

# 100 Gb/s 高灵敏度相干光通信装置

张 璋<sup>1</sup> 杨 宁<sup>1</sup> 徐俊波<sup>1</sup> 李 玲<sup>1</sup> 洪应明<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 烽火通信科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)  
(<sup>2</sup> 华中师范大学物理系, 湖北 武汉 430079)

**摘要** 设计了一种采用内差接收, 数字信号处理电域均衡技术, 偏振复用四相移键控调制码型的高灵敏度相干光实时通信装置。该装置线路传输比特率为 127 Gb/s, 传输净荷为 99.53 Gb/s, 在背靠背条件下获得了一 38.2 dBm 的接收灵敏度, 实现了高灵敏度高速率实时数据传输。该装置主要采用商用化光电器件, 设计符合国际电信联盟的建议, 具有较好的应用前景。

**关键词** 光通信; 相干接收; 内差检测; 高灵敏度

**中图分类号** TN913.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s105014

## 100 Gb/s High Sensitivity Coherent Optical Communication System

Zhang Zhang<sup>1</sup> Yang Ning<sup>1</sup> Xu Junbo<sup>1</sup> Li Ling<sup>1</sup> Hong Yingming<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Fiberhome Telecommunication Technologies Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China)  
(<sup>2</sup> Physics Department, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079, China)

**Abstract** A digital signal processing, infradyne, polarization multiplex quartered phase-shift keying ultra high sensitivity coherent optical communication system is reported in this paper. The transmission bit-rate is 127 Gb/s and the payload bit-rate is 99.53 Gb/s. Sensitivity of  $-38.2$  dBm is achieved in real-time back to back transmission. In this system, commercial devices are widely used and the design follows ITU-T recommendation. Therefore, the system has great prospects of application.

**Key words** optical communications; coherent receiver; infradyne; high sensitivity

**OCIS codes** 060.1660; 060.4510; 060.5060

## 1 引 言

相干光通信以其接收灵敏度高、传输容量大、便于电域均衡等优点, 获得了越来越多的关注。尤其在一些信号传输途径较为恶劣的应用场景, 如跨洋通信、沙漠通信、水下通信、星间通信等, 相比直接强度检测(IMDD), 相干光通信技术有着巨大的优势。

多个国家的研究机构都对相干光通信技术做了大量的研究工作。经过 20 年的发展, 相干光通信逐渐从研究阶段进入了实用阶段。AT&T、Bell Labs 以及 NTT 等公司和研究机构都于 1990 年左右进行了相干传输实验<sup>[1-2]</sup>。

相干接收方案根据本振和信号产生的差频, 分为零差、外差和内差三种检测方式。零差检测的相

干接收在使用光学锁相环的情况下可以得到极高的接收灵敏度, 但是光学锁相环技术复杂, 使得成本过高, 可靠性也受到影响<sup>[3]</sup>。外差接收产生中频载波, 又可经同步或异步解调得到基带信号<sup>[4]</sup>。但外差检测技术要求光电器件带宽至少大于传输光信号速率的 2 倍, 因此只能用在较低的传输速率下<sup>[5]</sup>。内差检测只要求与信号速率相当的器件带宽, 本振和信号也不需要严格同步, 因此可以更好地平衡接收机的复杂度、接收灵敏度和传输速率这三个因素。但是内差检测需要采用高速数字信号处理(DSP)技术来解决本振和信号之间的差频与信号本身的频谱混叠问题, 这也限制了内差检测技术的发展<sup>[6]</sup>。直到近年来, 高速模拟数字转换器(ADC)和高速 DSP 获

收稿日期: 2013-09-30; 收到修改稿日期: 2013-11-02

作者简介: 张 璋(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: zhangzh@fiberhome.com.cn

