

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.230165.

光通信系统与网络技术

胡山,李威,潘映梅,等.简化相干技术研究进展[J].光通信研究,2025(1):230165.

Hu S, Li W, Pan Y M, et al.Recent Progress in Simplified Coherent Technology[J]. Study on Optical Communications, 2025(1): 230165.

## 简化相干技术研究进展

胡山<sup>c</sup>,李威<sup>c</sup>,潘映梅<sup>c</sup>,曾韬<sup>a</sup>,罗鸣<sup>a</sup>,喻煌<sup>b</sup>,郭浩<sup>b</sup>

(中国信息通信科技集团有限公司 a.光纤通信技术与网络国家重点实验室,武汉 430220;

b.烽火藤仓光纤科技有限公司,武汉 430070; c.武汉邮电科学研究院,武汉 430074)

**摘要:**随着光通信技术在现代社会生产生活中的广泛应用,其应用场景日益多样化和复杂化。尤其在数据中心和宇航等领域,传统数字相干光通信接收方法的复杂度和功耗问题日益凸显。近年来,模拟相干技术因其在保持通信质量的同时降低复杂度和功耗而备受关注。该技术通过使用模拟器件实现传统数字相干光通信接收端的部分或全部功能,从而简化了接收结构并降低了功耗。文章首先介绍了模拟相干技术的典型架构,展示了其主要组成部分;然后具体介绍了各个部分的原理、具体结构和实现方式,包括时钟与载波恢复、光域偏振解复用(偏振旋转补偿)和模拟自适应均衡;最后介绍了与模拟相干技术相近的其他简化相干技术,包括准相干接收技术、Kramers-Kronig(KK)接收技术和差分接收技术,分析了这些技术的原理,列出了目前主要的研究成果,并介绍了其各自的优缺点及应用场景。通过对模拟相干及其他简化相干技术的原理和研究现状的分析,比较了各种简化相干方式的优点和不足,阐述了简化相干技术未来应发展的方向,为未来简化相干技术的研究提供了参考。

**关键词:**模拟相干;简化相干;功耗;数据中心

**中图分类号:**TN929.11

**文献标志码:**A

### Recent Progress in Simplified Coherent Technology

HU Shan<sup>c</sup>, LI Wei<sup>c</sup>, PAN Yingmei<sup>c</sup>, ZENG Tao<sup>a</sup>, LUO Ming<sup>a</sup>, YU Huang<sup>b</sup>, GUO Hao<sup>b</sup>

(a. National Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan 430220, China;

b. FiberHome Fujikura Optic Technology Co., Ltd., Wuhan 430070, China;

c. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China Information

Communication Technologies Group Corporation)

**Abstract:** With the increasingly widespread application of optical communication technology in modern social production and life, the application scenarios of optical communication technology are becoming increasingly diverse and challenging. In energy sensitive scenarios such as data centers and aerospace, traditional digital coherent optical communication reception methods are difficult to reduce complexity and power consumption, and have obvious limitations. Analog coherent technology is a simplified coherent technology that utilizes analog devices to achieve part or all of the functions of the traditional digital coherent optical communication receiver, in order to simplify the receiver structure and reduce power consumption. Compared to traditional digital coherent optical communication receiving technology, analog coherent technology has obvious advantages in power consumption, complexity, and cost. This paper first introduces the typical architecture of analog coherent technology and demonstrates its main components. Then, the principles, specific structures, and implementation methods of each part are specifically introduced, including clock and carrier recovery, optical domain polarization demultiplexing (polarization rotation compensation), and analog adaptive equalization. Finally, other simplified coherent technology similar to analog coherent technology are introduced, including quasi coherent reception technology, Kramers-Kronig(KK) reception technology, and differential reception technology. Through the analysis of the principles and current research status of analog coherent and other simplified coherent techniques, this paper compares the advantages and disadvantages of various simplified coherent methods, elucidates the future development directions of simplified coherent technology, and provides a reference for future research on simplified coherent technology.

**Key words:** analog coherent; simplified coherent; power consumption; data center

## 0 引言

随着互联网技术的蓬勃发展以及在社会生产生

活中越来越广泛地应用,网络中承载与传输的数据量也越来越大,而相干光通信技术在其中扮演着至关重要的角色。现在大规模商用的数字相干光通信

收稿日期:2023-11-10; 修回日期:2023-12-20; 纸质出版日期:2025-02-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB1806401);湖北省重点研发计划资助项目(2022BAA002);湖北省自然科学基金资助项目(2022CFB339)

作者简介:胡山(1998—),男,湖北黄石人。硕士,主要研究方向为相干光通信。

通信作者:曾韬,正高级工程师。E-mail:zengtao@wri.com.cn

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

系统中,信号接收端主要由相干接收机、模/数转换(Analog to Digital Converter, ADC)和数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)组合而成。

