

引用本文:周顺勇,胡琴,陆欢,等.基于幅值密度特征的调制格式识别方法[J].光通信技术,2025,49(1):101-106.

基于幅值密度特征的调制格式识别方法

周顺勇^{1,2},胡琴^{1,2*},陆欢^{1,2},张航领^{1,2},彭梓洋^{1,2}

(1. 四川轻化工大学 人工智能四川省重点实验室,四川 宜宾 644000; 2.四川轻化工大学 自动化与信息工程学院,四川 宜宾 644000)

摘要:为了提升未来弹性光网络的性能,提出了一种基于幅值密度特征的调制格式识别方法。该方法将幅值密度特征作为改进的 MobileNetV2 模型的输入,通过特征识别确定调制格式类型,并引入了归一化注意力机制(NAM),实现对传输信号调制格式的精准识别。在 28 GBaud 正交相移键控(QPSK)、8 电平正交幅度调制(8QAM)、16QAM、32QAM、64QAM 和 128QAM 传输系统中验证了该方案的可行性。实验结果表明:每种调制格式在达到 100%识别准确率时所需的最低光信噪比(OSNR)均低于其对应的 20%前向纠错(FEC)阈值,而且,在较宽的 OSNR 范围内达到了 99.62%的识别准确率;在存在残余色散的光网络中,该方案仍能保持较高的识别性能。

关键词:调制格式识别;光通信;幅值密度特征;MobileViT;归一化注意力机制

中图分类号:TN929.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)01-0101-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Modulation format recognition method based on amplitude density characteristics

ZHOU Shunyong^{1,2}, HU Qin^{1,2*}, LU Huan^{1,2}, ZHANG Hangling^{1,2}, PENG Ziyang^{1,2}

(1. Sichuan Key Laboratory of Artificial Intelligence, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin Sichuan 644000, China;

2. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin Sichuan 644000, China)

Abstract: To enhance the performance of future elastic optical networks, a modulation format recognition method based on amplitude density features is proposed. This method uses amplitude density features as input to an improved MobileNetV2 model to identify modulation formats and introduces a normalized attention mechanism (NAM) for accurate identification of transmission signal modulation formats. The feasibility of this approach is verified in 28 GBaud quadrature phase shift keying(QPSK), 8-level quadrature amplitude modulation (8QAM), 16QAM, 32QAM, 64QAM, and 128QAM transmission systems. The experimental results show that the minimum optical signal-to-noise ratio (OSNR) required for achieving 100% recognition accuracy for each modulation format is below its corresponding 20% forward error correction (FEC) threshold. Furthermore, within a broad OSNR range, a recognition accuracy of 99.62% is achieved. In optical networks with residual dispersion, this approach still maintains high recognition performance.

Key words: modulation format recognition, optical communication, amplitude density features, MobileViT, normalized attention mechanism

收稿日期:2024-06-14。

基金项目:国家自然科学基金项目(61801319)资助;四川轻化工大学研究生创新基金项目(Y2023290)资助。

作者简介:周顺勇(1975—),男,工学硕士,副教授,任四川轻化工大学自动化与信息工程学院副院长。主要研究方向是信号与信息处理、图像处理、通信技术、人工智能技术。主持或主研国家级、省部级各类科研项目 20 余项,发表科研和教学论文 20 余篇,其中 SCI、EI 检索收录 10 余篇。

***通信作者:**胡琴(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为光通信技术。



0 引言

随着光纤通信技术的不断进步,未来的光网络正朝着智能化和灵活性的方向发展。这种智能网络能够根据信道条件动态调整调制格式,以优化带宽资源利用,并灵活响应变化的数据流量需求和网络拓扑结构^[1]。然而,这一特性给相干接收机带来了新的挑战:由于调制格式的不确定性,依赖于特定调制格式的算法(如偏振解复用、频率偏移估计和载波相位恢复)可能无法正常工作。因此,在弹性光网络(EON)中,调制格