得了长足的进步,内差检测在高速光通信领域才逐渐得到应用<sup>[7]</sup>。

## 2 主要研究内容

### 2.1 调制、接收方式选择

在相干光通信系统中,信号光的偏振态对准会极大地影响混频效率进而影响接收灵敏度。通常信号(Sig)光在经空气、水或光纤等介质的长距离传播后,其偏振态往往会演变为复杂的椭圆偏振,甚至部分偏振,且偏振态会随时间变化。在接收端,本振(LO)激光的偏振态需要调整到和 Sig 光的偏振态一致,才能获得最大的接收灵敏度。

为了解决该问题,其中一种方法是偏振追踪。检测 Sig 光的偏振态,根据检测结果实时地通过光电或机械方式反馈调节 LO 光的偏振态,使得 LO 光偏振态始终和 Sig 光偏振态一致。这一方法需要快速地调整偏振器件以适应时变的 Sig 光偏振态,在性能上不太理想,可靠性也难以保证。

另一种方法是偏振分集<sup>[8]</sup>。使用偏振器将 Sig

光分成两个相互正交的线偏振态,分别接收,再将接收到的两个电信号分别处理,最后相加以消除 Sig 光偏振态随机变化对接收灵敏度的影响。同时,该方法配合偏振复用技术,可以在不大幅度增加成本的前提下将通信灵敏度提高一倍。

相对于强度调制的开关键控(OOK)码型,四相移键控(QPSK)和二相移键控(BPSK)这一类相位调制码型有更高的光信噪比(OSNR)灵敏度,也更容易采用 DSP 算法实现对 LO 和 Sig 光频差补偿以及传输介质的色散补偿。而 QPSK 相对于 BPSK,在相同的传输速率时对器件的光电带宽要求只有后者的一半。

综上所述,在现有的器件水平下要实现能够商用化的 100 Gb/s 速率的高灵敏度光通信设备,应该选择偏振复用的四相移键控(PM-QPSK),采用内差检测、偏振分集接收。

### 2.2 发射机实现

PM-QPSK 码型发射机(TX)的结构如图 1 所示。

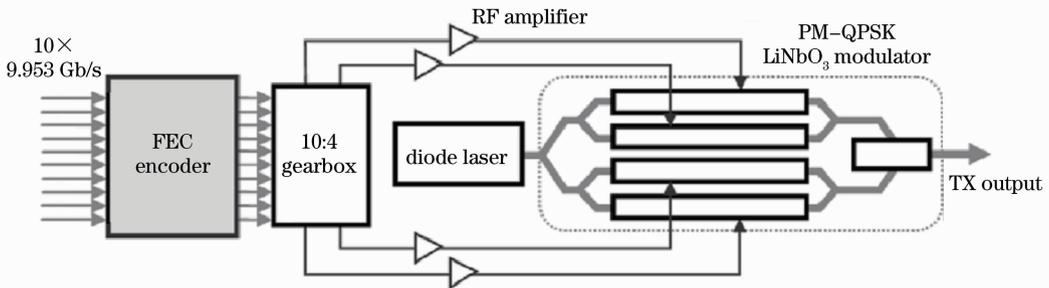


图 1 PM-QPSK 码型 TX 的构成

Fig. 1 Scheme of PM-QPSK transmitter

TX 采用了窄线宽半导体激光光源加上外部相位调制器调制的方式,避免了对半导体激光器直接调制造成的频率拉偏以及额外的强度、相位噪声,该方式在目前的高速光通信中被广泛采用。

10 × 9.953 Gb/s 业务信号送入前向纠错(FEC)编码单元,然后送入 10 : 4 的变速器(Gearbox),将由 10 路信号转换为 4 路信号 XI、XQ、YI 和 YQ,波特率均为 31.79 GBaud。

4 路信号通过 4 个射频放大器放大到 2 倍半波电压去驱动 PM-QPSK 光相位调制器。PM-QPSK 光相位调制器将窄线宽连续激光调制成 31.79 GBaud,PM-QPSK 相位调制码型光信号通过尾纤输出, TX 输出光功率约为 1.5 dBm。

