光通信系统与网络技术

100 Gbit/s DP-QPSK 调制光星座图测试及分析

黄 莹[1,2,3],胡 毅[1,2,3],余少华[1,2],邹 晖[1,2,3]
(1.光纤通信技术和网络国家重点实验室,湖北 武汉 430074; 2.武汉邮电科学研究院,湖北 武汉 430074;
3.武汉电信器件有限公司,湖北 武汉 430074)

摘要:由于调制光信号质量的好坏影响到传输和接收信号质量的好坏,因此对 100 Gbit/s 系统中的数字光信号的测量与分析十分重要。文章对 100 Gbit/s transponder 中调制光信号的生成原理进行了分析,对数字光信号测试中的 OSNR(光信噪比)、EVM(误差矢量幅值)和星座图等几个参数进行了必要的理论探讨。同时也分析了各种 QPSK(四相相移键控)信号星座图的图形,为使用调制器分析问题提供了有效参考。

关键词:双极化四相相移键控发射机;QPSK 调制信号;光信噪比;误差矢量幅值;星座图
中图分类号:TN761.8 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-8788(2012)04-0001-03

Test and analysis of constellation map of 100 Gbit/s DP-QPSK modulated optical signals

Huang Ying[1,2,3], **Hu Yi**[1,2,3], **Yu Shaohua**[1,2], **Zou Hui**[1,2,3]
(1. State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan Research Institute of Post and Telecommunications, Wuhan 430074, China;
3. Wuhan Telecommunication Devices Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: As the quality of the modulated optical signals is associated with that of the transmitted and received signals, it is very important to test and analyze them. This paper describes the generating principle of the modulated optical signals in 100 Gbit/s transponder modules and conducts the necessary theoretical exploration of such parameters as Optical Signal Noise Ratio (OSNR), Error Vector Magnitude (EVM) and constellation map involved in digital optical signal tests. In addition, it analyzes the graphs of constellation maps of various QPSK signals, offering an effective reference for the analysis by transmitters.

Key words: DP-QPSK transmitter; QPSK modulated signal; OSNR; EVM; constellation map

0 引 言

随着对高速光信号研究的深入,复杂调制格式的测试面临新的挑战。幅度调制和相位调制凭借其较简单的调制实现和优良的传输性能受到人们的重视。用眼图来衡量数字光纤通信系统数据传输的特性是一种简单而又有效的方法。然而眼图并不能反映载波的相位信息,高速光纤通信系统中仅依靠眼图已经不能适应测试的需要。

1 100 Gbit/s 信号调制

100 Gbit/s DP-QPSK(双极化四相相移键控)发射机结构功能框图如图 1 所示。CW(连续波)激光器产生的光信号由 BS(束分离器)分成两路正交的极化光束(X 极化态,Y 极化态)。每个极化态的 QPSK(四相相移键控)调制器由两个单臂驱动 MZM(马赫曾德调制器)组成。4 个 MZM 分别由 112 Gbit/s数据经过串/并变化得到的4路28 Gbit/s

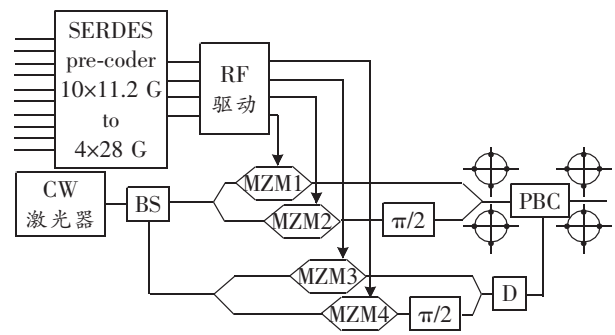

图 1 发射机结构功能框图

RF(射频)信号驱动。一个 MZM 的输出光信号与另一个 MZM 加上 π/2 相位延迟(D)后输出的光信号形成两路正交调制信号(分别记为 I、Q 路),将这两路信号通过 PBC (极化束耦合器)则形成一束 QPSK 已调极化光信号。