周顺勇,胡琴,陆欢,等:基于幅值密度特征的调制格式识别方法

式识别(MFI)成为确保系统可靠运行的关键技术之一^[2]。

光信号在传输过程中会受到多种因素的影响,包括色散、噪声、偏振模色散和非线性干扰等^[3],这些因素不仅降低了信号质量,还影响了系统的传输性能和稳定性。特别是对于高阶调制格式(例如 128 电平正交幅度调制,简称 128QAM),它们对信道条件更为敏感,低光信噪比(OSNR)条件下信号特征容易被噪声掩盖,导致难以准确识别其调制格式。这对 MFI 提出了更高的要求,即在复杂和多变的信道条件下保持高精度。

为应对上述挑战,研究人员提出了一系列 MFI 方案。例如,ZHAO Z 等人^[4]开发了一种基于光信号幅度偏差分析的 MFI 方法,该方法对相位噪声、频率偏移和非线性效应不敏感,从而提高了测量的稳定性和准确性。YU X 等人^[5]引入了一种改进的粒子群优化(M-PSO)设计的盲 MFI 方案,提高了对色散(CD)和非线性效应的容忍度。XU H 等人^[6]则提出了一种使用 Stokes 空间矢量分析的低复杂度盲 MFI 方案。WEI Z 等人^[7]针对基于概率星座整形(PCS)的系统,提出了主动学习辅助熵可调自动 MFI 方案。梁坤等人^[8]结合联合残差网络(ResNet)和 Bottleneck Transformer,实现了长距离传输中的高效 MFI。YANG F 等人^[9]利用霍夫变换(HT)图像结合多任务残差神经网络(MT-ResNet),实现了波特率识别(BRI)、MFI、残余 CD 识别(CDI)、OSNR 和差分群延迟(DGD)的同时监测。此外,ZHAO Y 等人^[10]提出了一种基于二值化卷积神经网络(B-CNN)的方法,该方法提供了低复杂度的 OSNR 监测和 MFI。尽管上述方法在适当的信道条件下能保证 MFI 的准确性,但它们大多未能充分考虑高阶 MFI 的准确率,尤其是在低 OSNR 条件下的表现。因此,本文提出一种基于幅值密度特征的 MFI 方法。

1 相干接收机基本原理

相干接收机对接收到的数字信号进行与调制格

式非相关的离线数字信号处理(DSP)^[11],流程如图 1 所示。首先,对接收到的信号进行色散补偿、时钟恢复、恒模算法(CMA)均衡^[12]等预处理步骤。接着,对信号进行功率归一化处理,并使用归一化后的信号生成的幅值密度图作为 MobileViT-NAM 模型的特征输入,进行 MFI。最后,通过识别调制格式信息,可以为 DSP 中的多个环节,例如偏振解复用、频率偏移估计、载波相位恢复、解码以及误码率(BER)计算等,选择恰当的算法。

1.1 幅值密度图生成

本文所提出的 MFI 方案基于幅值密度特征实现。首先,对均衡后的数字信号进行归一化处理。然后,进行幅值密度特征的提取,该特征只与信号的振幅相关,与相位信息无关。数字信号 $y(n)$ 定义为

$$y(n) = A(n)e^{j\phi(n)} + k(n) \quad (1)$$

其中, A 为数字信号幅度, $\phi(n)$ 是调制的相位信息, $k(n)$ 是加性高斯白噪声, N 是样本数。 n 是数字信号中第 n 个样本点, $1 < n < N$ 。

对接收信号进行归一化处理,归一化后的复信号表示为

$$y'(n) = \frac{y(n)}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y(n)|^2} \quad (2)$$

$y'(n)$ 的幅值实部 E_p 可以定义为

$$E_p = |y'(n)| \quad (3)$$

最后,对归一化信号进行幅值密度特征的提取,由上述公式可得到信号的幅值密度分布如图 2 所示。可以看出,各种调制格式的幅值密度图具有明显的分级特征和连续性,能全面反映信号的幅值信息,非常适合观察数据的整体趋势。

1.2 MobileViT-NAM 模型

将归一化注意力机制(NAM)与 MobileViT 相结合,构成 MobileViT-NAM 模型,如图 3 所示。该模型主要由以下几部分组成:卷积层、改进的 MobileNetV2 模块、MobileViT 模块、全局池化层、全连接层以及用于输

