



光通信系统误差矢量幅度测量分析

赖俊森, 汤晓华, 汤瑞, 赵鑫, 赵文玉, 张海懿

(中国信息通信研究院技术与标准研究所, 北京 100191)

摘要: 高速光传输引入矢量调制格式对信号质量测量和性能分析提出了新的挑战和需求。误差矢量幅度(EVM)是测试评估矢量调制信号的重要参数,在分析 EVM 参数定义、测试方法和设备的基础上,讨论 EVM 及其相关参数测量的应用现状和标准化进展。

关键词: 误差矢量幅度;光信噪比;质量因子;误码率

中图分类号: TP913

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016159

Error vector magnitude measurement and analysis in optical communication system

LAI Junsen, TANG Xiaohua, TANG Rui, ZHAO Xin, ZHAO Wenyu, ZHANG Haiyi

Technology and Standard Research Institute, China Academy of Information and Communication Technology (CAICT), Beijing 100191, China

Abstract: Vector modulation format of high speed optical communication system calls for new measurement and analysis scheme. Error vector magnitude (EVM) is one of the most important parameters in vector modulation evaluation. The definition of EVM parameters, its test methods and instruments were analyzed, and application of EVM related parameter in transmitter measurement and its standardization progress were also discussed.

Key words: EVM, OSNR, Q factor, BER

1 引言

云计算、移动互联和物联网等新型业务的飞速发展提出了越来越高的网络带宽需求,从而推动高速大容量光传输技术不断向前发展。在已获广泛部署的 100 Gbit/s 光通信系统中,基于相干检测技术的偏振复用正交相移键控(DP-QPSK)码型调制取代 10 Gbit/s/40 Gbit/s 时代的强度调制直接检测成为主流,而超 100 Gbit/s 光通信系统为了进一

步提升系统容量与频谱效率,将会引入以多电平正交幅度调制(如 DP-16QAM)码型为代表的高阶矢量调制。在 100 Gbit/s 及以上速率的高速光通信系统中引入的相干检测技术和新型调制格式将会对系统性能的检测评估提出新的挑战和需求。

对于光通信系统而言,接收误码率(BER)是最本质的性能表征参数,BER 测量需要解开信号封装帧结构进行净荷分析,随着前向纠错(FEC)技术的发展,光通信系统接收机的误码率通常极低,进行准确的 BER 测试十分耗时

收稿日期:2015-10-08;修回日期:2016-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61171076, No.61201260, No.61471128);国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No. 2013AA013402, No.2015AA015502)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61171076, No.61201260, No.61471128), The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2013AA013402, No.2015AA015502)

且无必要。对于强度调制光信号,由眼图测量可定义质量因子: $Q=(\mu_1-\mu_0)/(\sigma_1+\sigma_0)$, 其中, μ_i 和 σ_i 分别为 1 和 0 电平的均值与方差,系统纠错前误码率(Pre-FEC BER)和 Q 值之间存在近似关系: $\text{Pre-FEC BER} \approx \text{erfc}(Q/\sqrt{2})/2$ 。随着相位调制和正交幅度调制格式的引入,基于线路侧时域检测的眼图测量和 Q 值物理定义不再适用,但上述数学近似关系依然成立,所以通过统计 Pre-FEC BER 计算 Q 值也是系统性能测试常用参数,但其无法准确反映传输通道特性,也不能区分不同损伤来源带来的影响。光信噪比(OSNR)是光层性能测试与评价的最重要指标之一,但其也无法全面反映光信号特性和损伤情况,例如在非线性受限的 100 Gbit/s 光通信系统中,提高入纤功率可以优化 OSNR,但引入非线性损伤却导致接收端信号质量劣化。在 100 Gbit/s 及以上速率的高速光通信系统中,由于调制速率的上升和偏振复用技术的引入,导致传统线性内插和偏振归零等 OSNR 测试方法难以使用,而研究准确的在线式 OSNR 监测技术也是目前光通信系统性能检测领域的一个热点和难点。