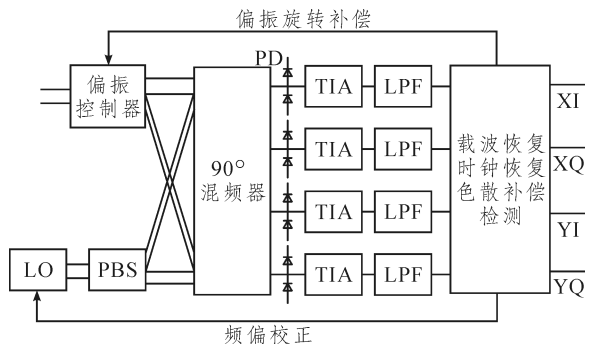
光通信系统的能耗问题直接决定了系统运行费用和器件发热情况,因此越来越受到研究者的重视。在一些特定的场景下,如数据中心和宇航等,能耗更是一项非常重要的指标。数据中心的电费占其运维总成本的60%以上,而信息技术(Information Technology, IT)和冷却设备又占数据中心总能耗的90%以上<sup>[1]</sup>。目前主流数字相干光系统接收端,其中ADC及DSP的成本与能耗均较高,并不适合对能耗敏感的数据中心场景。当前数据中心广泛使用的是结构较为简单且能耗较低的直调直检(Intensity Modulation Direct Detection, IMDD)接收方式。然而,对于长距离数据中心连接,IMDD的性能则显得不足,并且继续提升其传输速率较为困难<sup>[2]</sup>。

在多种简化相干技术中,模拟相干技术近年颇受研究者的关注。模拟相干技术是将传统数字相干接收端中的部分或全部功能用模拟器件实现,以降低能耗及成本。在能耗敏感的场景省去DSP与ADC的模拟相干技术,展现出了显著优势<sup>[3]</sup>。

本文对国内外简化相干技术的研究成果进行了综述,首先介绍了模拟相干技术中接收端的典型结构;然后介绍其各部分的具体实现方法,包括载波恢复、时钟恢复、光域偏振解复用和模拟自适应均衡等,比较了各个方法的性能及复杂度等指标,为未来模拟相干技术的研究提供了目标和参考;最后介绍了其他简化相干技术,如Kramers-Kronig(KK)技术、准相干技术和差分接收等,为各种能耗敏感场景下的应用提供了参考。

### 1 模拟相干技术整体架构

模拟相干接收端的典型结构如图1所示。器件



注:XI、XQ、YI、YQ分别为X偏振与Y偏振的同相和正交分量。

图1 模拟相干接收端典型结构

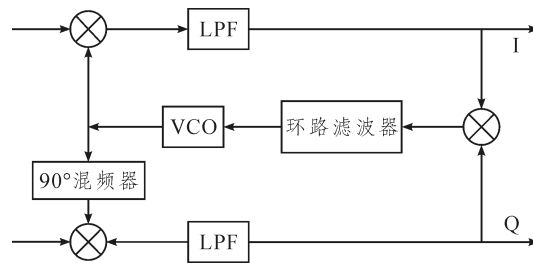
Figure 1 Typical structure of analog coherent receiver

主要包括本地振荡(Local Oscillator, LO)激光器、偏振控制器、偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)、90°光混频器、光电二极管(Photodiode, PD)、跨阻放大器(Transimpedance Amplifier, TIA)及增益控制、低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)以及时钟和载波恢复等。功能上可分为时钟与载波恢复、光域偏振解复用和模拟自适应均衡。接下来本文将按照功能依次进行介绍。

#### 1.1 时钟与载波恢复

时钟恢复方面,使用互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)集成电路实现时钟恢复功能在传统相干光通信中已有较广泛地应用<sup>[4]</sup>,在模拟相干技术中可以继续沿用,这里不做过多赘述。

载波恢复方面,主要使用由CMOS工艺制成的光锁相环(Optical Phase Locked Loop, OPLL)或电锁相环(Electronic Phase Locked Loop, EPLL)。无论是OPLL还是EPLL,其原理均是科斯塔斯环(Costas Loop)。如图2<sup>[5]</sup>所示。将同相正交(In-phase Quadrature, IQ)分量信号混频后,经过环路滤波器可以得到反映相差的反馈信号,用该反馈信号调节压控振荡器(Voltage-Controlled Oscillator, VCO),可使本地载波与输入信号相位锁定。



