

16-QAM 相干光纤通信系统星座图的优化与选择

刘继红, 李佳泯, 梁 猛

(西安邮电学院 电子工程学院, 西安 710121)

摘 要: 基于 16-QAM 的相干光纤通信系统其抗噪声能力与调制格式的星座图特征密切相关。文章分析了 Star 16-QAM 的星座图在各种圈比下受噪声影响的特性, 通过数值计算获得了在不同噪声条件下星座图的最佳圈比。研究了 Square 和 Star 两种 16-QAM 对激光相位噪声的要求, 分析结果表明, 获得相同的 BER 性能时, Star 16-QAM 由激光相位噪声引起的光信噪比代价更小。

关键词: 相干光通信; 16-QAM; 星座图; 激光相位噪声

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2012)01-0110-03

Constellation Optimization and Selection for 16-QAM Based Optical Coherent Systems

LIU Jihong, LI Jiamin, LIANG Meng

(School of Electrical Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, CHN)

Abstract: The transmission performance of 16-QAM based optical coherent systems seriously depends on the constellation of modulation formats. In this paper, the effects of noise on Star 16-QAM under different ring ratios were analyzed, and the optimal ring ratios were obtained with different noise conditions. The requirements of laser phase noise for both Square and Star 16-QAM are analyzed, and the results show that Star 16-QAM has the smaller optical SNR penalty induced by laser phase noise at the same BER level.

Key words: coherent optical communications; 16-QAM; constellation; laser phase noise

0 引言

高阶调制格式和相干接收技术结合是未来提高频谱利用率、增加光纤通信系统传输容量的主要方法之一^[1-3], 而 16-QAM 已逐渐成为 100 Gbit/s 及以上速率相干光纤传输系统中采用的重要调制格式^[1,3]。16-QAM 有多种类型的星座图, 但实际应用中主要是 Square 和 Star 两种。Square 16-QAM 具有调制简单的特点而被广泛采用, 但这种调制格式其星座图中间一圈上的星点相位分布不均匀, 造成部分星点之间相位距离过小, 对相位噪声敏感。与 Square 16-QAM 刚好相反, Star 16-QAM 星座图

中两圈上星点的相位分布是均匀的, Semietz^[4]已证明 Star 16-QAM 对激光相位噪声(LPN), 即激光线宽的要求比 Square 16-QAM 宽松。Star 16-QAM 目前面临的主要问题是调制实现难度较大, 所幸的是, 已有关于这种调制格式新实现方法的报道^[5]。

本文首先讨论 Square 和 Star 两种 16-QAM 调制格式星座图的特点; 然后从相干接收性能的角度出发, 仿真分析 Star 16-QAM 的接收性能, 研究星座图中内外两圈的最佳比例与噪声特征的关系, 找出不同噪声条件下的最佳圈比; 在此基础上, 比较 Star 和 Square 两种 16-QAM 对激光器线宽要求的差异, 进一步阐明了 Square 16-QAM 对相位噪声敏感的机理。

收稿日期: 2011-09-20.

基金项目: 陕西省教育厅科技计划项目(11JK1006); 西安邮电学院博士基金项目(000-1253).

1 16-QAM 的星座图

Square 和 Star 16-QAM 的星座图分别如图 1(a)和(b)所示。Square 16-QAM 星座图中各星点的坐标由 $[-3, -1, 1, 3]$ 中任意两个的组合构成,因此调制时加载到调制器上的同相分量(I)和正交分量(Q)分别取 4 种电压状态即可,易于调制实现,而 Star 16-QAM 则需要更多的电压状态。Square 16-QAM 中相邻星点的幅度距离相等,这种分布对加性白高斯噪声(AWGN)是最优的,而实际中相干光纤通信系统中采用的激光器往往具有较大的相位噪声,这种噪声其统计特性与 AWGN 不同,会引起星座图上星点的旋转。Square 16-QAM 中内外两圈上的星点之间相位是均匀分布的,而中间圈上的点很不均匀,因此对 LPN 而言, Square 16-QAM 并不是最优的星座图。相反, Star 16-QAM 两圈上的星点相位是均匀分布的,具有最佳的抗 LPN 性能。

当只有 AWGN 时,若 Star 16-QAM 中外、内两圈的半径之比为 1.8(如图 1(b)所示),即星点 A 与相邻最近的 B、C、D 三点之间距离相等时性能最佳。但当 AWGN 和 LPN 同时存在时,因为 LPN 引起星点旋转,改变了相邻各点之间的距离,且内外两圈符号之间的幅度距离不相等,该圈比是否最佳,值得进一步探讨。

