

40/100 Gb/s 偏振复用相干检测光模块的技术分析

胡毅 杨家龙

(光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 武汉电信器件有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要 利用偏振复用四相相移键控(PM-QPSK)调制技术和相干检测技术,实现 40/100 Gb/s 光模块的长距离传输。基于相干检测的偏振复用四相相移键控调制格式是 40/100 Gb/s 长距离传输的主要研究方向,与直接检测系统相比,相干检测具有更高的频谱效率。现有的相干检测是基于高速模数转换器(ADC)的快速发展,ADC 对混频后的基带信号采样,通过数字信号处理(DSP)芯片数字均衡的方式完成相干接收。数字信号处理芯片数字均衡的方式可以实现定时恢复、信号恢复、偏振和偏振模色散(PMD)跟踪,以及色散补偿。

关键词 相干光通信;偏振复用;相干检测;偏振复用四相相移键控

中图分类号 TN292.11 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP48.080601

Technical Analysis of 40/100 Gb/s Polarization Multiplexing and Coherent Detection for Optical Transponder Module

Hu Yi Yang Jialong

(*State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan, Hubei 430074, China*)
(*Wuhan Telecommunication Devices Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China*)

Abstract Polarization modulation-quadrature phase shift keying (PM-QPSK) modulation technology and coherent detection technology are used to realize the long distance transmission for 40/100 Gb/s optical module. Coherent detection in conjunction with advanced PM-QPSK modulation formats is a main research field 40/100 Gb/s-long haul transmission since such scheme can achieve higher spectrum efficiency than conventional direct-detection systems. The re-emergence of coherent detection is attributed to the advanced development of high-speed analog-to-digital converters (ADC). High-speed ADC samples mixing frequency of baseband signal, and realizes coherent reception by digital signal processing (DSP) chip working in a digital balanced way. Digital signal processing chip can realize timing recovery, signal recovery, polarization and polarization mode dispersion (PMD) tracking, and the dispersion compensation.

Key words coherent optical communication; polarization multiplexing; coherent detection; polarization modulation-quadrature phase shift keying

OCIS codes 060.1155; 060.2340; 060.4256

1 引言

随着 40 Gb/s 的大规模部署的开始,业界又涌现出多种新型的 100 Gb/s 调制编码格式。面对众多特征各异的传输码型,在综合考虑其他系统设计参数的基础上,业界主要从传输距离、通路间隔、与 40 Gb/s 和 10 Gb/s 系统的兼容性、模块成本与传输性能的平衡等方面进行综合选择^[1]。随着高速数字信号处理(DSP)技术和模数转换(ADC)技术的进步,相干光通信成为研究的热点。相干检测与 DSP 技术相结合,可以在电域进行载波相位同步和偏振跟踪,清除了传统相干接收的两大障碍。基于 DSP 的相干接收机结构简单,具有硬件透明性;可在电域补偿各种传输损伤,简化传输链路,降低传输成本;支持多进制调制格式和偏振复用,实现高频谱效率的传输。通过业界近年来对于 100 Gb/s 模块的研究和开发,100 Gb/s 的偏振复用四相相移键控相干模块(Coherent PM-QPSK)正在变成业界的主要选择^[2~5]。

收稿日期: 2011-02-28; **收到修改稿日期:** 2011-03-17; **网络出版日期:** 2011-07-07

作者简介: 胡毅(1973—),男,硕士,高级工程师,主要从事 10 Gb/s、40 Gb/s 高速光收发模块等方面的研究。

E-mail: huyi@wtd.com.cn

2 偏振复用相干检测的基本原理

相干光通信系统^[6]可以把光频段划分为许多频道,从而使光频段得到充分利用,即多信道光纤通信。如图1所示,为发射机采用偏振复用 QPSK 调制^[4,7,8]。作为载体的激光信号通过偏振分光器(PBS)分为 X/Y 两路,每路信号在通过 2 个马赫-曾德尔(MZ)调制器组成的 I/Q 调制器(I 路和 Q 路相位差 90°)分别将 10.7/27.5 Gb/s 的信号调制到载波,然后再通过偏振复用器把 X 轴和 Y 轴光信号按偏振复用(pol)合并在一起通过光纤发送出去,从而实现了 40/100 Gb/s 在单光纤上的传输。