误差矢量幅度(error vector magnitude,EVM)是矢量调制信号质量评估的重要参数,在无线通信领域已获得广泛应用。EVM 测量能够同时反映多种损伤对星座点幅度和相位的不同影响,较为全面地评估发射机调制质量和信号传输性能,具有对信号速率与调制格式透明的优点。在软件定义网络的物理层架构中,光物理层的波特率、调制格式和频谱占用率等链路参数能够根据网络状态和业务需求进行灵活配置和调整,在此背景下进行准确和全面的光层信号质量检测与分析变得更加重要。国际标准化组织,例如 IEC、ITU-T 和 OIF 等已经对 EVM 的定义和测试方法及其在光通信领域的应用展开讨论并取得了一定进展。本文分析 EVM 参数定义、测试方法和设备,讨论 EVM 测量的应用和标准化进展。

2 EVM 参数的定义

矢量调制可以同时利用光载波的幅度和相位变化来加载数字信号,对于矢量调制信号,通常采用能够表征幅度与相位信息的复平面星座图(仅含采样判决点)或 IQ 图(包含采样过渡点)来显示。在如图 1(a)所示的星座图中,每个调制符号的采样判决点对应一个星座点,该点与理想参考点之间的位置偏差可采用误差矢量幅度进行描述:

$EVM(n) = \sqrt{[I_{\text{meas}}(n) - I_{\text{ref}}]^2 + [Q_{\text{meas}}(n) - Q_{\text{ref}}]^2}$, 其中, I_{meas} 和 Q_{meas} 需要进行幅度归一化处理。根据 IEC 标准,对于所有

星座图采样点,EVM 定义为其误差矢量幅度的均方根值:

$$EVM_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N EVM(n)^2}$$

,并以理想参考点中的最大矢量幅度为基准,表示为百分比值。在 ITU-T 的标准讨论中,还引入了一种新的基于星座图点命中率(hit ratio,HR)的 EVM 定义,即 $EVM_{\text{hit ratio}}^{[1,2]}$ 。对于 n 个星座图点,计算 $EVM(n)$ 并从大到小排序,以一定的命中率,如 $hr=5 \times 10^{-5}$,排除其中部分极大值点: $m=n-n \cdot hr$,则 $EVM_{\text{hit ratio}} = \max[EVM(m)]$,同样以理想参考点最大矢量幅度为基准表示为百分比值。如果在 IQ 图中对包含采样过渡点在内的所有 IQ 图点计算 EVM_{rms} ,则可以得到单个符号周期的时域解析 EVM 分布(TR-EVM),如图 1(b)^[3]所示,其中,半符号周期处为理想采样判决位置,TR-EVM 可以定性地反映调制符号的信号质量,有厂商提出采用类似眼图模板的 TR-EVM 模板进行矢量调制信号质量评价。

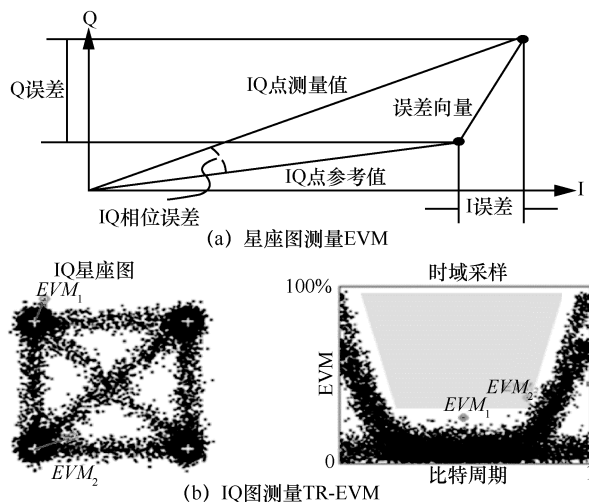


图 1 EVM 定义与测量原理

3 EVM 参数测试方法与设备

对矢量调制信号进行 EVM 测试主要采用相干检测和线性光采样两种方法,如图 2 所示。其中相干检测使用与信号光相同波长的窄线宽连续光源作为本振光 (LO),与信号光进行偏振与相位分集的相干混频和平衡探测,完成矢量调制信号光场到电场的线性搬移,其实现过程与相干光通信系统接收机完全相同。线性光采样在相干混频与平衡探测部分与相干检测一致,区别在于使用满足采样信号频谱完全覆盖信号光谱要求的低重复频率的超短光脉冲采样信号作为本振光源与信号光进行相干混频,并同步触发模数转换进行峰值采样,完成对于信号光场的等效时间