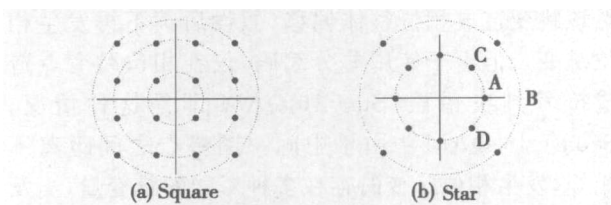


图 1 16-QAM 的星座图

2 优化 Star 16-QAM 的星座图

2.1 噪声影响的直观解释

图 2 是圈比为 1.6 和 2.1 的 Star 16-QAM 星座图分别叠加 AWGN 及 LPN 后的情况。仅考虑 AWGN 时,小的圈比(图 2(a))造成内外两圈之间距离减小,难以区分符号属于哪一圈而引起误码;而大的圈比(图 2(b))使内圈半径过小,误码将主要由内圈符号的混叠造成。如前所述,在只有 AWGN 的情况下 1.8 的圈比是最佳的。当 AWGN 和 LPN 同时存在时,情况要复杂一些。需要说明的是,当存在 LPN 时,为了获得和只有 AWGN 时相同的 BER,需要增大 SNR,因此图 2(c)和 2(d)中 SNR

分别大于图 2(a)和 2(b)。图 2(c)中虽然圈比仍然为 1.6,由于增大了 SNR,内外两圈之间具有清晰的界限,但 LPN 使得内圈的符号混叠严重,而图 2(d)中由于内圈半径过小,AWGN 和 LPN 二者的作用叠加增强,BER 会更大。可见,Star 16-QAM 的 BER 性能与圈比的关系密切,以下将通过仿真计算寻找不同噪声条件下的最优圈比。

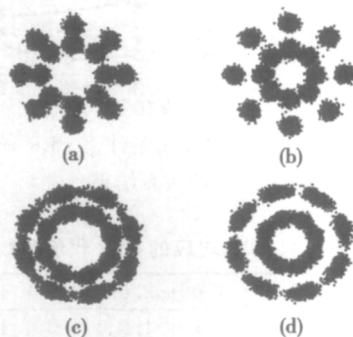


图 2 不同噪声和圈比条件下的 Star16-QAM 星座图:(a) AWGN, 1.6; (b) AWGN, 2.1; (c) AWGN 和 LPN, 1.6; (d) AWGN 和 LPN, 2.1

2.2 仿真结果

仿真模型中假设光纤色散被完全补偿,传输中不存在非线性效应;激光相位噪声用维纳过程表示,相位噪声的方差为 $2\pi \cdot \Delta\nu \cdot T_s$,其中 $T_s = 1/R_s$ 和 $\Delta\nu$ 是线路符号周期和激光器线宽, R_s 是线路符号速率,其他噪声用 AWGN 表示。当不考虑色散时,发射端激光器和接收端本地激光器相位噪声对接收性能的影响是一致的,因此仿真中假设二者的线宽相同。相干接收机中分别采用 Viterbi-Viterbi 相位估计算法^[6]和最小距离法恢复载波相位与符号判决。Viterbi-Viterbi 算法中需要优化滤波器阶数,即数据块长度以达到抑制 AWGN 对载波相位估计的影响,该参数取值与 LPN 的大小相关。

图 3 是在 4 种 LPN 条件下,目标 BER 在 10^{-3} 附近时对不同圈比的仿真结果(仿真参数 SNR 代价和 Viterbi-Viterbi 相位估计算法中数据块的长度见表 1)。从图中可以看出:(1)随着 LPN 增大, Viterbi-Viterbi 载波相位估计算法中最佳滤波器的阶数(数据块长度)及取值范围都减小,该变化趋势和 QPSK、Square 16-QAM 的类似^[4,7];(2)最优圈比随 LPN 变化,当 LPN 较小时(图 3(a)和(b)的情形),最佳圈比为 1.8,随着 LPN 增大,最佳圈比逐渐减小,当 $\Delta\nu/R_s = 5.0 \times 10^{-4}$ 时,最佳圈比为 1.7。值得注意的是,随着 LPN 增大,圈比为 1.6 的星座