注:I和Q分别为同相和正交向量。

图2 科斯塔斯环

Figure 2 Costas loop

OPLL的典型结构如图3所示<sup>[5]</sup>。在OPLL中,Costas Loop中要求的LPF可以由PD或TIA自身的频率选择特性实现。VCO的功能由频率可调的本地LO激光器实现。OPLL方法利用OPLL产生的频率校正信号来调节LO光以达到频率锁定的效果,因此OPLL需要经过整个环路,包括LO激光器、90°混频器、PD以及载波恢复电路等器件,反馈的频率校正信号才能到达LO激光器,因此环路延迟对于OPLL是一个非常重要的指标。

2015年,加利福尼亚大学的Lu等人在1 cm<sup>2</sup>的面积内实现了成功接收40 Gbit/s二进制相移键控(Binary Phase-Shift Keying, BPSK)的零差接收

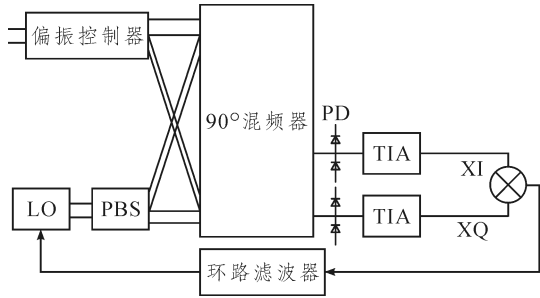


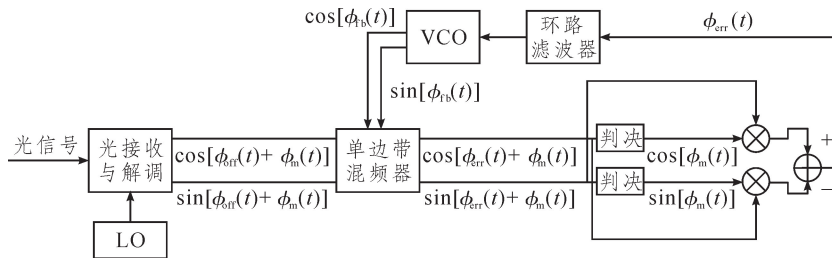
图3 OPLL 结构

Figure 3 Structure of OPLL

机,并实现了高达 35 Gbit/s 的无差错传输,其中 OPLL 环路延迟仅为 120 ps<sup>[6]</sup>;2022 年,加利福尼亚大学的 Valenzuela 等人使用 130 nm SiGe BiCMOS 工艺,在 2.8 mm<sup>2</sup> 的面积上集成了使用 OPLL 的正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) 模拟相干接收机,在 50 GBaud 下满足前向纠错 (Forward Error Correction, FEC) 判决门限 (误码率低于  $2.2 \times 10^{-4}$ ),其中 OPLL 环路延迟为 188 ps<sup>[7]</sup>。

2021 年, Xia 和 Valenzuela 等人同样使用 130 nm SiGe BiCMOS 工艺制作了使用 OPLL 的 O 波段模拟相干接收机,其速率最高可达 80 Gbit/s<sup>[8]</sup>。

EPLL 的典型结构如图 4 所示<sup>[9]</sup>。相较于 OPLL 方法,使用 EPLL 进行载波恢复时,因为不依赖反馈调节 LO 实现频率相位锁定,环路不包括 LO 激光器、混频器等器件,对环路延迟相对不敏感,代价是需要使用更复杂的模拟电子器件实现电域的反馈控制。且因为 LO 未锁相,LO 与载波的频差需要始终保持在 EPLL 的 VCO 的频率范围内,也就是通常在 10 GHz 以内。为此,可以使用结构相对较为简单的鉴频器电路,以实现反馈较慢的 LO 频差控制,使频差不至于过大。印度理工大学的 Nambath 等人提出了使用 EPLL 进行载波恢复的 100 Gbit/s 速率模拟相干接收机结构,并进行了系统和电路级仿真验证<sup>[10-12]</sup>。



注： $\phi_m(t)$  为原信号相位； $\phi_{off}(t)$  为相位误差； $\phi_{fb}(t)$  为反馈调节相位； $\phi_{err}(t)$  为残余相位误差。

图4 EPLL 结构

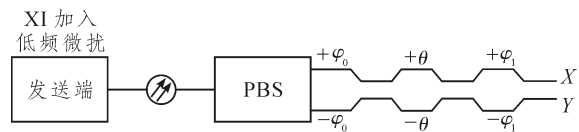
Figure 4 Structure of EPLL

### 1.2 光域偏振解复用 (偏振旋转补偿)

在模拟相干中,偏振解复用和偏振旋转补偿通常在光域上进行,可以使用光学器件 PBS 实现。光纤信道会带来偏振态之间的能量耦合,因此还需要偏振控制器跟踪偏振旋转并消除这种耦合,即偏振旋转补偿。光纤带来的偏振旋转通常在毫秒级的尺度上变化,且在数据中心等短距传输应用场景下变化更加缓慢<sup>[13-14]</sup>,因此可以用低速 (一般小于 100 kHz) 的电路驱动偏振控制器完成偏振旋转的补偿。

