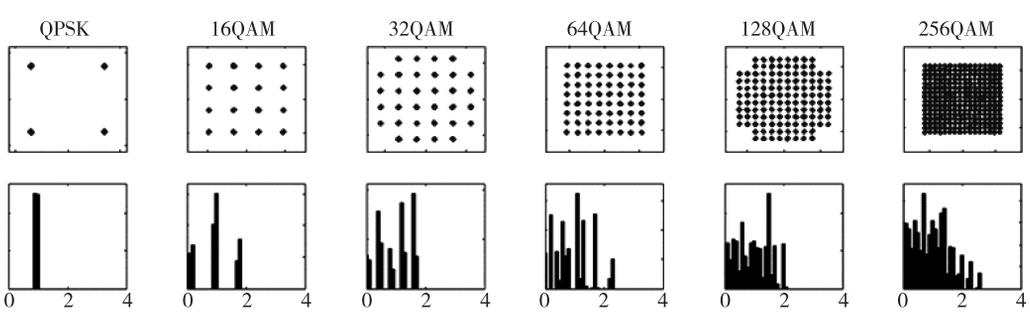


图 7　不同信号的星座图以及功率分布

Fig. 7　Different signals' constellation and power distribution

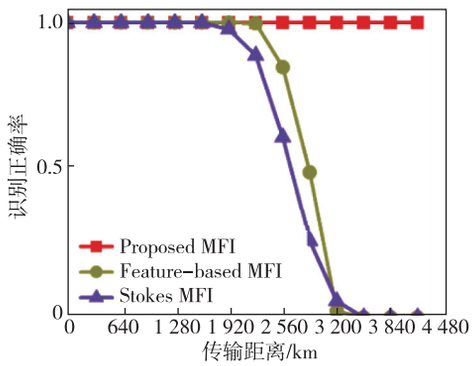


图 8 正确 MFI 的概率随传输距离的变化情况

Fig. 8 Probability of correct MFI versus transmit distance

传输距离高于 2 240 km 时,基于斯托克斯空间的 MFI 方案(Stokes MFI)以及基于接收到信号功率分布的 MFI 方案(Feature-based MFI)的性能下降,而对于笔者等所提的 MFI 方案(Proposed MFI),即使传输距离到达 4 000 km,仍然具有 100%的正确识别概率.下面将具体的介绍我们所提出的 MFI 方案.

1)基于 BPSK 符号的 MFI.图 9 给出了超标量并行化结构的框图.基于超标量并行化结构的载波相位恢复不仅适于并行化处理并且线宽容忍度高,但是初始化锁相环(PLL)需要插入已知的 BPSK 导频符号(图中红色标识).基于此结构,为了进行 MFI,我们将调制码型的信息加载到用于载波相位恢复的 BPSK 导频符号上(图中蓝色标识),在接收端通过解调 BPSK 符号,然后查看调制码型编码表,就可以获得发射端传输的调制码型[23].一般来说为了消除高斯白噪声的影响,可以周期性地插入相同的 MFI BPSK 符号.假定重复 MFI BPSK 符号数为 N,那么在一个超标量并行化结构里面,可以编码 $P/(2N)$ bit 调制码型信息,能够对 $2^{P/(2N)}$ 调制码型进行判定.图 10 给出了 4 bit 的调制码型编码表,根据编码表,可以对任意的调制码型进行识别,包括 M-QAM、TDHQ 以及多维调制编码码型.

0000: BPSK	0001: QPSK
0010: 8QAM	0011: 16QAM
0100 ~0111 : High level QAM	
1000 ~1011 : Time-domain hybrid QAM	
1100 ~1111 : Multi-dimension formats	

图 10 4 bit 调制码型编码表

Fig. 10 A modulation format encoding table given in 4 bit information

2)基于 RF-pilot 的 MFI.在相干光通信系统里面,RF-pilot 被广泛用来进行载波相位恢复以及非线性补偿,但是只有 RF-pilot 的相位信息被利用.我们提出可以将调制码型的信息加载到 RF-pilot 的幅度上,实验中对 RF-pilot 进行两电平的幅度调制[24].图 11 给出了接收端接收到的 RF-pilot 的相位和幅度信息.可以看到 RF-pilot 的相位可以用来进行相位恢复,幅度可以用来进行 MFI.同样的,在接收端对 RF-pilot 的幅度进行判决解调,根据调制码型编码表,就可以获得发射端传输的调制码型.

