

基于简化的两级强度特性调制格式识别算法研究

隋亮¹,刘洋²,黄丽艳²,吴剑军²,成炬新²,龙函^{2*},段明雄²

(1. 南方电网能源发展研究院有限责任公司,广州 510530;2. 武汉光迅科技股份有限公司,武汉 430205)

摘要:未来弹性光网络要求网络源节点的发射端能够根据链路的传输性能以及用户的多样化需求,动态地改变传输信号的调制格式以及符号率。提出了一种基于简化的两级强度特性调制格式识别算法,通过 Godard's 误差区分正交相移键控(QPSK)信号,再使用强度噪声方差进一步区分 16 阶正交幅度调制(16QAM)和 64QAM。研究结果表明:物理数据模型-正交相移键控(PDM-QPSK)、PDM-16QAM 和 PDM-64QAM 等高阶调制格式信号的最小所需光信噪比(OSNR)值低于 7%前向纠错(FEC)理论阈值(误码率为 3.8×10^{-3})时,能够实现 100%的正确识别率,且所提的方案所需的符号数相对较少。

关键词:相干光纤通信;调制格式识别;弹性光网络;光性能监测;数字信号处理

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)09-0023-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.09.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the algorithm of modulation format recognition based on simplified two-stage intensity characteristic

SUI Liang¹, LIU Yang², HUANG Liyan², WU Jianjun², CHENG Juxin², LONG Han^{2*}, DUAN Mingxiong²

(1. Energy Development Research Institute, CSG, Guangzhou 510530, China; 2. Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: The future elastic optical network requires that the transmitter of the source node can dynamically change the modulation format and symbol rate of the transmission signal according to the transmission performance of the link and the diversified needs of users. A simplified two-stage intensity characteristic modulation scheme recognition algorithm is proposed. In this algorithm, quadrature phase shift keying (QPSK) signals are distinguished by Godard's error, and then 16 order quadrature amplitude modulation(16QAM) and 64QAM are further distinguished by intensity noise variance. The results show that when the minimum optical signal to noise ratio(OSNR) value of high-order modulation format signals such as physical data model-quadrature phase shift keying(PDM-QPSK), PDM-16QAM and PDM-64QAM is lower than 7% forward error correction(FEC) theoretical threshold (error rate is 3.8×10^{-3}), 100% correct recognition rate can be achieved, and the number of symbols required by the proposed scheme is relatively small.

Key words: coherent optical fiber communication; modulation format recognition; elastic optical network; optical performance monitoring; digital signal processing

0 引言

为满足日益增长的网络业务需求,下一代弹性光网络需根据传输链路的性能以及用户的需求,动态地改变发射端信号调制格式、符号率等相关参数。在接收端,需要对信号调制格式、符号率等相关参数自适应

收稿日期:2019-09-29。

作者简介:隋亮(1988—),男,吉林通化市人,工程硕士,工程师,就职于南方电网能源发展研究院有限责任公司,现从事电力通信咨询评审工作。参与并完成国家重点输变电工程设计 30 余项,获中国电力规划设计协会一等奖 2 项、二等奖 1 项,四川省工程咨询协会三等奖 1 项。

* 通信作者:龙函(E-mail: longhan106@163.com)。



应地获取,以便实现信号的优化解调。近年来,智能化的调制格式识别算法已经得到光通信领域科研工作者的广泛关注。调制格式识别算法可以自适应地判别未知信号的调制格式信息^[1],并且将获取的调制格式信息提供给随后的调制格式相关的信号解调算法。由于目前的相干接收机对不同调制格式信号开发了不同的信号处理算法(如偏振解复用算法、光信噪比(OSNR)监测算法、频偏补偿算法、载波相位恢复算法和信号解映射算法等),无法实现对所有调制格式通用。因此,调制格式识别算法的研究在信号解调过程中尤为关键。