偏振控制器可以由光纤挤压器组成<sup>[15-16]</sup>或光学移相器级联组成,应用较多的是后者。3 个移相器级联可以实现任意的偏振旋转<sup>[17]</sup>,由移相器级联形成的偏振控制器的典型结构如图 5 所示。调节移相器参数的一种方法是,在传输的某 1 路信号中加入 1 个低频 (一般小于 50 kHz) 的微扰信号,在接收端其他路中的微扰信号越小,说明偏振旋转的补偿效

果越好,当其他路检测不到微扰信号时,则说明偏振态之间的耦合完全消除,可依据此调节移相器参数。斯坦福大学的 Perin 等人在仿真中验证了该方法对速率达 700 rad/s 偏振旋转的补偿<sup>[18]</sup>。



注： $\varphi_0$ 、 $\theta$ 、 $\varphi_1$  分别为 3 个移相器的相位偏移大小,可根据输入光信号的特性调整。

图5 偏振控制器结构

Figure 5 Structure of polarization controller

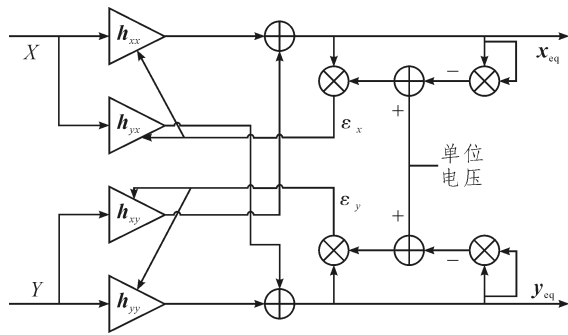
### 1.3 模拟自适应均衡

在数字相干光通信系统中,需要数字自适应均衡器进行色散补偿和偏振解复用 (偏振旋转补偿),在模拟相干中也有同样的需求。对于色散较弱的短距传输场景,可使用模拟器件搭建均衡器取代复杂高功耗的数字均衡器。因为恒模算法 (Constance

Modulus Algorithm, CMA) 结构较为简单, 容易实现, 在模拟均衡器中运用较多。图 6 所示为使用 CMA 来调节权重系数的模拟均衡器的架构。均衡器由一个前馈块和误差函数计算部分组成。前馈块具有 4 个系数为  $h_{xx}$ 、 $h_{xy}$ 、 $h_{yx}$  和  $h_{yy}$  的滤波器, 并以蝶形结构布置。 $x$ 、 $y$  分别为  $X$  和  $Y$  偏振信号;  $h_{xx}$ 、 $h_{xy}$ 、 $h_{yx}$  和  $h_{yy}$  均为向量。该结构产生均衡的输出信号  $x_{eq}$  和  $y_{eq}$ , 以及在误差发生器中计算的 CMA 误差信号  $\epsilon_x$  和  $\epsilon_y$ <sup>[19-21]</sup>。 $x$ 、 $y$ 、 $x_{eq}$  和  $y_{eq}$  均为复数信号。以  $x_{eq}$  为例, 均衡器的表达式为

$$x_{eq}(t) = \sum_{k=0}^L h_{xx,k}(t)x(t - k\tau_d) + \sum_{k=0}^L h_{xy,k}(t)y(t - k\tau_d), \quad (1)$$

式中:  $h_{xx,k}$  为  $h_{xx}$  的第  $k$  项;  $\tau_d$  为抽头延迟;  $k$  为抽头序号,  $0 \leq k \leq L$ ,  $L$  为每个均衡器中抽头的总个数。



注:  $\epsilon_x$  和  $\epsilon_y$  均为误差反馈系数。

图 6 使用 CMA 的模拟均衡器

Figure 6 Analog equalizer using CMA

均衡器权重系数的更新方程如下:

$$h_{xx,k}(t + \Delta t) = \mu \int_t^{t+\Delta t} x_{eq}(\tau)(1 - |x_{eq}(\tau)|^2) \times x^*(\tau - k\tau_d) d\tau + h_{xx,k}(t), \quad (2)$$

$$h_{xy,k}(t + \Delta t) = \mu \int_t^{t+\Delta t} y_{eq}(\tau)(1 - |y_{eq}(\tau)|^2) \times x^*(\tau - k\tau_d) d\tau + h_{xy,k}(t), \quad (3)$$