其中窄线宽激光器使用稳定在标准具上的外腔式半导体激光器(ECDL),其线宽约为 100 kHz。实

际上基于 DSP 技术处理的内差检测 PM-QPSK 码型并不需要这么窄的激光器线宽<sup>[9]</sup>,实验中 500 kHz 的线宽也完全可以满足需求,因此使用稳定在标准具上的分布反馈式半导体激光器(DFB)也是可行的。上述两种激光器目前都已经有了商用化的产品。PM-QPSK 光调制器采用铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)材料的马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)调制器,也已经商用化。

调制器 6 个偏置的控制电路使用了闭环反馈的控制方式,实现了全自动搜索、保持最佳偏置点,在环境温度 -10 ℃ ~ 55 ℃ 范围内都能保证设备的稳定工作。使用 Agilent 光调制分析仪 N4391 对 TX 输出光信号分析,误差向量幅度(EVM)为 13% 左右,如图 2 所示。

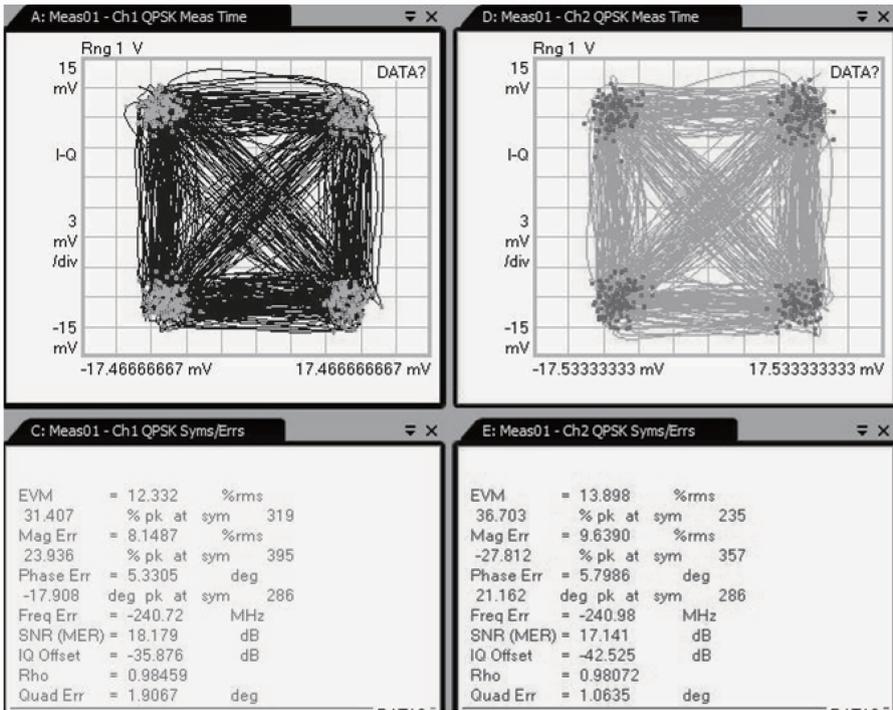


图 2 TX 输出光信号 2 个偏振的星座图和相关测量指标

Fig. 2 Constellations and measurements of polarization-multiplex transmitter

### 2.3 接收机实现

接收机(RX)使用偏振分集的相干接收方式实现,因此 Sig 光进入一个偏振分束器(PBS)后,分别使用 2 个 90°混频器(Hybrid Mixer)与 LO 光混频,然后通过 4 对高速光电二极管差分对以及低噪声跨导放大器(TIA)转换为电信号,如图 3 所示。光电二极管及 TIA 带宽均大于 23 GHz,工作于自动增益控制(AGC)模式。