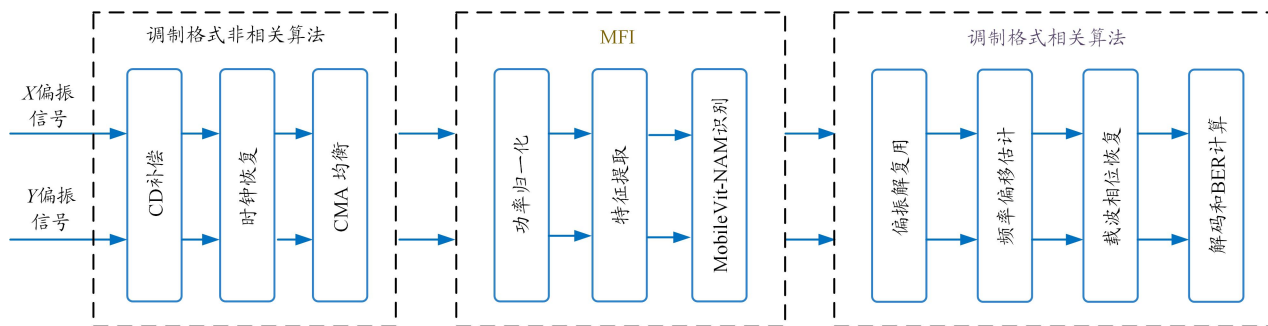


图 1 相干接收机中的离线 DSP 流程

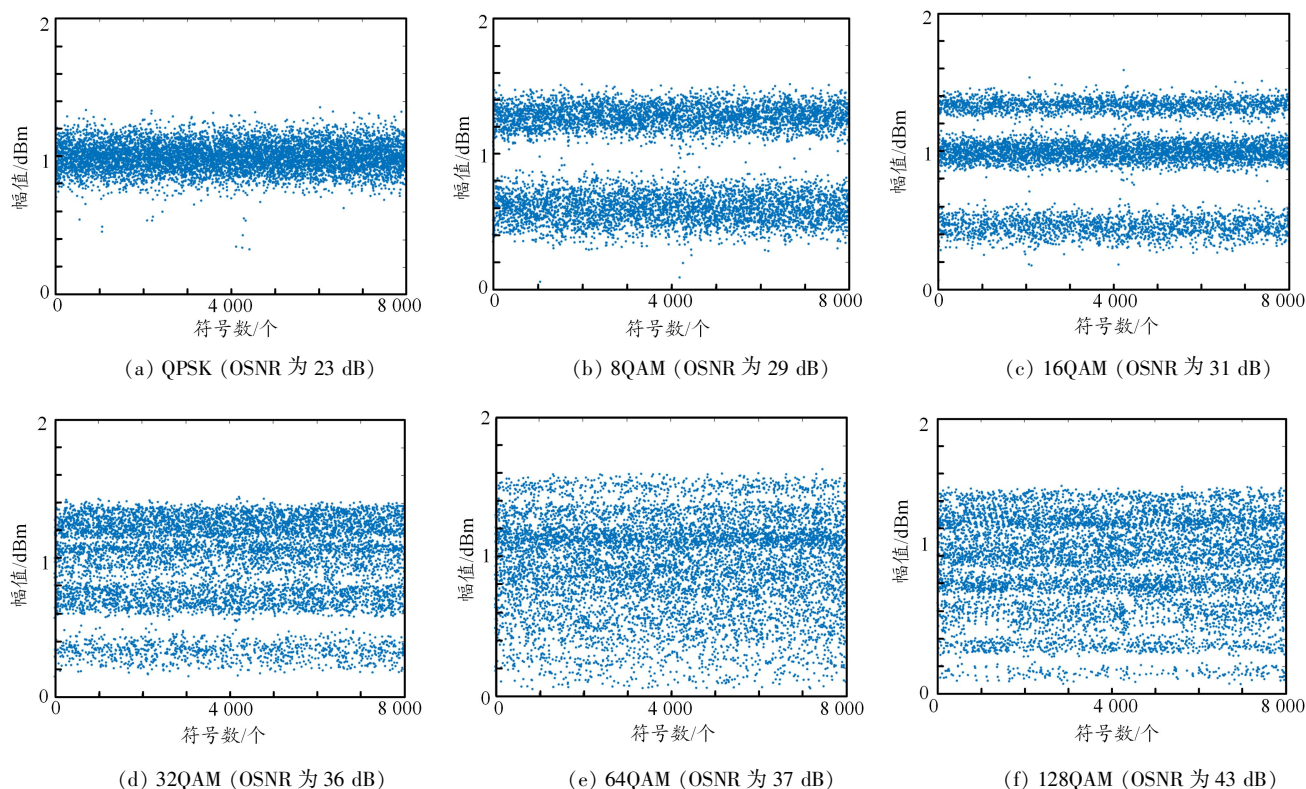
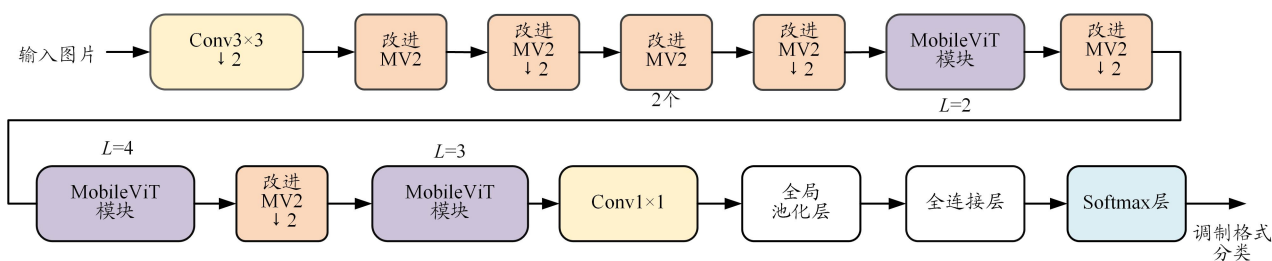