式中:  $\Delta t$  为均衡器迭代的步长;  $x^*$  为  $x$  的共轭;  $\mu$  为微调系数。同理可得  $y_{eq}$  表达式及权重系数更新方程。

模拟均衡器中主要的计算操作包括延迟、加法、乘法和积分, 将这些计算单元组合就能组成模拟均衡器。模拟延迟可以由级联的数个共发射极的 CMOS 单元以及作为输出缓冲的共集电极单元组成, 可以增减共发射极单元的数目来调整延时时间。虽然无源器件也可以组成延迟单元, 但延迟线所需的面积较大, 不利于集成芯片的布局。模拟加法的实现可以通过直接将需要和的电流同时加载在同

一电阻上, 以实现电流上的相加效果, 这种方法的结 构最简单, 占用面积最小; 当需要额外增益的时候, 也可以使用 CMOS 搭建结构进行加法操作, 该结构由两个共发射极单元组成。模拟乘法器可以由吉尔伯特单元<sup>[22]</sup>实现, 复数乘法器可通过连接 4 个这样的吉尔伯特单元实现, 而平方电路可通过向吉尔伯特单元的两个输入端提供相同的信号来实现。均衡器的稳态性能主要由模拟积分器的直流增益和截止频率决定, 积分器除了积分部分与额外增益部分之外, 还需要附带复位电路, 以初始化权重系数。

上面介绍的模拟均衡器结构不需要 ADC 采样量化, 能直接对模拟信号进行均衡, 不含任何数字逻辑器件, 极大地简化了接收机结构。但其互连结构较为复杂, 寄生电容较大, 限制了传输的速率。除此之外, 还有一种在模拟均衡器中搭配低速数字逻辑器件以改善上述问题的方法。北京大学的 Sheng 等人使用 28 nm CMOS 工艺, 实现了传输速率为 200 Gbit/s 的双偏振正交相移键控 (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying, DP-QPSK) 模拟相干接收机。其仅使用符号检测和 ADC 低速采样信号来作为 CMA 均衡器的输入, 以最小化数字器件的复杂度和能耗, 能耗仅为 4.6 pJ/b<sup>[23]</sup>。该方案的应用场景为准静态的色散, 且偏振旋转变慢 (低于 300 kHz), 此场景也基本符合数据中心等短距高速传输场景的实际情况。CMA 需要采集均衡前信号和均衡后信号来计算误差损失函数, 该方案中均衡前信号仅测量符号, 均衡后信号用 8 bit ADC 采集, 两者的采样率均为信号波特率的 1/256, 以最小化均衡器能耗。实验证明, 对于准静态的色散, 环路收敛后均衡器系数变化缓慢, 符号检测与 ADC 低采样率运行虽然带来了较高的环路延迟, 但足够跟踪变化缓慢的色散及偏振旋转。

## 2 其他简化相干技术

除了模拟相干接收技术之外, 还有几种与模拟相干类似的简化相干接收技术。

### 2.1 准相干接收技术

准相干接收技术是一种简化的相干接收方式, 也可以认为是 IMDD 技术的改进。其接收结构框图如图 7 所示。接收的光信号在分为两束偏振信号后, 依次经过 PD、TIA 和包络检波器 (通常用二极管制作), 合并包络得到最终输出信号。因为准相干接收技术不需要光信号的频率与相位信息, 仅检测强度信息, 相较于传统数字相干技术省去了 ADC 与

DSP 等诸多结构,功耗和复杂度都大大降低;而相较于同样只检测强度信息的 IMDD,准相干技术因为引入了本振光,在灵敏度上有着巨大的优势。另外,准相干接收技术也利用了单边带滤波技术。可以利用 PD 和 TIA 本身具有的频率选择特性,将其组合达到去掉一侧边带的效果,将接收的信号变为单边带信号。在合并包络信号后,色散引起的畸变可以有效地抑制。不过,单边带滤波无法改善色散带来的衰减,也不能解决频带展宽导致的码间串扰(Inter-Symbol Interference, ISI)问题。因此准相干接收在色散较强的长距离传输场景中仍有着局限性<sup>[24]</sup>。

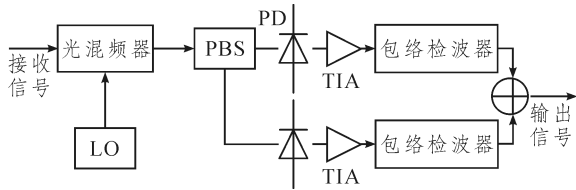


图 7 准相干接收结构

Figure 7 Structure of quasi-coherent receiver

在这个结构中,决定准相干接收性能最重要的部分是包络检波器,因此围绕用于包络检波器的研究颇为火热。包络检波器主要的性能指标有两个,一是比特率,二是频带利用率,即比特率除以载波频率。包络检波器中使用的二极管主要分为 3 种:肖特基二极管(Schottky Diode)、高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)以及异质结双极晶体管(Heterojunction Bipolar Transistors, HBT)。表 1 所示为目前包络检测器主要研究成果,及其使用的技术和性能参数。