为了提高接收灵敏度,使用了平面光波导(PLC)技术的 90° hybrid mixer,且 hybrid mixer 输

出与光电二极管直接耦合,减少耦合透镜的数量以降低插入损耗。

LO 光源使用与 TX 相同型号的窄线宽激光器,出于接收灵敏度考虑,将 LO 光功率设为 13 dBm,可在接收机允许的动态范围内获得较大的混频增益。

在零差相干接收系统里,对激光器的频率稳定度要求极高,且 LO 激光必须使用光学锁相环严格锁相在 TX 激光上,否则不能正确接收信号。在内差相干接收系统里,由于使用了 DSP 算法处理补偿 TX 激光器与 LO 激光器的相位差,可以完全避免复杂的光学锁相环而让 LO 激光器自由振荡,且对于激光器的频率稳定度要求大为降低。商用的窄线宽半导体通信激光器模块的线宽普遍小于 500 kHz,频率稳定度为 ±2.5 GHz,完全能满足 100 Gb/s 内差相干接收系统的要求。

TIA 输出的电信号送入采样率为 2 倍信号波特率的高速 ADC,将模拟电信号转换为数字信号进行数字信号处理。对 PM-QPSK 码型的数字信号处理方法目前已经有较为成熟的流程和算法,如图 4 所示。

光前端补偿单元用于补偿 4 个接收通道之间的增益差和时延差。

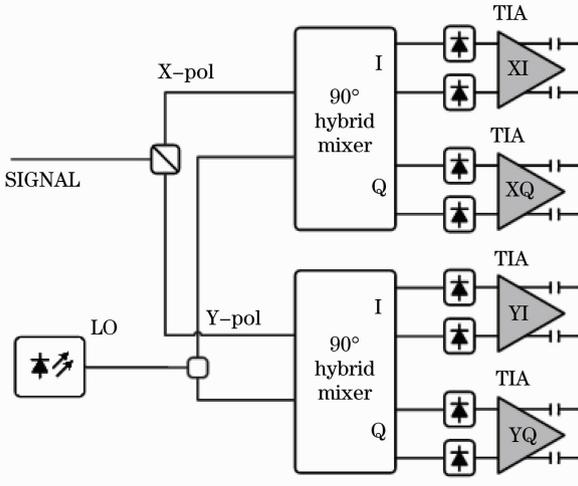


图 3 偏振分集的相干接收机示意图

Fig. 3 Scheme of coherent receiver

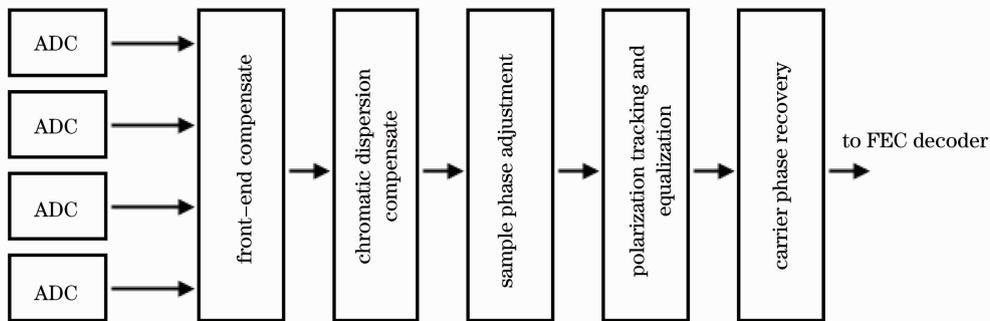


图 4 数字信号处理实现电域均衡的流程图

Fig. 4 Flow-chart of DSP based electronic equalization

色散补偿单元由多抽头的有限长单位脉冲响应数字滤波器(FIR)构成<sup>[10]</sup>,使用时域或频域均衡的方式对传输介质(例如光纤)色散造成的信号相移进行线性补偿。无限长单位脉冲响应数字滤波器(IIR)理论上性能更好,但IIR用数字逻辑电路实现需要占用太多的逻辑电路资源,在实际设计时一般不会采用。