2 调制光信号的几个表征量

2.1 OSNR(光信噪比)

从 10 Gbit/s 系统升级到 100 Gbit/s 系统,OS-

收稿日期:2012-01-30
基金项目:国家"九七三"计划资助项目(2010CB328300)
作者简介:黄莹(1987-),女,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事高速光电模块的研究开发。

NR 需要提高 10 dB，而 CD（色度色散）和 DGD（差分群时延）需要降低到原有值的 10%。为达到 100 Gbit/s系统的超长距离传输要求，在误码率 $BER=1.0\times10^{-3}$ 的条件下，背靠背系统的光调制信号 OSNR 容限应达到 14～15 dB。OSNR 容限的测试配置如图 2 所示。

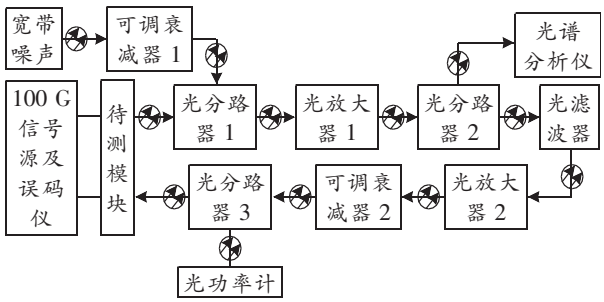

图 2　OSNR 容限测试配置

调整可调衰减器 2，改变待测入光，确保平均输入光功率在最佳输入光功率范围，使得此时整个光路系统的误码率为 1.0×10^{-7}。调整可调衰减器 1，改变光路的 OSNR，同时调整可调衰减器 2 保持平均输入光功率不变，观察此误码率下对应的 OSNR。用此方法分别得到误码率为 1.0×10^{-6}、1.0×10^{-5} 和 1.0×10^{-4} 时的 OSNR 值，根据不同误码率下的 OSNR 值，通过线性外推的方法计算出 1.0×10^{-3} 误码率下的 OSNR 值即为 OSNR 容限。

2.2　星座图

信号星座或信号空间是表示 QPSK 的最佳方法，星座图坐标轴如图 3 所示。

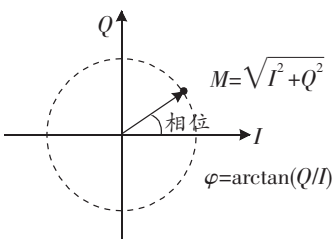

图 3　星座图坐标轴

图中，圆点表示相位调制信号，这些点位于两个正交的坐标轴（I 轴和 Q 轴）之间，这两个坐标轴分别表示同相和正交分量。I、Q 分别表示信号在坐标轴中的坐标；合成矢量的幅度 M 表示载波的幅度；合成矢量与 I 轴的夹角 φ 表示载波相位。

如图 4 所示，对基带信号作归一化处理，输入的基带 I、Q 信号通过光信号采样[1]，采样时间根据信号速率的不同而不同。每两个比特映射到星座图的一个点上。每两个比特一组[D1，D0]，首先被预编码为一个符号，这个符号被映射为相移，该相移根据它所表示的信号组合在（π/4，3π/4，5π/4，7π/4）4 个值中取值。

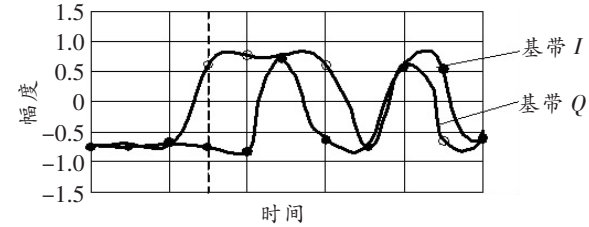

图 4　扫描 I、Q 载波信号

当信号从一个点移向另一个点时，相位调制就完成了。I、Q 信号分别是在 X 轴和 Y 轴上的投影，因此可以通过改变 I、Q 驱动信号的幅度映射 I-Q 空间中的任意一点。在 I、Q 信号中传送的只有预先定义的几个值，代表不同的状态，一个调制的协议针对每个调制形式规定允许的状态数量。