表 1 包络检波器研究成果

Table 1 Research status of envelope detectors

文献	载波频率/GHz	比特率/Gbit/s	比特率与载波频率比值(%)	技术类型
[25]	4	4.0	100.0	Schottky diode
[26]	7	2.5	35.7	Schottky diode
[27]	6	2.5	41.7	GaAs PHEMT
[28]	101	26.0	25.7	InGaAs mHEMT
[29]	108	24.0	22.2	InGaAs mHEMT
[30]	300	24.0	8.0	InP HBT

注:PHEMT 为赝配高电子迁移率晶体管;mHEMT 为应变高电子迁移率晶体管。

## 2.2 KK 接收技术

KK 接收技术是一种简化相干接收的技术,其利用信号幅度与相位的 KK 关系,可以从电流强度信息中提取出唯一对应的相位信息,从而重建光场。因为接收端只需要检测强度信息,因此可以大大简

化接收机结构<sup>[31]</sup>。

KK 接收技术要求接收的信号必须满足最小相位条件,即信号的轨迹不能包围原点(包括所有的星座点以及星座点之间转换的轨迹)。因此,为了满足这个条件,未调制的载波分量必须足够强。最简单的方法是在发送端加入较强的未调制载波,但这样会占用大量的发射机功率,且这种做法仅适用于单偏振调制格式,对于多偏振复用的信号,即使在发送端满足最小相位条件,经过光纤传输之后偏振信号互相耦合,在接收端也不再满足最小相位条件。另一种方案是在接收端通过 PBS 将偏振信号分开后,用 LO 向两路偏振分别加入频率对准的未调制载波,以满足公式的条件,但加入频率对准的 LO 会大大增加 KK 接收机的复杂度。这与 KK 接收机想要简化相干接收结构的初衷是背道而驰的<sup>[2]</sup>。除此之外,因为 KK 检测的是光电流的平方波形,因此接收端需要两倍于传输比特率的采样率,这也对接收机带来了额外的负担。KK 接收技术的研究现状如表 2 所示。

表 2 KK 接收技术研究现状

Table 2 Research status of KK receiver

文献	比特率/Gbit/s	传输距离/km	调制格式	偏振个数
[32]	400	160	16-QAM	2
[33]	279	100	DMT	1
[34]	267	300	16-QAM	1
[35]	220	80	16-QAM	1
[36]	168	80	64-QAM	1
[37]	112	80	4-PAM	1

注:QAM 为正交幅度调制;DMT 为离散多载波调制;PAM 为脉冲幅度调制。

由表可知, KK 接收技术可以适用于高阶调制格式(如 64QAM),能达到最高 400 Gbit/s 的比特率。但 KK 的传输实验仍以单偏振为主,双偏振的成功案例较少。

KK 接收技术能够在不需要 LO 的情况下实现相干传输,从而显著降低了接收机的复杂度。然而, KK 接收技术中与数据一起传输的未调制载波占用了大量的光功率,且需要更高的采样率,传输多偏振复用信号则会增加结构复杂性,这些劣势限制了 KK 接收技术的实际应用。

## 2.3 差分接收技术

差分接收技术的原理是,通过估计两个或多个连续符号之间的相位差来执行相干检测。因此差分接收并不需要提取出载波进行相干检测,而是与延迟信号进行混频,这省去了载波恢复结构,但仍需要进行

时钟恢复。差分接收可分为无 LO 和有 LO 结构。

在无 LO 结构中,延迟由光学元件完成,电子元件仅进行时钟恢复和检测。这种结构相对简单,但由于光学延迟与载波波长相关,因此该结构对发射机激光器的频率漂移非常敏感。对于 DP-QPSK,在没有延迟干涉仪调谐的 224 Gbit/s 下,±800 MHz 的频率漂移将导致 2 dB 的损失<sup>[38]</sup>。

在有 LO 结构中,延迟在经过 PD 后,在电域上完成。相较于无 LO 结构,虽然复杂度提高,但在灵敏度与损伤补偿上有着优势。因为加入了 LO,该结构的性能也会被 LO 与发射机激光器之间的频差所影响<sup>[39]</sup>。Perin 等人在实验中发现,在 224 Gbit/s 的 DP-QPSK 信号传输实验中,发射机与 LO 激光器之间的 2 GHz 频差就会导致近 3 dB 的信噪比损失<sup>[18]</sup>。