采样相位调整单元检测采样信号与实际信号之间的相位差<sup>[11]</sup>,反馈到ADC的采样时钟,使得采样频率等于实际信号频率且采样相位最优化。

偏振跟踪与均衡单元由多抽头的自适应蝶形FIR构成<sup>[12]</sup>,使用恒模算法(CMA)分离2个偏振光各自产生的电信号并补偿偏振态之间的时延。

载波相位恢复单元采用Viterbi-and-Viterbi(V&V)<sup>[13]</sup>算法估算Sig光与LO光之间的相位偏差。这一方法不能完全消除Sig光与LO光之间的周期性偏移(Cycle-slip),因此需要对传输的数据信号进行差分编码,牺牲一部分信噪比(SNR)容忍度以换取系统的稳定性。

基于功耗与设备可制造性的考虑,采用了集成了的高速ADC和DSP的专用集成电路(ASIC)芯片。芯片采用40 nm COMS工艺,其中ADC的采样率63 GS/s,分辨率为8 bit;DSP部分包含约100 M个逻辑门。

### 2.4 前向纠错编码

以上技术基本实现了高灵敏度100 Gb/s相干光收发功能,而前向纠错编码(FEC)技术<sup>[14]</sup>通过插入冗余码实现对偶发的误码进行纠错,进一步提高通信设备对于噪声干扰、信号质量劣化的容忍度,可显著提高系统传输性能和可靠性。

在该装置中,使用了2层FEC,分别是15%开销的软判决-低密度奇偶校验码(SD-LDPC)和7%开销的硬判决增强型FEC(EFEC)。单纯的SD-

LDPC虽然在高误码率条件下具有较强的纠错能力,但也存在较大的本底误码,配合EFEC则可以获得较为理想的纠错性能。

2种FEC叠加可获得约11 dB的编码增益(NCG),FEC纠前误码率(BER)在 $1.86 \times 10^{-2}$ 时,FEC纠后误码率小于 $1 \times 10^{-13}$ ,如图5所示。

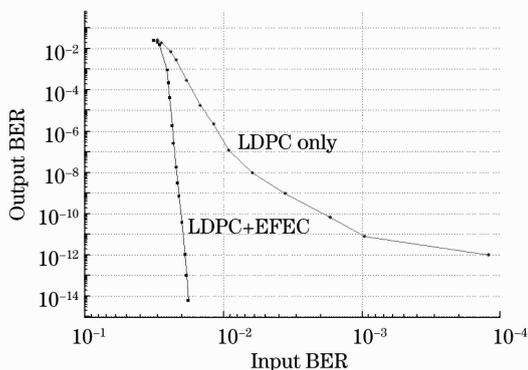


图 5 单独 LDPC 的纠错性能与 LDPC+EFEC 的纠错性能

Fig. 5 Performance of LDPC only and LDPC+EFEC

## 3 实验结果

测量该装置灵敏度的实验装置如图6所示,EFXO FTB-500误码仪产生速率为99.53 Gb/s,<sup>231</sup>的伪随机二进制序列(PRBS)作为净荷,并封装成为符合ITU-T G. 709建议的OTU4帧送给待测设备。待测设备TX输出光通过可调衰减器送给RX端,并用校准过的3 dB耦合器和光功率计测量RX端收光功率。