近年来, 国内外光通信领域的研究人员提出了大量有效的调制格式识别方案。具体如下: ①基于信号功率分布的调制格式识别方案^[2], 该方案可实现多种正交振幅调制(QAM)格式的识别, 但需要提前预知调制格式的 OSNR 信息。②基于峰均值功率比的调制格式识别方案^[3], 该方案也需要提前预知 OSNR 信息, 同时需要附加的硬件(功率计、滤波器等)辅助识别。③基于斯托克斯空间的调制格式识别方案^[4], 由于斯托克斯空间映射过程中受噪声影响较为严重, 因此该方案在识别高阶调制格式方面具有一定难度。④基于数字频率辅助的调制格式识别方案^[5], 该方案需要在发射端添加导频信息, 这会给整个光网络带来一定的复杂度。⑤基于神经网络的调制格式识别方案^[6], 该方案具有很好的调制格式识别性能, 但是神经网络需要大量的前期训练, 一定程度上提升了识别的复杂度。

因此, 一种简单的、能够识别高阶调制格式的算法非常重要。本文提出一种基于简化的两级强度特性调制格式识别算法。

1 两级强度特性调制格式识别原理

正交相移键控(QPSK)、16QAM 和 64QAM 的强度直方图如图 1 所示。该直方图是经过恒常模算法进行初步解复用之后得到的。由于 QPSK 信号具有恒定的一级幅度, 因此其强度直方图仅呈现 1 个能级。从图 1 可以看出, 不同调制格式之间的强度不同。其中, 16QAM 信号与 64QAM 信号分别具有 3 个和 6 个强度能级。因此, 本文提出通过不同强度特性来识别或者区分不同的调制格式。

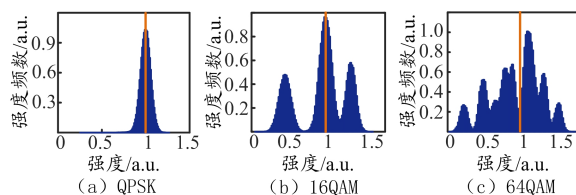


图 1 不同调制格式的强度直方图

首先, 本文采用 Godard's 误差来衡量不同调制格式的强度特性, Godard's 误差 ε ^[7-8] 被定义为:

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^N \{ [|D(2n-1)|^2 - R_1] + [|D(2n)|^2 - R_2] \} \quad (1)$$

其中, $D(2n-1)$ 和 $D(2n)$ 分别表示奇数倍信号和偶数倍信号, n 表示信号个数。 R_1 与 R_2 分别表示奇数倍信号恒常模与偶数倍信号恒常模。

本文以 112 Gb/s 物理数据模型-正交相移键控(PDM-

QPSK)、224 Gb/s PDM-16QAM 与 336 Gb/s PDM-64QAM 等 3 种速率的调制格式为例进行研究, 其所对应的 Godard's 误差图如图 2 所示。可以看出, 112 Gb/s PDM-QPSK 信号在不同 OSNR 条件下, 其所对应的 Godard's 误差比其它 2 种调制格式的误差值小很多。因此本文所提算法可通过一个误差阈值 $Th1$ 将 QPSK 与其它 2 种调制格式信号区分开来。为了进一步区分剩下的 2 种调制格式, 本文提出监测调制格式的强度噪声方差特性。噪声方差 ε_{Var} 特性^[7]可定义为:

$$\varepsilon_{Var} = Var(|D(n)|^2 - mean\{|D(n)|^2\}) \quad (2)$$

其中, $mean$ 为信号的平均函数, Var 为信号的方差函数。224 Gb/s PDM-16QAM 和 336 Gb/s PDM-64QAM 信号的强度噪声方差图如图 3 所示。可通过阈值 $Th2$ 将 16QAM 和 64QAM 区分开, 实现调制格式的最终识别。

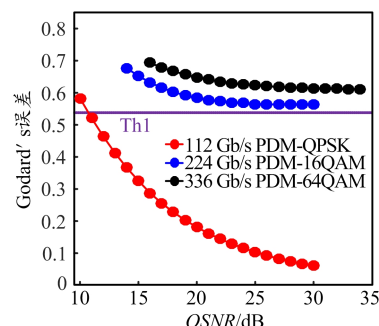


图 2 不同调制格式的 Godard's 误差图

相干接收机中的数字信号处理流程图如图 4 所示。在接收端, 偏振复用 X 与 Y 信号首先经过色散补偿和时钟恢复算法, 对信号的色散效应和时钟相位抖动效应进行补偿; 然后经过恒常模算法, 该算法可