图2 幅值密度图



Conv: 卷积层; 改进MV2: 改进的MobileNetV2模块; $\downarrow 2$: 下采样; L: Transformer层数(堆叠次数)。

图3 MobileViT-NAM 的模型结构

出分类结果的 Softmax 层。其中,卷积层负责从输入特征图中提取基础特征,而 MobileViT 模块则高效地进行特征建模。该模型以 QPSK、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM 和 128QAM 等调制信号的幅值密度图作为输入,通过特征识别确定调制格式类型。

本文基于传统的 MobileViT 模型结构^[13],对 MobileNetV2 模块进行了改进,在深度(DW)卷积与原始 1×1 降维卷积之间插入了 NAM^[14]模块,形成了改进的 MobileNetV2 模块,如图 4 所示。由于 NAM 采用了

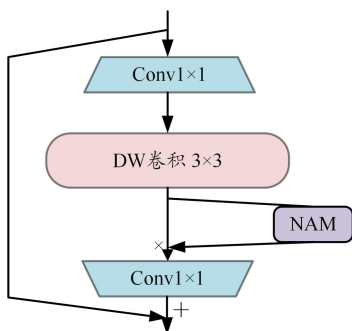


图4 改进的 MobileNetV2 结构

多个注意力头的设计,它可以有效地捕捉不同子空间的特征,从而增强了模型的表达能力和对复杂数据分布的学习能力。通过这种改进,不仅降低了计算复杂度,还增强了模型的感知能力。因此,相比传统的 MobileViT 模型,改进的 MobileViT-NAM 结构能够在不增加计算量的前提下,更有效地对输入信息进行建模,从而提升模型性能。

2 实验结果与分析

2.1 仿真设置

为了验证方案的可行性,本文使用 VPI 仿真平台构建了一个 28 GBaud 偏振复用(PDM)相干传输系统,系统结构如图 5 所示。该系统发射端中的激光器(ECL)发射波长为 1 550 nm、线宽为 100 kHz 的光束。