图从最差变化到接近最优,这种情形与 2.1 中的直观解释是吻合的,也证明随着 LPN 增大,最佳圈比减小的趋势。

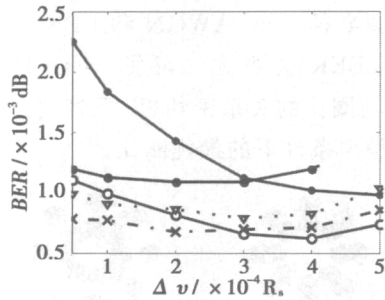


图 3 Star 16-QAM 在不同圈比条件下 BER 随 LPN(用参数 $\Delta\nu/R_s$ 表示)变化的仿真结果

表 1 图 3 中不同 LPN 对应的 SNR 代价和数据块长度

LPN/ $\times 10^{-4}$	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
SNR 代价/dB	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6	1.9
数据块长度	30	25	13	7	5	4

3 Star 和 Square 16-QAM 的比较

3.1 LPN 容限

Square 和 Star 16-QAM 在 BER 为 10^{-3} 时 LPN 引起的 SNR 代价如图 4 所示,其中,当 $\Delta\nu/R < 3 \times 10^{-4}$ 时 Star 16-QAM 的圈比为 1.8,当 $\Delta\nu/R \geq 3 \times 10^{-4}$ 时,圈比为 1.7。显然,随着 LPN 增大,Star 16-QAM 中 SNR 代价增长的斜率比 Square 16-QAM 小,且 Star 16-QAM 中 1 dB SNR 代价对应的 LPN 约为 Square 16-QAM 的 3 倍。对于 100 Gbit/s 的相干光纤传输系统,如果采用 PDM 和 Star 16-QAM,则 1 dB SNR 代价可以容忍的最大激光器线宽为 3.75 MHz,而 Square 16-QAM 只有 1.25 MHz,显然 Star 16-QAM 比 Square 16-QAM 有更大的 LPN 容限。

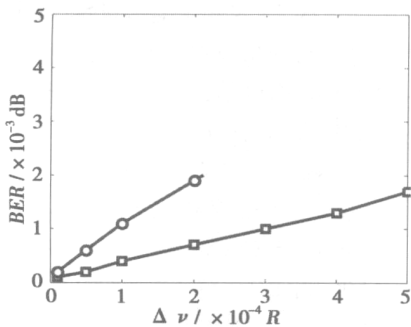


图 4 Square 和 Star 16-QAM LPN 容限的比较

3.2 Square 16-QAM 的误码机理

一般认为 Square 16-QAM 星座图内中间一圈部分符号的相位距离过小是造成对 LPN 敏感的原因^[4,7]。在仿真过程中作者进一步发现,Square 16-QAM 星座图中的其他两个特征加剧了噪声容限的减小。

第一,星座图中三圈的半径比例并不是最优的。从图 5 可以看出,当 LPN 引起星座图旋转后,外圈和中间一圈上的符号容易混叠,而内圈与中间一圈之间则仍有较大余量,但受限于 Square 星座图的特征,其中的圈比并不能优化调整。



图 5 叠加 LPN 和 AWGN 的 Square16-QAM 星座图

第二,发生符号判决错误后存在错误“放大”效应。当 LPN 较大时,造成符号相位偏移量超过星座图中相邻星点之间相位距离的一半时,将引起相位估计值跳变和判决错误。如果星座图中各圈上星点之间的相位距离都相同,则无论哪一圈上的点对应的符号发生错误,引起的相位跳变量都是相同的,虽然该跳变造成相位整体偏移(假设后续不再发生相位跳变),但由于使用差分编码,仅在相位跳变点造成符号判决错误,Star 16-QAM 即是这种情况。Square 16-QAM 中由于中间一圈星点之间距离不相等,发生相位跳变时存在多种可能的跳变量,当发生一次跳变后,可能紧接着会发生多次相位跳变,造成误码率增大。

4 结束语

本文首先比较了 Square 和 Star 两种 16-QAM 调制格式星座图的特点;从相干接收性能的角度出发,仿真了 AWGN 和 LPN 对 Star 16-QAM 性能的影响,重点研究了星座图在不同噪声条件下的最佳圈比;在此基础上,计算了当 BER 为 10^{-3} 时,Star 和 Square 两种 16-QAM 由 LPN 引起的 SNR 代价,进一步揭示了 Square 16-QAM 对相位噪声敏感的机理。计算和分析结果表明,Star 16-QAM 由于其星座图的优越性,具有比 Square 16-QAM 更好的抗 LPN 能力。
(下转第 140 页)