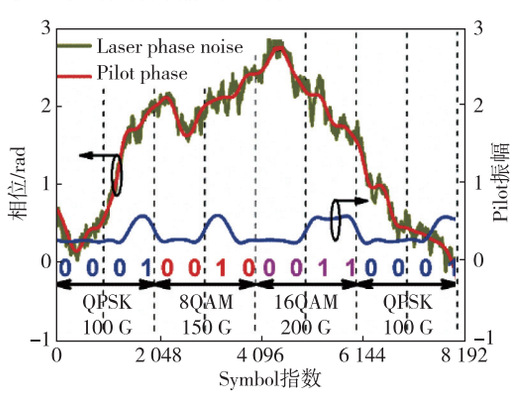


图 11 接收端接收到的 RF-pilot 的相位和幅度

Fig. 11 Receiver-side extracted RF-pilot phase and amplitude

3 展望

基于带宽可变收发机的灵活光网络传输技术已

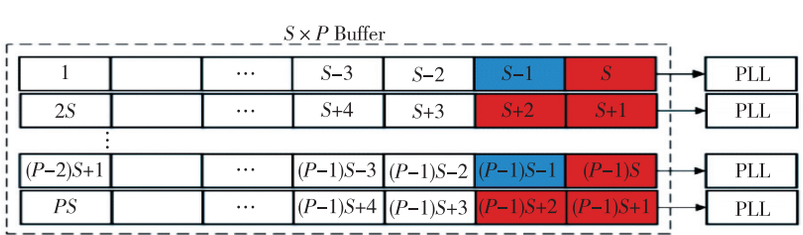


图 9 超标量并行化结构框图

Fig. 9 Structure of the superscalar parallelization buffer

经取得了重要的研究进展.由于灵活光网络能够灵活地使用光频谱资源,因而能够满足多种颗粒度业务传输带宽的要求,最终使系统的频谱效率最大化.但是未来研究中还有很多关键技术和问题有待解决.包括无中断的带宽可变收发机的设计,在根据用户需求改变传输速率时,信息的传递不用被破坏;接收端对调制码型透明的低复杂度算法优化设计,适用于各种调制码型,以降低计算复杂度,提高信号处理效率,进而降低硬件电路的功耗;网路层面路由和频谱资源分配算法设计,以自适应业务带宽需求,建立一条端到端的光路径并为其分配合适的通信参数.

参考文献

References

[1] Cisco Visual Networking Index. Forecast and methedology, 2014 - 2019 white paper [R]. May 27th,2015

[2] Jinno M,Takara H,Kozicki B.Concept and enabling technologies of spectrum-sliced elastic optical path network (SLICE) [C]// Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2009, DOI: 10.1364/ACP.2009.FO2

[3] Jinno M, Kozicki B, Takara H, et al. Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [J]. IEEE Communications Magazine,2010,48(8):138-145

[4] Patel A N,Ji P N,Jue J P,et al.Survivable transparent flexible optical WDM (FWDM) networks[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition,2011, DOI:10.1364/OFC.2011.OTuI2

[5] Teipen B,Eiselt M H,Grobe K,et al.Adaptive data rates for flexible transceivers in optical networks[J].Journal of Networks,2012,7(5):776-782

[6] Gho G H,Kahn J M.Rate-adaptive modulation and coding for optical fiber transmission systems [J]. Journal of Lightwave Technology,2012,30(12):1818-1828

[7] Fischer J K,Alreesh S,Elschner R,et al.Bandwidth-variable transceivers based on four-dimensional modulation formats [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(16):2886-2895

[8] Rozental V N,Mello D A A.Hitless rate switching for dynamically reconfigurable optical systems[J].IEEE Photonics Journal,2015,7(2):1-9