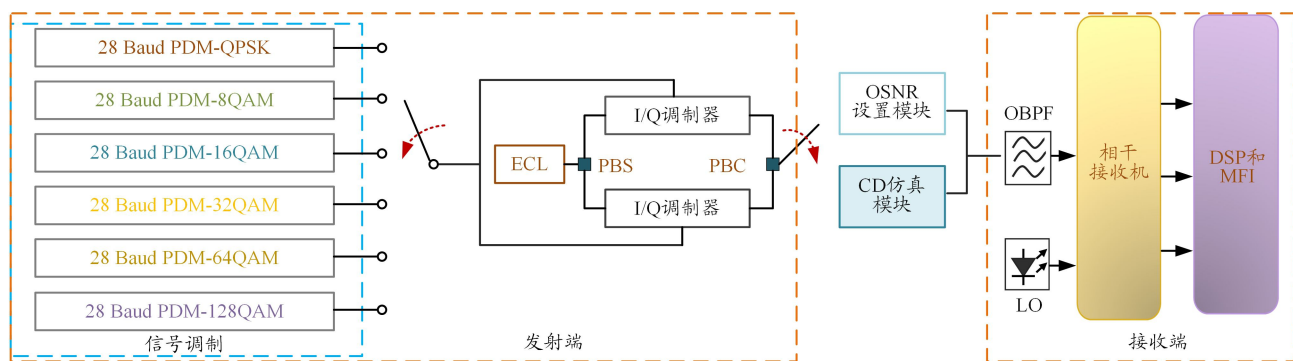


图5 PDM 相干传输系统结构

二进制电信号驱动的I/Q 调制器用于生成传输速率均为 28 GBaud 的不同 PDM 调制格式信号, 包括PDM-QPSK、PDM-8QAM、PDM-16QAM、PDM-32QAM、PDM-64QAM 以及 PDM-128QAM 信号。

传输链路由 CD 仿真和光信噪比(OSNR)设置 2 个模块组成。其中, OSNR 设置模块允许指定模拟的 OSNR 值, 而 CD 仿真模块则用于模拟不同水平的残余 CD 效应。

在系统接收端, 首先使用光域带通滤波器(OBPF)来滤除带外噪声, 随后信号在相干接收机中进行探测, 并利用 Matlab 软件对每次采集的数据进行 DSP。接着, 进行符号采样操作, 采样符号数设定为 8 000 个。最后, 基于 MobileViT-NAM 模型进行调制格式的识别工作。

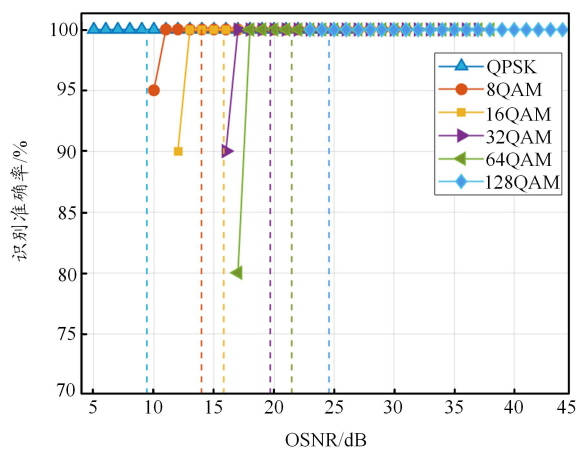
调制格式 QPSK、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM 和 128QAM 对应的 OSNR 范围分别为 5~26 dB、10~31 dB、12~33 dB、16~37 dB、17~38 dB 和 23~44 dB, 可变 OSNR 步长为 1 dB。每个 OSNR 生成 100 个仿真数据, 整个数据集包括 13 200 幅值密度图(每种调制格式各有 2 200 个数据集)。随机选取 80% 作为训练集, 20% 作为测试集。

2.2 实验结果与讨论

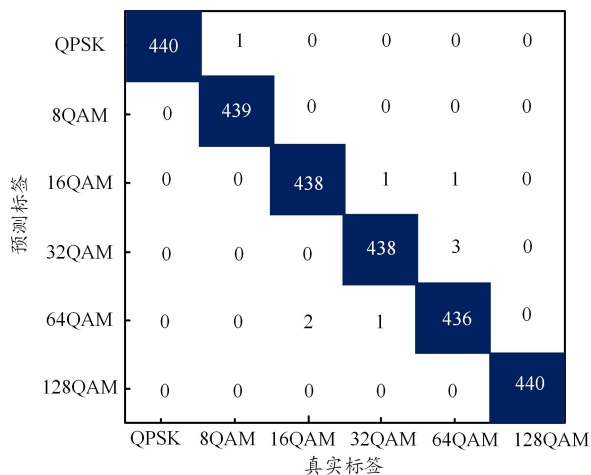
2.2.1 MFI 结果

为了验证所提方案的有效性, 首先研究了背靠背传输系统中 QPSK、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM 和 128QAM 的识别准确率。