### 3 结束语

随着信息社会的加速构建,光通信技术作为现代高速通信的主干技术,在社会经济发展中发挥着越来越重要的作用。在光通信的基础设施建设中,除了传输速率外,设备的功耗、复杂度和成本也越来越受到关注,简化相干接收技术正是在这些方面具有优势,在倡导绿色、节能的环境下有着广阔的发展前景。本文介绍了模拟相干接收技术的典型架构,各个部分的具体实现方式,以及与模拟相干技术相近的其他简化相干技术,包括准相干技术、KK 技术和差分接收技术。目前,简化相干技术仍处在实验探究阶段,产业化较为有限,许多研究成果虽有技术上的进展,但不够契合工业界的实际需求,例如为了追求传输性能而大大增加系统复杂度,背离了提供低功耗低成本的简化相干方案的出发点,因此目前实际应用还较为有限。未来,简化相干技术研究应立足于实际应用场景,在传输性能和器件的成本、功耗和复杂度之间寻找到平衡点,推动简化相干技术更广泛的应用,为光通信技术发展注入新的活力。

#### 参考文献:

- [1] 岳天亮,朱兵,苗益川,等.数据中心服务器功耗模型研究进展[J].智能计算机与应用,2023,13(9):17-24.  
Yue T L, Zhu B, Miao Y C, et al. Research Progress of Server Power Consumption Model in Data Center[J]. Intelligent Computer and Applications, 2023, 13(9): 17-24.
- [2] Perin J K, Shastri A, Kahn J. Coherent Data Center

Links[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(3): 730-741.

- [3] Hirokawa T, Pinna S, Hosseinzadeh N, et al. Analog Coherent Detection for Energy Efficient Intra-data Center Links at 200 Gbps per Wavelength[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(2): 520-531.
- [4] Liao C F, Liu S I. 40 Gb/s Transimpedance-AGC Amplifier and CDR Circuit for Broadband Data Receivers in 90 nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(3): 642-655.
- [5] Lu M, Park H C, Bloch E, et al. An Integrated 40 Gbit/s Optical Costas Receiver [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(13): 2244-2253.
- [6] Lu M, Park H C, Bloch E, et al. Highly Integrated Homodyne Receiver for Short-reach Coherent Communication[C]//International Photonics and Optoelectronics. Online: OSA, 2015: OT2A. 4.
- [7] Valenzuela L A, Xia Y, Maharry A, et al. A 50-GBaud QPSK Optical Receiver with a Phase/Frequency Detector for Energy-efficient Intra-data Center Interconnects [J]. IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society, 2022, 2: 50-60.
- [8] Xia Y, Valenzuela L, Maharry A, et al. A Fully Integrated O-band Coherent Optical Receiver Operating up to 80 Gb/s [C]//2021 IEEE Photonics Conference (IPC). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2021: 9592881.
- [9] Raveendranath R K, Nambath N, Gupta S. Frequency Detector for Carrier Phase Synchronization in 50 Gbps QPSK Receiver in Analog Domain[C]//2015 IEEE International Broadband and Photonics Conference (IBP). Bali, Indonesia:IEEE, 2015: 7230766.
- [10] Rideout H R, Seregelyi J S, Paquet S, et al. Discriminator-aided Optical Phase-lock Loop Incorporating a Frequency Down-conversion Module[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(22): 2344-2346.
- [11] Nambath N, Gupta A, Gupta S. A Low Power 100 Gbps DP-QPSK Receiver Using Analog Domain Signal Processing[C]//2013 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2013: 470-473.
- [12] Nambath N, Gupta S. Low Power Terabit /Second Optical Interconnects for Data Centers[C]//2014 International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM). Bangalore, India:IEEE, 2014: 6983991.
- [13] Choutagunta K, Kahn J M. Dynamic Channel Modeling for Mode-division Multiplexing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(12): 2451-2463.
- [14] Bulow H, Baumert W, Schmuck H, et al. Measurement of the Maximum Speed of PMD Fluctuation in Installed Field Fiber[C]//OFC/IOOC. Technical Digest. Optical Fiber Communication Conference, 1999, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication. San Diego, CA,