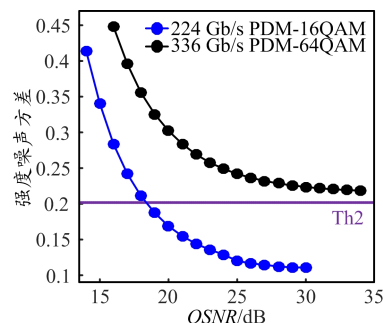


图 3 不同调制格式的强度噪声方差图

对信号进行时域均衡, 对残余色散和偏振模式色散具有一定的均衡效果。通过恒常模算法以后的信号被用来进行调制格式识别, 获取的调制格式信息可辅助后端调制格式信息相关的算法(如偏振解复用算法、频偏补偿算法和载波相位恢复算法等), 从中选择最优化的解调算法。

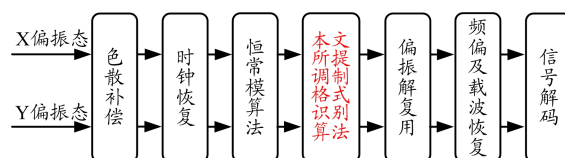


图 4 相干接收机的数字信号处理流程图

基于强度特性的调制格式识别算法原理图如图 5 所示。通过恒常模算法以后的信号使用来进行调制格式识别,信号进入到调制格式识别算法模块后,首先使用式(1)计算未知信号的 Godard's 误差,然后根据图 2 中的阈值 $Th1$ 对未知信号的 Godard's 误差值进行判决。当所得的误差值小于 $Th1$,则判断为 QPSK 信号;反之,则判断为剩余 2 种调制格式。由于剩余 2 种调制格式使用 Godard's 误差很难区分,因此本文将继续使用式(2)计算未知信号的强度噪声方差,根据图 3 中的阈值 $Th2$ 对未知信号的强度噪声方差值进行判决。当所得的噪声方差小于阈值 $Th2$,则判断为 16QAM 信号;反之,则判断为 64QAM 信号。

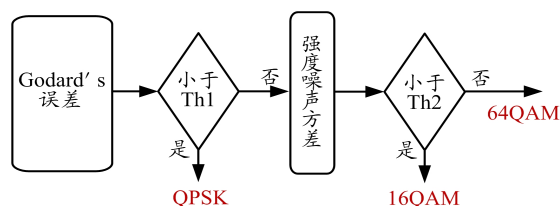


图 5 本文提出的调制格式识别算法的原理图

本文提出的算法是通过式(1)和式(2)计算信号的 Godard's 误差和信号的强度噪声方差,并通过阈值判决,最终实现不同调制格式的识别操作。其中,计算信号的 Godard's 误差和强度噪声方差所需的复杂度都为 $O(n)$,对误差和方差的判决操作所需的复杂度也为 $O(n)$,因此调制格式识别过程的复杂度为 $O(n)$ 。这证明该方案是一种简单的、低复杂度的调制格式识别方案。

2 系统设置以及实验结果

为了验证所提算法的有效性以及可行性,本文在光纤通信系统仿真软件 VPI transmission Maker 中搭建了 112 Gb/s PDM-QPSK、224 Gb/s PDM-16QAM 和 336 Gb/s PDM-64QAM 这 3 种主流调制格式的仿真系统,如图 6 所示。首先,外腔激光器(ECL)发出 1551.2 nm 的连续光通过偏振分束器将线偏振态的信号分为 2 路正交偏振光,2 个 IQ 调制器将速率为 28 Gb/s 的伪随机序列(PAM2、PAM4 和 PAM8)分别调制到 2 个偏振态上,得到 QPSK、16QAM 和 64QAM 光信号,经偏振合束器耦合为偏振复用传输信号,最终得到 112 Gb/s PDM-QPSK、224 Gb/s PDM-16QAM 以及 336 Gb/s PDM-64QAM 光信号。然后,调节光衰减器对噪声源功率进行调节,以实现不同 OSNR,接着传