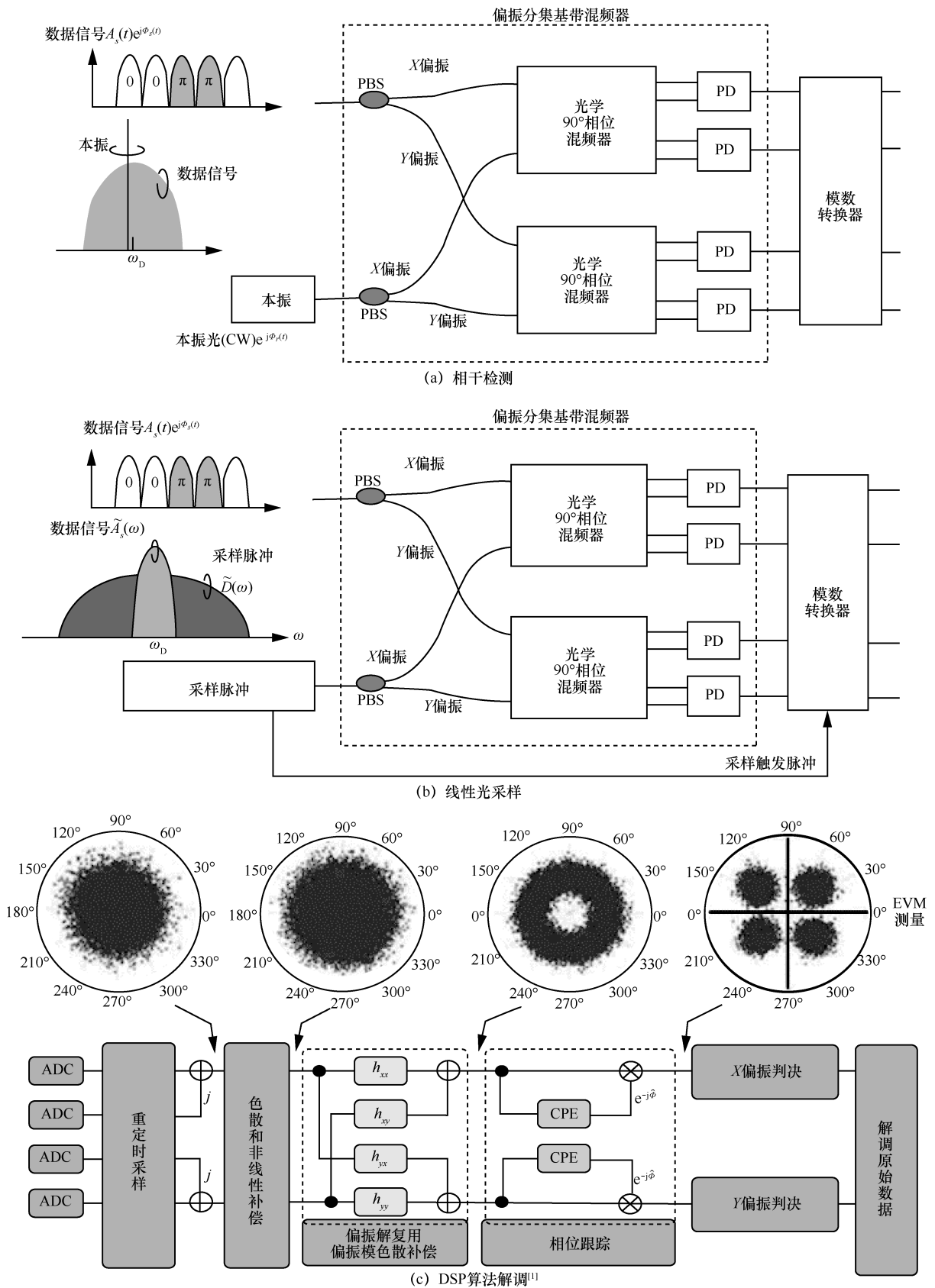


图2 相干光通信中的EVM测量

采样。线性光采样的优点在于可以使用低带宽的电域处理系统对高速光信号进行测量,可监测光信号的速率理论上仅受采样光脉冲最小脉宽的限制,但其中的等效时间采样相当于对光信号在单个符号周期内进行遍历采样,丢弃了时域信息无法进行数字信号码流的解调和分析。相干检测和线性光采样的 DSP 算法解调过程基本一致,首先经过重采样时钟恢复,进行线性和非线性损伤补偿,之后做偏振解复用与信号相位恢复,即可得两个偏振态信号的星座图(相干检测)或 IQ 图(线性光采样)进行 EVM 测试。相比于 BER 和 Q 值测试,EVM 无需对解调信号进行判决、纠错和帧结构解析,DSP 解调部分的处理相对简单。