- USA: IEEE, 1999: 766343.
- [15] Noe R, Heidrich H, Hoffmann D. Endless Polarization Control Systems for Coherent Optics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(7): 1199–1208.
- [16] Walker N G, Walker G R. Endless Polarisation Control Using Four Fibre Squeezers[J]. *Electronics Letters*, 1987, 23(6): 290–292.
- [17] Heidrich H, von Helmolt C H, Hoffmann D, et al. Polarisation Transformer on Ti: LiNbO<sub>3</sub> with Reset-free Optical Operation for Heterodyne/Homodyne Receivers[J]. *Electronics Letters*, 1987, 23(7): 335.
- [18] Perin J K, Shastri A, Kahn J M. Design of Low-power DSP-free Coherent Receivers for Data Center Links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(21): 4650–4662.
- [19] Nambath N, Ashok R, Manikandan S, et al. All-analog Adaptive Equalizer for Coherent Data Center Interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(21): 5867–5874.
- [20] Nambath N, Raveendranath R K, Banerjee D, et al. Analog Domain Signal Processing-based Low-power 100-Gb/s DP-QPSK Receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(15): 3189–3197.
- [21] Wu M, Cornett F. Discrete-time and Continuous-time Constant Modulus Algorithm Analysis[C]//Proceedings of the Twenty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory. Starkville, MS, USA: IEEE, 1995: 390530.
- [22] Razavi B. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* [M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 2000.
- [23] Sheng K, Niu H, Zhang B, et al. A 4.6-pJ/b 200-Gb/s Analog DP-QPSK Coherent Optical Receiver in 28-nm CMOS[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2023, 58(1): 45–56.
- [24] 孔令桥, 卜勤练. 准相干技术在 C 波段 25 Gbit/s 光模块中的研究与应用[J]. *光通信研究*, 2021(1): 36–41.
- Kong L Q, Bu Q L. Research and Application of Quasi-coherent Technology in C-band 25 Gbit/s Optical Transceiver[J]. *Study on Optical Communications*, 2021(1): 36–41.
- [25] Granja A B, Cimoli B, Rodriguez S, et al. Ultra-wideband Balanced Schottky Envelope Detector for Data Communication with High Bitrate to Carrier Frequency Ratio[C]//2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017: 8059074.
- [26] Cimoli B, Valdecasa G S, Granja A B, et al. An Ultra-wideband Schottky Diode based Envelope Detector for 2.5 Gbps Signals[C]//2016 46th European Microwave Conference (EuMC). London, UK: IEEE, 2016: 7824332.
- [27] Cimoli B, Páez J S R, Turhaner A, et al. Active HEMT based Envelope Detector for Ultra-wideband Wireless Communication Systems[C]//2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2018: 8439661.
- [28] Thome F, Maroldt S, Ambacher O. Novel Destructive-interference-envelope Detector for High Data Rate ASK Demodulation in Wireless Communication Receivers[C]//2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2015: 7166805.
- [29] Thome F, Maroldt S, Schlechtweg M, et al. A Low-power W-band Receiver MMIC for Amplitude Modulated Wireless Communication up to 24 Gbit/s[C]//2014 Asia-Pacific Microwave Conference. Sendai, Japan: IEEE, 2014: 7067668.
- [30] Song H J, Ajito K, Muramoto Y, et al. 24 Gbit/s Data Transmission in 300 GHz Band for Future Terahertz Communications[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(15): 953.
- [31] Mecozzi A, Antonelli C, Shtaf M. Kramers-Kronig Coherent Receiver[J]. *Optica*, 2016, 3(11): 1220.
- [32] Zhu Y, Zou K, Ruan X, et al. Single Carrier 400G Transmission with Single-ended Heterodyne Detection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(21): 1788-1791.
- [33] Füllner C, Adib M M H, Wolf S, et al. Complexity Analysis of the Kramers-Kronig Receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(17): 4295–4307.
- [34] Chen X, Antonelli C, Chandrasekhar S, et al. Kramers-Kronig Receivers for 100-km Datacenter Interconnects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(1): 79–89.
- [35] Fan S, Zhuge Q, Xing Z, et al. 264 Gb/s Twin-SSB-KK Direct Detection Transmission Enabled by MIMO Processing[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2018: 8386169.
- [36] Li Z, Erkiliç M S, Shi K, et al. Spectrally Efficient 168 Gb/s/λ WDM 64-QAM Single-sideband Nyquist-subcarrier Modulation with Kramers-Kronig Direct-detection Receivers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(6): 1340–1346.
- [37] Shu L, Li J, Wan Z, et al. Single-lane 112-Gbit/s SSB-PAM4 Transmission with Dual-drive MZM and Kramers-Kronig Detection over 80-km SSMF [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(6): 7204509.
- [38] Kim H, Winzer P J. Robustness to Laser Frequency Offset in Direct-detection DPSK and DQPSK Systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(9): 1887–1891.
- [39] Pawula R F. Distribution of the Phase Angle between Two Vectors Perturbed by Gaussian Noise II[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2001, 50(2): 576–583.