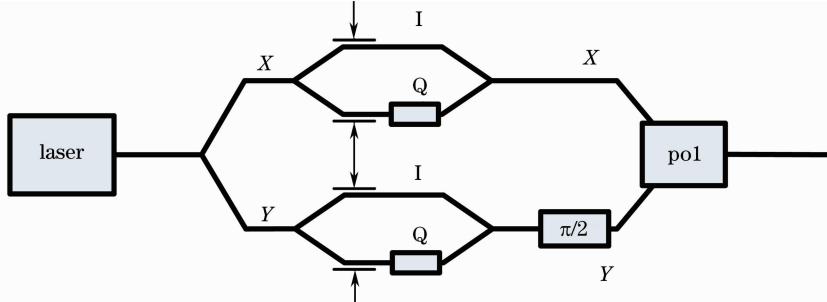


图1 偏振复用 QPSK 调制

Fig.1 Polarization multiplexing QPSK modulator

在接收端,与强度调制/直接检测系统(IM/DD)不同,相干光纤通信系统在光接收机中增加了外差或零差接收所需的本地振荡光源(LO),该光源输出的光波与接收到的已调光波在满足波前匹配和偏振匹配的条件下,进行光电混频。稍微改变本振激光器的光频,就可改变所选择的信道,因此对本振激光器的线宽要求很高。混频后输出的信号光波场强和本振光波场强之和的平方成正比,从中可选出本振光波与信号光波的差频信号。由于该差频信号的变化规律与信号光波的变化规律相同,而不像直检波通信方式那样,检测电流只反映光波的强度,因而,可以实现幅度、频率、相位和偏振等各种调制方式。

如图2所示的接收机相干检测方式,由于要探测偏振复用的信号,接收信号通过一个偏振束分离器(PBS)分解成两个正交信号,每个正交信号都与一个 LO 混频,LO 的载波频率控制精度为数百千赫兹^[9]。混频后得到 4 个偏振和相位正交的光信号,分别用 PIN 检测,经电放大和滤波后由 A/D 电路转化为 4 路数字电信号。数字电信号通过 DSP 芯片数字均衡的方式实现:定时恢复、信号恢复、极化和偏振模色散(PMD)跟踪,以及色散补偿^[10,11]。

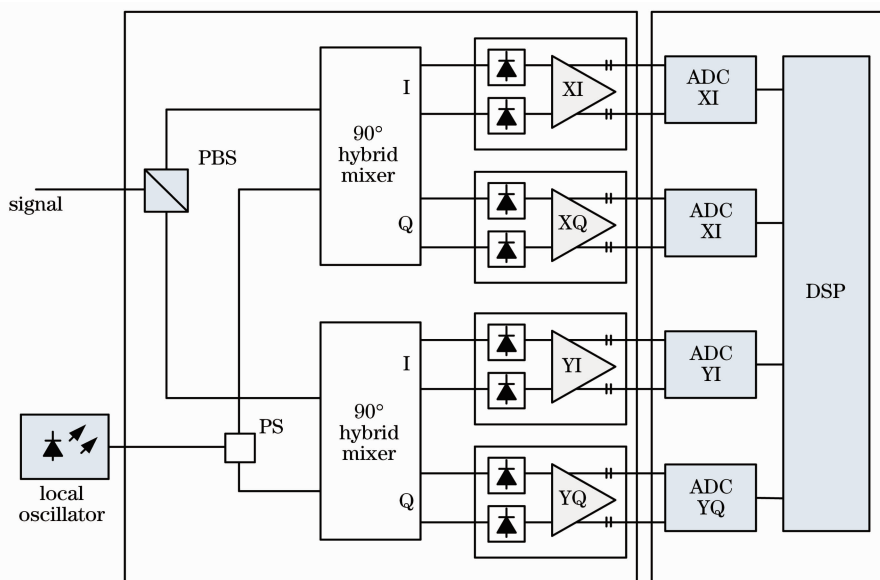


图2 相干检测接收机

Fig.2 Coherent detection receiver

3 偏振复用相干检测的主要优点

相干光通信充分利用了相干通信方式具有的混频增益、出色的信道选择性及可调性等特点。相干光通信系统与 IM/DD 系统相比,相干光通信系统具有以下独特的优点:

1) 灵敏度高,中继距离长

相干光通信的一个最主要的优点是能进行相干探测,从而改善接收机的灵敏度。在相干光通信系统中,经相干混合后输出光电流的大小与信号光功率和本振光功率的乘积成正比。在相同的条件下,相干接收机比普通接收机提高灵敏度约 18 dB,可以达到接近散粒噪声极限的高性能,因此也增加了光信号的无中继传输距离。

2) 选择性好,通信容量大

相干光通信的另一个主要优点是可以提高接收机的选择性。在直接探测中,接收波段较宽,为抑制噪声的干扰,探测器前通常需要放置窄带滤光片,但其频带仍然很宽。在相干外差探测中,探测的是信号光和本振光的混频光,因此只有在中频频带内的噪声才可以进入系统,而其他噪声均被带宽较窄的微波中频放大器滤除。可见,外差探测有良好的滤波性能,这在相干光通信的应用中会发挥重大作用。此外,由于相干探测优良的波长选择性,相干接收机可以使波分复用系统的频率间隔大大缩小^[12],即密集波分复用(DWDM),取代传统光复用技术的大频率间隔,具有以波分复用实现更高传输速率的潜在优势。

3) 可以使用电子学的均衡技术来补偿光纤中光脉冲的色散效应

如果外差检测相干光通信中的中频滤波器的传输函数正好与光纤的传输函数相反,即可降低光纤色散对系统的影响。

4 偏振复用相干检测的关键技术

为了实现准确、有效、可靠的相干光通信,在偏振复用相干检测光模块中应采用以下关键技术。

1) 光源技术

相干光纤通信系统中对信号光源和本振光源的要求比较高,它要求光谱线窄、频率稳定度高。光源本身的谱线宽度决定系统所能达到的最低误码率,应尽量减小,同时半导体激光器的频率对工作温度与注入电流的变化非常敏感,其变化量一般在每摄氏度几十吉赫兹和每毫安几十吉赫兹左右,因此,为使频率稳定,除注入电流和温度稳定外,还应采取其他稳频措施,使光频保持稳定。

2) 接收技术

相干检测的接收技术包括两部分,一部分是光的接收技术,另一部分是中频之后的各种制式的解调技术。

平衡接收法:在频移键控(FSK)制式中,由于半导体激光器在调制过程中难免带有额外的幅度调制噪声,利用平衡接收方法可以减少调幅噪声。平衡法的主要思想是当光信号从光纤进入后,本振光经偏振控制以保证与信号的偏振状态相适应,本振光和信号光同时经过偏振分束器分两路,分别输入两个相同的 PIN 光电检测器,使得两个光电检测器输出的是等幅度而反相的包络信号,再将这两个信号合成后,使得调频信号增加 1 倍,而寄生的调幅噪声相互抵消,直流成分也抵消,达到消除调幅噪声影响的要求。

偏振控制技术:相干光通信系统接收端必须要求信号光和本振光的偏振同偏,才能取得良好的混频效果,提高接收质量。信号光经过单模光纤长距离传输后,偏振态是随机起伏的,为了解决这个问题,提出了很多方法,如采用保偏光纤、偏振控制器和偏振分集接收等方法。光在普通光纤中传输时,相位和偏振面会随机变化,保偏光纤就是通过工艺和材料的选择使得光相位和偏振保持不变的特种光纤,但是这种光纤损耗大,价格也非常昂贵;偏振控制器主要是使信号光和本振光同偏,这种方法响应速度比较慢,环路控制的要求也比较高;偏振分集接收主要是利用信号光和本振光混频后,由偏振分束元件将混合光分成两个相互垂直的偏振分量,本振光两个垂直偏振分量由偏振控制器控制,使两个分量功率相等,这样当信号光中偏振随机起伏也许造成其中一个分支中频信号衰落,但另一个分支的中频信号仍然存在,所以该系统最后得到的解调信号几乎和信号光的偏振无关,该技术响应速度比较快,比较实用,但实现比较复杂。