6 种 MFI 准确率的仿真结果如图 6(a)所示, 测试集混淆矩阵如图 6(b)所示。从图 6(a)可以看出, QPSK、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM 和 128QAM 达到 100% MFI 准确率所需的最低 OSNR 值分别为 5、11、13、17、18、23 dB。垂直虚线表示对应的不同调制格式在 20%前向纠错(FEC)时的 OSNR 阈值。结果表明, 使



(a) 在不同 OSNR 值下的识别准确率



(b) 测试集的混淆矩阵

图 6 6 种 MFI 的实验结果

用幅度密度特征达到 100% 识别准确率所需的最低 OSNR 均低于相应的 20% FEC 阈值。图 6(b) 展示了测试集的混淆矩阵, 结果显示 QPSK 和 128QAM 均达到了 100% 的识别准确率。其余调制格式出现了错误分类的情况, 这是由于在低 OSNR 条件下, 相近调制格式的幅值密度图分布特征不明显, 相似度较高, 导致

分类错误,但发生这种情况的概率较低。总体而言,该方案在识别不同调制格式,尤其是高阶调制格式时,表现出非常高的稳定性和可靠性。

2.3.2 残余 CD 对 MFI 的影响

在离线 DSP 部分,CD 补偿算法能够有效地补偿大部分由于传输引起的 CD 失真,确保信号的完整性。然而,即使进行了 CD 补偿,仍可能存在一些未完全校正的残余 CD。这些残余 CD 可能会影响 MFI 方案的识别准确性。尽管 CMA 算法能够在一定程度上补偿这些残余 CD,但其效果有限,不能完全消除残余 CD 带来的影响。因此,为了保证所提出的 MFI 方案在实际应用中的可靠性和准确性,必须考虑残余 CD 对其性能的影响。通过仿真实验验证,所提出的 MFI 方法在不同色散条件下的识别准确率如图 7 所示。可以看出,6 种调制格式分别在 12、17、19、22、24、28 dB 的 OSNR 值下表现出了不同的性能。其中,QPSK、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM 在较宽的残余 CD 范围内仍能保持 100% 的识别准确率,对应的最大残余 CD 分别为: -1 200~1 200 ps/nm、-1 200~1 200 ps/nm、-840~480 ps/nm、-1 200~960 ps/nm、-480~540 ps/nm。相比之下,由于 128QAM 的振幅分级较多,对残余 CD 的容忍度较低,仅在 -240~180 ps/nm 内实现了 100% 的识别准确率。除此之外,实验结果表明,这 6 种调制格式在较宽的残余 CD 范围内均表现出了良好的容忍度。

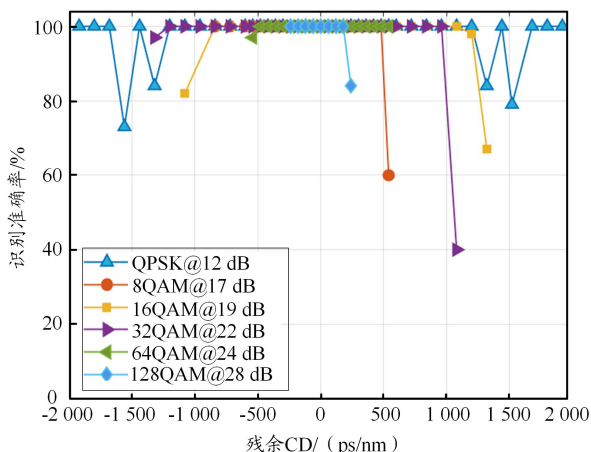


图 7 6 种调制格式在不同残余 CD 下的识别准确率

2.3.3 与不同方法的对比

为了进一步验证 MobileViT-NAM 模型的性能,本文将其与 MobileNet、ResNet、VGG-like^[14]以及 MobileViT 这 4 种深度学习方法进行了比较,对比结果如表 1 所示。可以看出,MobileViT-NAM 的识别准确率达到 99.62%, 优于其它 4 种方法。相较于 MobileNet、ResNet 和 VGG-like 模型,MobileViT-NAM 模型不仅

表 1 对比实验结果

模型	识别准确率/%	参数量/Mb	模型大小/Mb
MobileNetv2	98.71	9.173	8.74
ResNet	99.5	44.79	42.7
VGG-like	99.02	84.21	80.3
MobileViT	99.4	3.82	4.01
MobileViT-	99.62	3.83	4.02