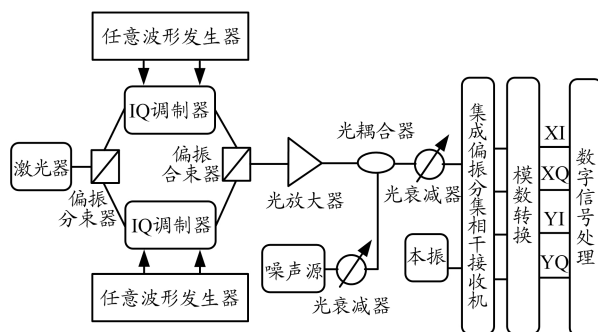


图 6 相干光通信系统图

输信号与本振信号进入集成偏振分集相干接收机实现光/电转换,将获取的模拟电信号再通过模/数转换得到数字信号。最后,数字信号处理模块对信号进行相应的补偿和恢复。本文提出的调制格式识别算法就是在数字信号处理模块中实现的。

不同调制格式信号在不同符号数条件下所对应的识别精度图如图 7 所示。本文为了验证算法可在较少的符号数情况下实现 100%的识别精度,对不同调制格式选择了 1000~10000 个符号数进行测试。QPSK、16QAM 和 64QAM 分别选取 12 dB、19 dB 和 24 dB 的 OSNR 值进行监测,这些值是对应 7% FEC 所需的 OSNR 值。从图 7 可以看出,QPSK 仅仅需要 2000 个符号数就可实现 100%识别率。16QAM 和 64QAM 由于调制格式幅度级数相对较多,因此需要更多的符号数实现调制格式识别,分别为 3000、4000 个符号数。相对于其它使用信号强度相关信息的方法,本文所提算法可在较少的符号数情况下实现精确的调制格式识别。不同调制格式信号在不同 OSNR 条件下所对应的

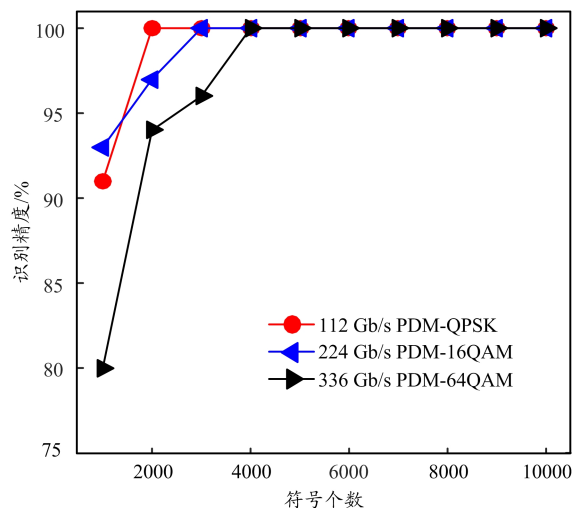


图 7 调制格式信号在不同符号数条件下所对应的识别精度图

识别精度图如图8所示。QPSK、16QAM和64QAM的OSNR测试区间分别为10~30 dB、14~30 dB和16~34 dB。其中,QPSK、16QAM和64QAM实现100%识别率所需最小的OSNR分别为11 dB、19 dB和16 dB,均低于7%FEC理论极限所对应的OSNR值。