该装置在FEC纠错后误码率小于 $1 \times 10^{-13}$ 的前提下获得了一38.2 dBm的接收灵敏度,如图7所示。

## 4 结 论

报道了100 Gb/s高灵敏度相干光实时通信装置

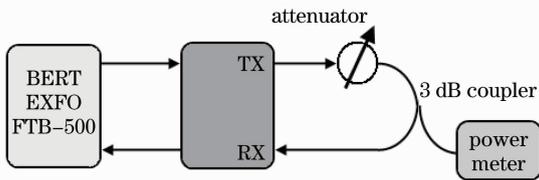


图 6 接收灵敏度测试实验装置

Fig. 6 Scheme of sensitivity measurement

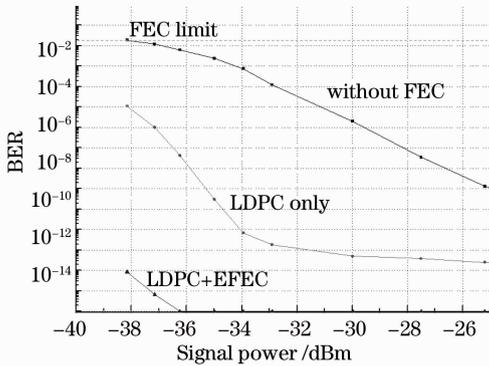


图 7 接收到的 Sig 光功率与 BER 的关系

Fig. 7 Received signal power versus receiver BER

采用基于 DSP 电域均衡的内差检测相干接收技术, PM-QPSK 相位调制码型, 传输比特率为 127 Gb/s, 传输净荷为 99.53 Gb/s, 在背靠背条件下获得了一 38.2 dBm 的接收灵敏度。

该装置大量采用成熟的商用化器件, 速率、帧处理等设计完全符合 ITU-T 的相关建议, 与现有的光传送网(OTN)设备兼容, 在需要高灵敏度、高数据带宽和高可靠性的长距离数据传输应用场景, 具有很高的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 S Yamazaki, K Emura. Feasibility study on QPSK optical-heterodyne detection system [J]. J Lightwave Technol, 1990, 8 (11): 1646-1653.
- 2 T Chikama, S Watanabe, T Naito, *et al.*. Modulation and demodulation techniques in optical heterodyne PSK transmission systems [J]. J Lightwave Technol, 1990, 8(3): 309-322.
- 3 D J Malyon, D W Smith, R Wyatt. Semiconductor laser homodyne optical phase-locked-loop [J]. Electron Lett, 1986, 22 (8): 421-422.
- 4 I Lyubomirsky. Coherent detection for optical duobinary communication systems [J]. Photon Tech Lett, 2006, 18(7): 868-876.
- 5 N Ohkawa, T Sugie, Y Hayashi. A highly sensitive balanced receiver for 2.5 Gb/s heterodyne detection systems [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1991, 3(4): 375-377.
- 6 F Derr. Optical QPSK transmission system with novel digital receiver concept [J]. Electron Lett, 1991, 27(23): 2177-2179.
- 7 A Leven, N Kaneda, A Klein, *et al.*. Real-time implementation of 4.4 Gbit/s QPSK intradyne receiver using field programmable gate array [J]. Electron Lett, 2006, 42(24): 1421-1422.
- 8 B Glance. Polarization independent coherent optical receiver [J]. J Lightwave Technol, 1987, 5(2): 274-276.
- 9 M Seimetz. Laser linewidth limitations for optical systems with high-order modulation employing feed forward digital carrier phase estimation [C]. San Diego: Proc. OFC 2008: OTuM2.
- 10 V Curri, P Poggiolini, A Carena, *et al.*. Dispersion compensation and mitigation of nonlinear effects in 111-Gb/s WDM coherent PM-QPSK systems [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(17): 1473-1475.
- 11 M Oerder, H Meyr. Digital filter and square timing recovery [J]. IEEE Trans Commun, 1988, 36(5): 605-612.
- 12 C R Johnson, Jr., P Schniter, I Fijalkow, *et al.*. The Core of FSE-CMA Behaviour Theory // S. Haykin. Unsupervised Adaptive Filtering [M]. New York: Wiley, 1999.
- 13 A Viterbi. Nonlinear estimation of PSK-modulated carrier phase with applications to burst digital transmission [J]. IEEE Trans Inform Theory, 1983, 29(4): 543-551.
- 14 Ivan B Djordjevic, Murat Arabaci, Lyubomir L Minkov. Next generation FEC for high-capacity communication in optical transport networks [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(16): 3518-3530.

栏目编辑: 殷建芳