保持了较高的识别准确率,还显著减少了参数量和模型大小,成功实现了模型的轻量化。此外,虽然与 MobileViT 模型在参数量上的差异不大,但 MobileViT-NAM 的识别准确率却提高了 0.22%。

3 结束语

本文提出了基于幅值密度特征的 MFI 方法。该方法具有两大优势:1)幅值密度图特征的有效性。相比于离散的幅值直方图,幅值密度图具有连续性,能够更全面地反映信号的幅值信息。这种连续性的特征不仅保留了信号的完整信息,还帮助模型更准确地捕捉不同调制格式间的细微差异。因此,利用幅值密度图作为特征进行调制格式识别,可以获得更高的准确率。2)模型的高效性与轻量化。实验结果显示,MobileViT-NAM 模型在保持较低复杂度的同时,通过引入 NAM 模块,增强了对全局和局部信息的感知能力。这一优化不仅减少了参数量和模型大小,还提高了识别准确率,展示了出色的轻量化效果和高效的性能,尤其是在处理高阶调制格式时表现出了较高的识别准确率,从而提升了模型的整体鲁棒性。该方案有望被推广至光网络中的其它数值监测领域,以实现更高效、更智能的光网络管理。在未来的工作中,我们计划进一步考虑长距离传输及 PMD 等传输条件对模型性能的影响,通过持续优化网络结构来增强模型的鲁棒性和适应性,从而拓展此方案的应用范围。

参考文献:

- [1] SAIF W S, ESMAIL M A, RAGHEB A M, et al. Machine learning techniques for optical performance monitoring and modulation format identification: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2839-2882.
- [2] YANG L, XU H, BAI C, et al. Modulation format identification using graph-based 2D stokes plane analysis for elastic optical network[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(1): 1-15.
- [3] ALRABEIAH M, RAGHEB A M, ALSHEBEILI S A, et al. Survey on applications of machine learning in low-cost non-coherent optical systems: potentials, challenges, and perspective[J]. Photonics, 2023, 10(6): 655-1-

周顺勇, 胡琴, 陆欢, 等: 基于幅值密度特征的调制格式识别方法

655-33.

[4] ZHAO Z, YANG A, GUO P, et al. A modulation format identification method based on amplitude deviation analysis of received optical communication signal[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 1-7.

[5] YU X, BAI C, XU H, et al. A modified PSO assisted blind modulation format identification scheme for elastic optical networks[J]. Optics Communications, 2020, 476: 126280-1-126280-11.

[6] XU H, YANG L, YU X, et al. Blind and low-complexity modulation format identification scheme using principal component analysis of Stokes parameters for elastic optical networks[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20249-20263.

[7] WEI Z, ZHANG J, LI W, et al. Active learning-aided CNN-based entropy-tunable automatic modulation identification for rate-flexible coherent optical system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(14): 4598-4608.

[8] 梁坤, 刘战胜. 基于联合残差网络和 Bottleneck Transformer 的调制格式识别方法[J]. 光通信技术, 2024, 48(3): 13-17.

[9] YANG F, BAI C, CHI X, et al. Intelligent joint multi-parameter optical performance monitoring scheme based on HT images and MT-resNet for elastic optical network[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 82: 103599-1-103599-12.

[10] ZHAO Y, YU Z, WAN Z, et al. Low complexity OSNR monitoring and modulation format identification based on binarized neural networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(6): 1314-1322.

[11] ZHAO J, LIU Y, XU T. Advanced DSP for coherent optical fiber communication[J]. Applied Sciences, 2019, 9(19): 4192-1-4192-20.

[12] KIKUCHI K. Performance analyses of polarization demultiplexing based on constant-modulus algorithm in digital coherent optical receivers[J]. Optics Express, 2011, 19(10): 9868-9880.

[13] MEHTA S, RASTEGARI M. MobileViT: light-weight, general-purpose, and mobile-friendly vision transformer[EB/OL]. [2024-06-05]. <https://arxiv.org/abs/2110.02178?context=cs>.

[14] LIU Y, SHAO Z, TENG Y, et al. NAM: normalization-based attention module[EB/OL]. [2024-05-23]. <http://arxiv.org/abs/2111.12419?context=cs>.