目前,基于相干检测技术的光调制分析仪(OMA)主要包括是德科技(原安捷伦)的 N439x 系列和泰克科技的 OM4000 系列等,而线性光采样调制分析仪主要是 EXFO 公司的 PSO-200 系列,基于相干探测的 OMA 受电域采样和处理器件的带宽限制,最大模拟带宽难以突破 70 GHz 瓶颈,而线性光采样 OMA 则不存在模拟带宽的电子瓶颈,但等效时间采样方式无法获得采样判决点星座图,也不能存储和解调分析真实码流,监测分析能力受限^[9]。此外,由于相干探测 OMA 的 LO 光自身存在线宽和相位噪声的影响,会使 EVM 检测引入误差,需要考虑 EVM 测量的不确定度并消除其影响,例如参考文献[5]中采用将 EVM 参数溯源至已校准光源光功率的方法,能够有效地进行 EVM 测试准确性的溯源和比对。

4 EVM 测量应用及标准化进展

EVM 参数可以表征矢量调制信号的电场信息,包含了发射机、传输信道和接收机的影响,同时与 DSP 数字解调算法关系密切。对于同为电层性能参数的 Q 值,在加性高斯白噪声(AWGN)信道和忽略接收机热噪声与散弹噪声影响的情况下,EVM 和 Q 有关系近似为: $Q_{m-QAM} \approx 1/[\sqrt{2} \cdot (\sqrt{m} - 1) \cdot EVM_{rms}]$,其中, m 为矢量调制格式的阶数。在同样的近似条件下,对于光层性能参数 OSNR,可以得到 EVM 和 OSNR 间的近似关系: $EVM_{rms} = 1/(k\sqrt{OSNR})$,其中, k 与矢量调制阶数和接收机电层噪声基底有关。在采用 SHF46215B+N4391A 的实验平台 EVM 测试和多厂商发射机 EVM 测试中,EVM 和 Q 值的近似关系基本吻合,在低 OSNR 区间(<22 dB),EVM 和 OSNR 测量结果与近似关系式基本吻合,但在高 OSNR 区间,由于接收机噪声影响明显,上述近似关系不再成立。

对于矢量信号 IQ 调制而言,多种发射机损伤均会对调制信号质量产生影响。EVM 及相关参数监测可以对 IQ 调制发射机性能进行全面测试评价。如图 3 所示,低频的驱动电压幅度噪声引入 EVM 幅度误差,激光器线宽和相位噪声引入 EVM 相位误差,IQ 调制器两路输入电压不同导致 IQ 增益不平衡,相位调制器偏置电压误差引入正交误差,数据调制器偏置电压误差导致整个星座图的 IQ 偏移,IQ 驱动信号之间的定时误差产生 IQ 时延,影响过渡采样点分布。对包含损伤的发射机光信号进行 EVM 测试,需要对损伤进行算法预补偿以消除其影响,例如 IQ 偏移、增益不平衡和正交误差等,才能够保证 EVM 参数测量结果的有效性。通过补偿算法对上述损伤相关参数进行定量分析与 EVM 参数测量结果相结合,可以对 IQ 调制发射机性能进行较为全面的评估。

在发射机 EVM 相关参数测试中,需要考虑在不同损伤情况下,EVM 参数变化与引入的 OSNR 代价之间的关系,同时分析不同损伤叠加情况下 EVM 参数的变化规律以及 EVM 不同定义和参数选择的问题。其中,图 4(a)所示 OSNR 劣化导致两种不同定义的 EVM 参数变化的趋势较为一致,但 $EVM_{hit ratio}$ 参数中的命中率选择对测试结果存在影响,根据第 2 节中的定义可知,由于 $EVM_{hit ratio}$ 测试关注的是星座图点分布的边界状态而非统计状态,所以不同命中率的选择直接关系排除星座图极值点的数量以及最终的测试结果,命中率选择越小,则极值点的影响越明显, $EVM_{hit ratio}$ 的稳定性越差,但命中率选择过大则有可能导致 $EVM_{hit ratio}$ 对于信号损伤变化的不敏感,需要折中考虑。图 4(b)为 IQ 不平衡和正交误差并存时的 EVM 参数测量结果,在无正交误差的情况下,EVM 参数随 IQ 不平衡的劣化而增大,但是在星座图点存在正交误差时,IQ 不平衡的劣化对 EVM 参数的影响是先减小后增大,说明 IQ 不平衡和正交误差两种损伤之间存在一定的相互补偿关系而非简单的线性叠加。此外,由图 4(b)可见,在多损伤并存的条件下, EVM_{rms} 参数相较于 $EVM_{hit ratio}$ 参数具有更大的测试结果动态范围和更优的变化趋势一致性,所以参数能够更加准确反应并存损伤的影响。