3) 外光调制技术

由于半导体激光器光载波的某一参数直接调制时,总会附带对其他参数的寄生振荡,如幅移键控(ASK)直接调制伴随着相位的变化,而且调制深度也会受到限制。另外,还会遇到频率特性不平坦及张迟振荡等问题。因此,在相干光通信系统中,除FSK可以采用直接注入电流进行频率调制外,其他都是采用外光调制方式。

4) 非线性串扰控制技术

由于在相干光通信中,常采用密集波分复用技术。因此,光纤中的非线性效应^[13]可能使相干光通信中的某一信道的信号强度和相位受到其他信道信号的影响,而形成非线性串扰。

5 结 论

由于近年来在光器件方面取得了很大的进步,其中激光器的输出功率、线宽、稳定性和噪声,以及光电探测器的带宽、功率容量和共模抑制比都得到了很大的改善,微波电子器件的性能也大幅提高。这些进步使得相干光通信系统商用化变为可能。

参 考 文 献

- 1 Jean-Paul Faure, Bruno Lavigne, Christine Bresson *et al.*. 40 G and 100 G deployment on 10 G infrastructure: market overview and trends[C]. Coherent versus Conventional technology. OFC 2010, paper OThE3
- 2 100 G Ultra Long Haul DWDM Framework Document[S]. Optical Internetworking Forum
- 3 J. Renaudier, O. Bertran-Pardo, H. Mardoyan *et al.*. Performance comparison of 40 and 100 Gb/s coherent PDM-QPSK for upgrading dispersion-managed legacy systems[C]. OFC, 2009, paper NWD5
- 4 M. S. Alfiad, D. van den Borne, S. L. Jansen *et al.*. A comparison of electrical and optical dispersion compensation for 111 Gb/s POLMUX-RZ-DQPSK[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(16): 3590~3598
- 5 S. L. Jansen, Itsuro Morita, Tim C. W. Schenk *et al.*. 121.9 Gb/s PDM-OFDM transmission with 2-b/s/Hz spectral efficiency over 1000 km of SSMF [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 177~188
- 6 Ezra Ip, Alan Pak Tao Lou, Daniel J. F. Borros *et al.*. Coherent detection in optical fiber systems[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 753~791
- 7 Tsuyoshi Yoshida, Takashi Sugihara, Kazushige Sawada *et al.*. Polar coordinate transformation based dual binary-drive QPSK modulation[C]. OFC, 2010, OMK4
- 8 D. S. Ly-Gagnon, Satoshi Tsukamoto, Kazuhire Katoh *et al.*. Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 12~21
- 9 X. Zhou, J. Yu, D. Qian *et al.*. High-spectral-efficiency 114 Gb/s transmission using PolMux-RZ-8PSK modulation format and single-ended digital coherent detection[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 146~152
- 10 I. Fatadin, S. J. Savory, D. Ives. Compensation of quadrature imbalance in an optical QPSK coherent receiver[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **20**(20): 1733~1735
- 11 Jeffrey Rahn, Gilad Goldfarb, Huan-Shang Tsai *et al.*. Low-power, polarization tracked 45.6 Gb/s per wavelength PM-DQPSK receiver in a 10 channel integrated module[C]. OFC, 2010, paper OThE2
- 12 Shaoliang Zhang, Lei Xu, Jianjun Yu *et al.*. Experimental demonstration of decision-aided maximum likelihood phase estimation in 8 channel 42.8 Gbit/s DWDM coherent polMux-QPSK system[C]. OFC, 2010, paper OMK1
- 13 Chongjin Xie, Zinan Wang, Sethumadhavan Chandrasekhar *et al.*. Nonlinear polarization scattering impairments and mitigation in 10 Gbaud polarization-division-multiplexed WDM systems[C]. OFC, 2009, paper OTuD6