数字信号的每一个信号（也称作符号）在星座图上有一个相应的位置，如果这个信号是理想信号，它在星座图方框内就是一个点，方框线即为相邻信号的判决门限，该方框由星座图仪设置。由于受各类噪声、干扰的影响，它每次的位置都不一样，但都是在中心位置附近。每次取样下来，则形成雾状的圆点。因为星座点在星座图上的位置依赖于载波的幅度和相位，所以幅度与相位的噪声将对群集上的位置产生影响。幅度噪声改变原来的距离，相位噪声改变旋转位置。在某些星座图测试仪器上能设置信号模，认为在模内的为有效信号，模外信号为误码。通过在测试仪器上分析星座图形状及分布特点，能够得知信号的良好程度和存在的问题，为分析干扰来源提供线索。

2.3　EVM（误差矢量幅值）

EVM 是数字通信系统中量化矢量调制信号质量的通用指标。随着相干光通信技术的应用，EVM 也应用于了光纤通信[2]。它表示 I-Q 分量与理想分量的接近程度，如图 5 所示。

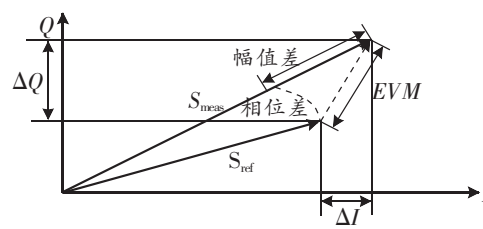

图 5　星座图坐标

定义参考信号为

$$S_{ref}^{\gamma}=\begin{pmatrix} I_{ref}^{\gamma} \\ Q_{ref}^{\gamma} \end{pmatrix},$$

式中，$\gamma=1\ldots M$，M 为多电平调制格式的字符数目；I_{ref}^{γ} 为参考信号在坐标轴上的 I 坐标；Q_{ref}^{γ} 为参考

信号在坐标轴上的 Q 坐标。

定义测得的信号为

$$S_{\mathrm{meas}}(n)=\begin{pmatrix} I_{\mathrm{meas}}(n) \\ Q_{\mathrm{meas}}(n) \end{pmatrix},$$

式中，$I_{\mathrm{meas}}(n)$ 为测得的第 n 个信号在坐标轴上的 I 坐标；$Q_{\mathrm{meas}}(n)$ 为测得的第 n 个信号在坐标轴上的 Q 坐标。

第 n 个采样信号的 EVM 定义为

$$EVM(n)=|S_{\mathrm{meas}}(n)-S_{\mathrm{ref}}^{\gamma(n)}|。$$

全部信号的 EVM 可定义为 EVM 的均方根值：

$$EVM_{\mathrm{rms}}(n)=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}EVM(n)^2}\times 100\%,$$

对测得的采样信号 S_{meas} 作归一化，以减小参考星座字符的偏差。

3　星座图与发射机调制信号质量的关系

根据设置 D 时间的不同，可产生两种不同方式的调制，一种为字符对齐方式，另一种为字符交织方式，这两种方式对抑制非线性有不同的效果[3]。可在图 1 所示结构中的 CW 激光器和 BS 之间加入 RZ(归零)码整形器[4]，通过改变光脉冲形状进一步抑制和补偿光传输损伤。

在文章中出现的眼图为单极化态 I 通道或 Q 通道的眼图，此眼图可将某通道内的两个相位状态视为“0”电平或“1”电平。

理想 QPSK 星座图及 I、Q 通道眼图如图 6(a)所示，星座图严格对称，I、Q 相位上眼图清晰。以下如未作特殊说明，则星座图为 X 极化态的星座图，上眼图为 I 通道，下眼图为 Q 通道。