因此,最终整个红外目标模拟的逼真度可以表示为

$$F = \delta_1 \sum_{i=1}^9 \alpha_i F_{1i} + \delta_2 \sum_{i=1}^9 \beta_i F_{2i} \quad (18)$$

其中, F_{1i} 和 F_{2i} 分别为起始时刻等效逼真和变化过程逼真的评价项目逼真度。

6 结束语

红外目标模拟逼真度是模拟可信度评估的重要组成部分^[10],关系到半实物仿真的结果是否有效。本文在实战场景设置的基础上,分析了逼真度评估指标,设计了将起始时刻等效逼真和变化过程逼真相结合来评估整个红外目标模拟逼真度的方案,最终能够得到逼真度评估结果的定量化表示,具有一定意义。

但本文并没有具体涉及到变化过程逼真中变化规律函数的比较方法,以及得出具体评估项目的比较偏差之后如何进行逼真度的转换,需要在下一步的工作中继续完善。

参考文献:

- [1] 金政芝,杜文红,王 星,等. 红外诱饵弹建模与视景仿真实现研究[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(6):31-34.
- [2] 洪 洋,张 科,李言俊. 红外诱饵的干扰模型与仿真

(上接第 112 页)

参考文献:

- [1] Gnauck A, Winzer P, Chandrasekhar S, et al. Spectrally efficient long-haul WDM transmission using 224-Gb/s polarization-multiplexed 16-QAM [J]. J. Lightwave Technol., 2011, 29(4): 373-377.
- [2] 冯 勇,闻 和,张汉一. 偏振复用差分相移键控信号的数字相干解调与偏振解复用算法研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1268-1273.
- [3] Richter T, Palushani E, Schmidt C, et al. Single wavelength channel 10.2 Tb/s TDM-data capacity using 16-QAM and coherent detection [C]// OFC'2011, 2011 PDPA9.
- [4] Seimetz M. Laser linewidth limitations for optical systems with high-order modulation employing feed forward digital carrier phase estimation [C]// OFC'2008, 2008; OTuM2.
- [5] Wu X, Wang J, Huang H, et al. Experimental optical

[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 463-466.

- [3] 王 娟. 红外成像系统的作用距离估算[D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
- [4] 刘兴堂. 精确制导、控制与仿真技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [5] 王月萍, 赵长明. 基于 DMD 的动态红外景象仿真系统[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 966-970.
- [6] 占春连, 李正琪, 刘建平, 等. 光辐射照度测试研究[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1245-1249.
- [7] 虞 红, 何秋茹, 陶渝辉. 用目标模拟器仿真真实目标能量的计算方法[J]. 红外与激光工程, 2006, 10(35): 323-326.
- [8] 谢民勇, 沈卫东, 宋斯洪, 等. 基于目标与背景红外辐射对比度的红外隐身效能研究[J]. 红外技术, 2011, 33(2): 113-115.
- [9] 姜长虹, 何天荣, 屈玉华, 等. 基于粗糙集理论的规则权重确定方法[J]. 甘肃联合大学学报: 自然科学版, 2008, 22(6): 35-37.
- [10] 王远达, 宋笔锋, 李小奇, 等. 飞行模拟器逼真度的实用评价方法[J]. 海军工程大学学报, 2005, 17(6): 53-57.

作者简介:

田晓飞(1987—),男,硕士,河南舞钢人,研究方向为光电对抗及红外制导半实物仿真。

E-mail: tianxiaofei2011@163.com

multiplexing of two 20-Gbit/s QPSK data channels from different wavelengths onto a single 40-Gbit/s star 16-QAM using fiber nonlinearities [C]// CLEO'2011, 2011; CThH4.

- [6] Viterbi A J, Viterbi A M. Nonlinear estimation of PSK-modulated carrier phase with application to burst digital transmission[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1983, IT-29(4): 543-551.
- [7] Fatadin I, Ives D, Savory S J. Laser linewidth tolerance for 16-QAM coherent optical systems using QPSK partitioning [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2010, 22(9): 631-633.

作者简介:

刘继红(1977—),男,工学博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向包括光通信技术、光子器件技术。

E-mail: ong1705@xupt.edu.cn