[9] Guiomar F P,Li R X,Fludger C R S,et al.Hybrid modulation formats enabling elastic fixed-grid optical networks [J].Journal of Optical Communications and Networking, 2016,8(7):A92-A100

[10] Karlsson M,Agrell E.Spectrally efficient four-dimensional modulation[C]// Optical Fiber Communication Conference,2012,DOI:10.1364/OFC.2012.OTu2C.1

[11] Koike-Akino T,Kojima K,Parsons K.Trellis-coded high-dimensional modulation for polarization crosstalk self cancellation in coherent optical communications[C]// Signal Processing in Photonic Communications, 2015, DOI:10.1364/SPPCOM.2015.SpS3D.6

[12] Peng W R,Morita I,Tanaka H.Hybrid QAM transmission techniques for single-carrier ultra-dense WDM systems [C]// 16th IEEE Opto-Electronics and Communications Conference,2011:824-825

[13] Zhuge Q B,Morsy-Osman M,Xu X,et al.Spectral efficiency-adaptive optical transmission using time domain hybrid QAM for agile optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology,2013,31(15):2621-2628

[14] Khan F N,Zhou Y D,Lau A P T,et al.Modulation format identification in heterogeneous fiber-optic networks using artificial neural networks [J]. Optics Express, 2012, 20(11):12422-12431

[15] Borkowski R,Zibar D,Caballero A,et al.Optical modulation format recognition in Stokes space for digital coherent receivers [C]// Optical Fiber Communication Conference,2013,DOI:10.1364/OFC.2013.OTh3B.3

[16] Isautier P,Pan J,Ralph S.Robust autonomous software-defined coherent optical receiver [C]// Optical Fiber Communication Conference, 2014, DOI: 10.1109/OFC.2014.6887018

[17] Isautier P,Pan J,Langston J,et al.Autonomous receivers for complex format identification and demodulation[C]// IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference (AVFOP), 2014, DOI: 10.1109/AVFOP.2014.6999439

[18] Liu J,Dong Z H,Zhong K P,et al.Modulation format identification based on received signal power distributions for digital coherent receivers[C]// Optical Fiber Communication Conference,2014,DOI:10.1364/OFC.2014.Th4D.3

[19] Bilal S M,Bosco G,Dong Z H,et al.Blind modulation format identification for digital coherent receivers[J].Optics Express,2015,23(20):26769-26778

[20] Boada R,Borkowski R,Monroy I T.Clustering algorithms for Stokes space modulation format recognition[J].Optics Express,2015,23(12):15521-15531

[21] Khan F N,Zhong K,Al-Arashi W H,et al.Modulation format identification in coherent receivers using deep machine learning[J].IEEE Photonics Technology Letters, 2016,28(17):1886-1889

[22] Isautier P,Pan J,De Salvo R,et al.Stokes space-based modulation format recognition for autonomous optical receivers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(24):5157-5163

[23] Xiang M,Zhuge Q B,Qiu M,et al.Modulation format identification aided hitless flexible coherent transceiver [J].Optics Express,2016,24(14):15642-15655

[24] Xiang M,Zhuge Q B,Qiu M,et al.RF-pilot aided modulation format identification for hitless coherent transceiver [J].Optics Express,2017,25(1):463-471

南京信息工程大学学报(自然科学版),2017,9(2):123-129
Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition),2017,9(2):123-129

Optical coherent transmission techniques for next generation flexible optical networks

FU Songnian[1,2] XIANG Meng[1,2]

1 National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Wuhan 430074

2 School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

Abstract In order to satisfy the service demands with different granularities and maximize the spectral efficiency of wavelength division multiplexing transmission, the optical network is evolving to agile and energy-efficient one. Consequently, the flexible optical transmission techniques based on bandwidth variable transceivers (BVT) have attracted worldwide attention and research interest. We review recent progresses of flexible optical transmission techniques including transmitter-side adaptive modulation, variable bit-rate loading and receiver-side corresponding modulation formats identification. Finally, we outline the prospects and future challenges in this area.

Key words flexible optical networks; modulation and coding; digital signal processing; coherent optical transmission