在标准化方面,IEC 在 2013 年公布了 TR 61282-10:2013 标准,定义了使用 EVM 参数进行矢量调制信号质量分析的方法、EVM 参数的测试手段以及 EVM 参数与其他相关参数,例如幅度误差、相位误差和正交误差等的关系和影响。ITU-T SG15 Q6 在 2012 年开始修订面向城域波分互联的 G.698.2 标准,对矢量调制信号的 EVM 参数

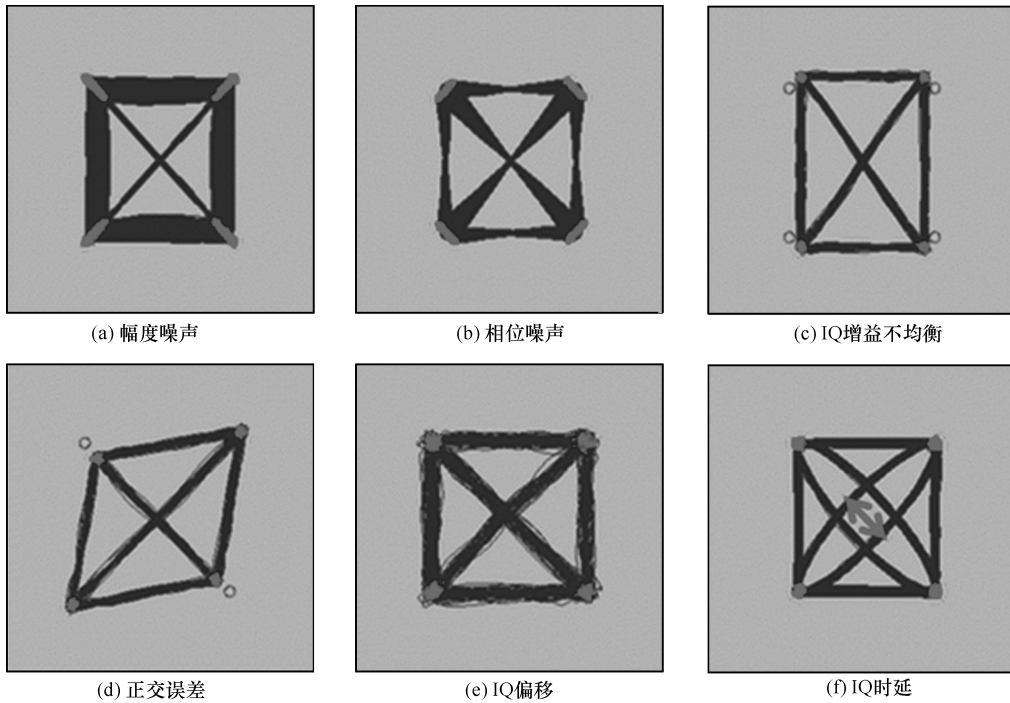


图3 不同发射机损伤的星座图

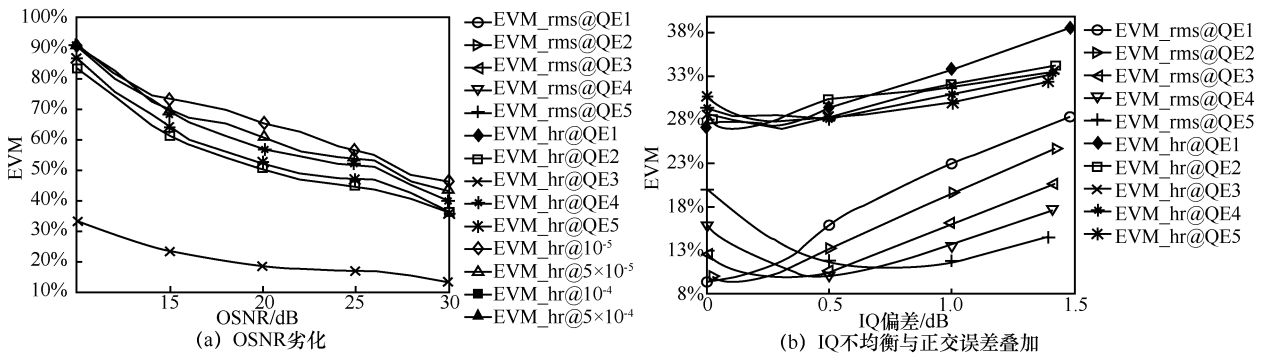


图4 发射机损伤EVM测试结果

进行讨论,在和两种参数定义之间进行评估和选择,进一步提出关于EVM、IQ偏移、正交误差、增益不均衡等损伤的测量计算式。由于EVM及相关参数的定义和赋值需要大量的测试验证和结果分析讨论,测试模型中某些损伤条件难以在商用产品中模拟,并且通用EVM测试环境中的具体硬件配置和补偿算法尚未达成一致,所以该标准的推进较为缓慢,目前新版本推出尚无明确时间节点。

5 结束语

EVM是矢量调制信号质量测试和性能评价的关键参数,既能够包含信号光层的调制信息和传输信道状态,也能够体现接收机电层的模拟前端性能和信号解调算法,同时无需对信号帧格式进行解析,能够较为全面地反映信号

质量信息,对于高速光通信系统的测试评估和运维管理具有重要价值。EVM测试的参数定义、测试方法和测试手段基本明确,但在实际应用中面临相干检测与系统接收机差异以及解调算法一致性等方面的问题,就目前的标准化情况而言,EVM是保证异厂商互操作性的关键性能指标参数,需要进一步的实验验证与分析,在光通信系统中作为性能监测评价的标准依据正式推广应用还需一定时间。

参考文献:

- [1] ITU-T G.698.2 [S/OL]. [2016-03-05]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.698.2/en>.
- [2] SCHMOGROW R, NEBENDAHL B, WINTER M, et al. Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012,

24(1): 61-63.