图 6(b)中，星座图中 I、Q 信号并未垂直，显然图 1 中控制 I、Q 正交的偏置电压并不是最优的。图 6(c)中，I 通道眼图交叉点过大，说明控制 I 通道的偏置 B1 不是最佳的。调制器过度驱动或不良的有源器件会导致信号失真，产生增益压缩，4 个角落被扭曲，造成 4 个边变成“弓形”。图 6(d)中，I 通道与 Q 通道的增益不平衡，这是由其驱动信号 RF_1 和 RF_2 引起的。图 6(e)中，眼图完整，但是交叉点不在竖直方向上对齐，I、Q 数据偏移，这是由于驱动信号 RF_1、RF_2 在时间上不对应引起的。图 6(f)中，眼图左右两边出现多线，I、Q 通道驱动信号 RF_1 和 RF_2 可能包含某些来源于驱动电路或串/并转换器(SERDES)的固有抖动。图 6(g)中，星座图正常，但是眼图左右多线，决定眼图左右线的是时钟。I、Q 通道驱动信号(RF_1 和 RF_2)的时钟在随机抖动。图 6(h)中的问题是由啁啾引起的，啁啾一般来源于数据调制过程中。图 6(i)中，星座图模糊，眼图多线，是由功率不足引起的，显然发射部分信噪比过低，光功率过低。图 6(j)中没有眼图显示，正常眼图中比较明显的是有 4 个比较亮的星座点，对比可知，出现此星座图的原因是极化态间的串扰，影响极化的原因只能是通过 BS 时极化复用效果不好。

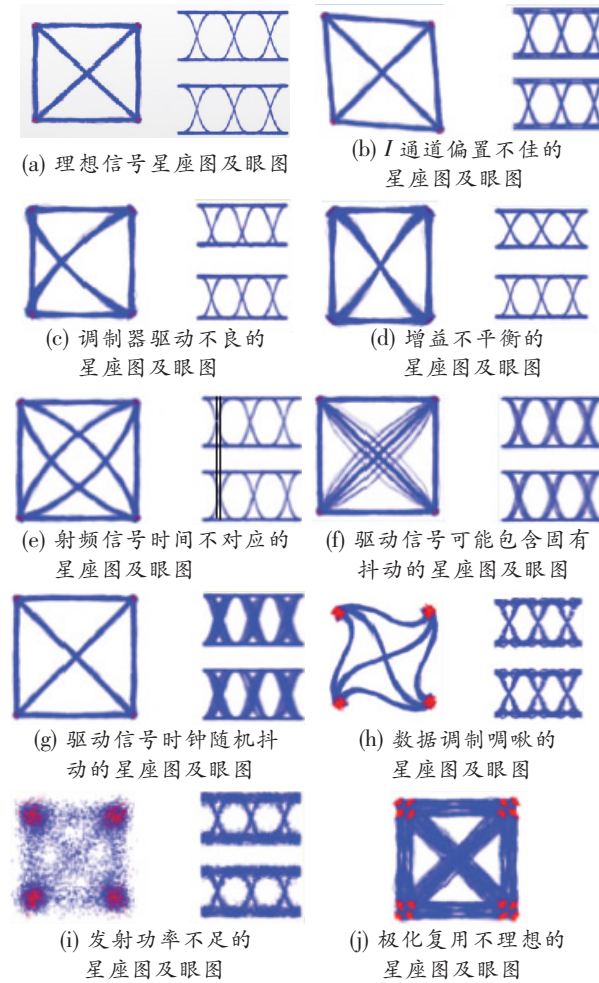
(a) 理想信号星座图及眼图
(b) I 通道偏置不佳的星座图及眼图
(c) 调制器驱动不良的星座图及眼图
(d) 增益不平衡的星座图及眼图
(e) 射频信号时间不对应的星座图及眼图
(f) 驱动信号可能包含固有抖动的星座图及眼图
(g) 驱动信号时钟随机抖动的星座图及眼图
(h) 数据调制啁啾的星座图及眼图
(i) 发射功率不足的星座图及眼图
(j) 极化复用不理想的星座图及眼图

图 6　故障问题对应的星座图及眼图

4　结束语

过去几年高速数据测量喜人的研究成果预示着对高速数据通信系统中的信息诊断是很有必要的。用于发送信息的光脉冲性能是否能使通信系统性能最优化，也需要用测量方法进行判断。在数据信息发送前发现问题并解决问题，优化发射信号，有利于信息的传递和接收。DP-QPSK 作为目前城域网、核心网中主流的调制技术之一，其信号形成原理及调制过程中可能存在的问题的处理无疑对是否能有效适应长距离传输起着至关重要的作用。

(下转第 32 页)