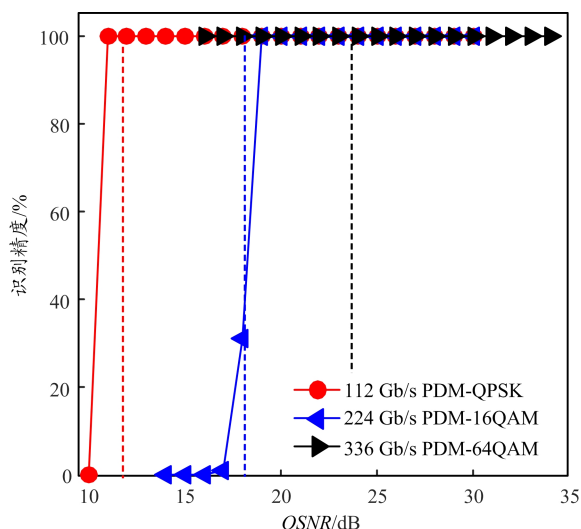


图8 不同调制格式信号在不同 OSNR 条件下所对应的识别精度图

为了更加充分地验证所提方法的性能,本文选择与文献[2]中基于信号功率分布的调制格式识别算法进行对比分析。2种算法的最小所需OSNR对比结果图如图9(a)所示。文献[2]与本文提出算法都采用的是恒常模算法均衡以后的信号,而且使用信号的强度特征关系具有一定的对比性。文献[2]中3种调制格式实现100%的识别率最小所需OSNR分别为11.5 dB、16.5 dB和23 dB,相比于本文提出的算法需要更高的OSNR才能实现100%识别率。本文提出的算法16QAM调制格式所需的OSNR略高于文献[2]中的OSNR值,通过改进阈值判定方法或者改进误差计算方式是可以缓解的。2种算法的所用符号数对比结果图如图9(b)所示。文献[2]中3种调制格式都使用10000

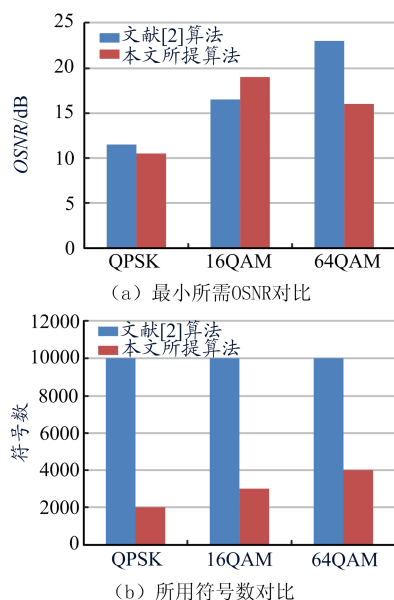


图9 对比情况

个符号数,本文所提算法中3种调制格式分别使用2000、3000和4000个符号数就可以实现较好的性能。

3 结束语

本文提出了一种基于简化的两级强度特性调制格式识别算法。该算法在112 Gb/s PDM-QPSK、224 Gb/s PDM-16QAM和336 Gb/s PDM-64QAM的传输系统中得到验证。研究表明:本文提出的调制格式算法对于3种调制格式实现100%的识别率所需的最小OSNR值低于7%FEC理论极限;同时,相对于其它使用信号强度相关信息的方法,本算法实现100%的识别率所需的符号数相对较少。其中,PDM-QPSK仅需要2000个符号数,PDM-16QAM和PDM-64QAM分别需要3000和4000个符号数。因此,本文提出的算法仅需要简单地计算调制格式的Godard's误差和强度噪声方差,就可实现不同调制格式识别。该识别算法将有潜力为下一代弹性光网络带来便利。

参考文献:

- [1] CHATTERJEE B, SARMA N, OKI E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial [J]. IEEE Commun. Surveys Tuts, 2015(17): 1776-1800.
- [2] LIU J, DONG Z, ZHONG K, et al. Modulation format identification based on received signal power distributions for digital coherent receivers [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC), March 9-13, 2014, San Francisco, USA. Washington: Optical Society of America, 2014: Th4D.3-1-Th4D.3-3.
- [3] BILAL S, BOSCO G, DONG Z, et al. Blind modulation format identification for digital coherent receivers [J]. Optics Express, 2015(23): 26769-26778.
- [4] BOADA R, BORKOWSKI R, MONROY I. Clustering algorithms for Stokes space modulation format recognition [J]. Optics Express, 2015(23): 15521-15531.
- [5] XIANG M, ZHUGE Q, QIU M, et al. RF-pilot aided modulation format identification for hitless coherent transceiver[J]. Optics Express, 2017(25): 463-471.
- [6] KHAN F, ZHONG K, AL-ARASHI W, et al. Modulation format identification in coherent receivers using deep machine learning [J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2016, 28: 1886-1889.
- [7] JIANG L, YAN L, YI A, et al. Robust and blind modulation format identification for elastic optical networks[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Sept. 23-27, 2018, Rome, Italy. Piscataway: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ECOC.2018.8535367.
- [8] GODARD D. Self-recovery equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems [J]. IEEE Trans. Commun. 1980(28): 1867-1875.