[3] IEC TR 61282-10[S/OL]. [2016-03-05]. <https://webstore.iec.ch/publication/5100>.

[4] 沈世奎, 满祥银, 简伟, 等. 100G 系统中的误差矢量幅度参数应用[J]. 邮电设计技术, 2014(4): 9-12.

SHEN S K, MAN X K, JIAN W, et al. The application of error vector magnitude parameters in 100G system [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunication, 2014(4): 9-12.

[5] 孙小强, 陈龙泉, 周峰, 等. 相干光传输系统中光调制信号分析仪溯源方法研究[J]. 计测技术, 2015(S1): 1-3.

SUN X Q, CHEN L Q, ZHOU F, et al. Research on the optical modulation analyzer traceable measurement technology in coherent optical transmission systems [J]. Metrology & Measurement Technology, 2015(S1): 1-3.

[作者简介]



赖俊森(1983-),男,博士,中国信息通信研究院技术与标准研究所高级工程师,主要研究方向为高速光传输与光网络技术。



汤晓华(1981-),女,中国信息通信研究院技术与标准研究所工程师,主要研究方向为高速光传输与光网络技术。



汤瑞(1984-),男,中国信息通信研究院技术与标准研究所工程师,主要研究方向为高速光传输与光网络技术。



赵鑫(1984-),男,中国信息通信研究院技术与标准研究所工程师,主要研究方向为高速光传输与光网络技术。



赵文玉(1973-),男,博士,中国信息通信研究院技术与标准研究所主任工程师,主要研究方向为 40 Gbit/s/100 Gbit/s/WDM、OTN 等光传送网新技术研究、标准制订以及系统测试评估。



张海懿(1974-),女,中国信息通信研究院技术与标准研究所高级工程师、部门主任,主要研究方向为光传输系统、OTN、PTN、WDM 系统、SDH 系统、MSTP、自动交换光网络以及电信传送网络体制标准、运营商技术咨询。