

## 激光与光电子学进展

## 基于相干接收机的超高分辨率相干光谱分析

梁进荣<sup>1,2</sup>, 刘嫜<sup>1\*</sup>, 李尚远<sup>2</sup>, 耿敏明<sup>1</sup>, 张振荣<sup>1</sup><sup>1</sup>广西大学计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004;<sup>2</sup>清华大学电子工程系北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084

**摘要** 提出了一种基于相干接收机的相干光谱分析方案。采用相干接收机将待测信号与本振光进行同相和正交(IQ)混频和平衡探测,依据光外差原理计算出待测信号的功率,根据所计算出的功率与相应的本振频率之间的映射关系对待测信号的光谱进行重构。实验结果表明,当本振的扫描速率在 80~200 nm/s 范围时,分辨率优于 12.5 MHz。所提出的光谱分析方案具备超高分辨率,可用于快速提取超密集波分复用系统精细的光谱结构。

**关键词** 光谱学; 光外差; 相干接收机; 超密集波分复用; 超高分辨率

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221189

## Ultrahigh-Resolution Coherent Spectral Analysis Based on Coherent Receivers

Liang Jinrong<sup>1,2</sup>, Liu Qiang<sup>1\*</sup>, Li Shangyuan<sup>2</sup>, Geng Minming<sup>1</sup>, Zhang Zhenrong<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;<sup>2</sup>Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** A coherent spectrum analysis scheme based on a coherent receiver is proposed. The coherent receiver is used to perform in-phase and quadrature (IQ) mixing and balanced detection of the signal under test and optical local oscillator. The power of the signal under test is calculated according to the optical heterodyne principle, and the spectrum of the signal under test is reconstructed according to the mapping relationship between the calculated power and the corresponding frequency of the optical local oscillator. The experimental results show that the resolution is above 12.5 MHz when the sweeping rate of the optical local oscillator is in the range of 80–200 nm/s. The proposed spectral analysis scheme has an ultrahigh resolution and can be used to rapidly extract the fine spectral structure of ultradense wavelength division multiplexing systems.

**Key words** spectroscopy; optical heterodyne; coherent receiver; ultradense wavelength division multiplexing; ultrahigh resolution

## 1 引言

目前,超密集波分复用(UDWDM)的信道间隔可达几个吉赫兹<sup>[1]</sup>,然而传统的光谱分析仪(OSA)大多基于光栅衍射原理,分辨率常为 1.25 GHz 左右<sup>[2]</sup>,难以获取 UDWDM 精细的光谱结构。现代高分辨率光谱仪主要有基于受激布里渊散射效应(SBS)的布里渊光谱仪(BOSA)和基于光外差的相干光谱仪(COSA)<sup>[3-4]</sup>。BOSA 是基于 SBS 窄带放大特性实现光谱分析,放大特性与光纤长度成正比,对机械振动较为敏感<sup>[5]</sup>;COSA 依据光外差原理,通过待测信号

(SUT)与光学本振(LO)进行拍频处理获取 SUT 功率与 LO 频率之间的映射关系重构 SUT 的光谱,其优点在于不依赖光纤长度、鲁棒性好并且可解决传统 OSA 分辨率低的问题<sup>[6-11]</sup>。

2002 年,美国安捷伦实验室利用 COSA 测量了高强度噪声水平的伪随机比特序列(PRBS)调制分布式反馈激光器(DFB)的精细光谱结构<sup>[8]</sup>。同年该实验室系统研究了 COSA 的 LO 扫描速率、分辨率和功率精度之间的相互制约关系<sup>[9]</sup>。2016 年,哈尔滨工业大学冯昆鹏等<sup>[10]</sup>利用窄带滤波器实现了分辨率为 6 MHz 的 COSA。2018 年,哈尔滨工业大学吴伟东<sup>[11]</sup>利用维

收稿日期: 2022-04-01; 修回日期: 2022-05-12; 录用日期: 2022-06-14; 网络首发日期: 2022-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61965003,61741504)、广西自然科学基金(2018GXNSFAA294133)

通信作者: \*q.liu@gxu.edu.cn

纳解卷积算法,将 COSA 分辨率提升至 5 MHz。可见, COSA 在超高分辨率光谱分析领域有着良好的应用前景。

上述 COSA 对 SUT 功率的获取均是通过统计分辨率带宽(RBW)滤波器带内的能量以获取相应 LO 频率下所对应的 SUT 功率,进行 SUT 光谱重构。该处理方式结构简单,但需要进行相位噪声抑制以提升 COSA 重构光谱的质量。为此,本文将 SUT 与 LO 先进行 IQ 混频后平衡探测以抑制相位噪声,即进行相位分集处理。并且,考虑到 SUT 和 LO 的偏振态可能互相正交,经过平衡光电探测器(BPD)拍频输出为零,无法对 SUT 进行探测,需进行偏振分集处理。同时满足这两个处理要求的器件为光相干接收机,此类接收机内部具有 IQ 混频器,即光 90°混频器,常常用于高阶调制格式信号的调制和解调,但本文尝试将其用于相干光谱分析。为了便于表述,基于 RBW 滤波器的 COSA 和基于相干接收机的 COSA 分别使用 RBW-COSA 和 IQ-COSA 来表示。

## 2 基本原理

### 2.1 IQ-COSA 重构光谱的原理

本文提出的 IQ-COSA 采用相干接收机对信号进行偏振分集和相位分集处理,其内部结构如图 1 所示。SUT 和 LO 的光场分别用  $E_s$  和  $E_{LO}$  表示,  $E_s$  先经过 PBS 产生偏振态互相正交的  $E_{sr}$  和  $E_{sy}$ ,再分别与相同偏振态的  $E_{LO}$  进入光 90°混频器(OH)以实现偏振分集处理。 $E_{sr}$  和  $E_{LOx}$  输入 90° OH1 进行 IQ 混频,输出 4 路光信号  $E_1 \sim E_4$ ,经平衡探测输出 2 路 IQ 信号  $V_1(\omega_{LO})$  和  $V_2(\omega_{LO})$ 。同理,  $E_{sy}$  和  $E_{LOy}$  则为另一路相位分集处理,也输出 2 路 IQ 信号  $V_3(\omega_{LO})$  和  $V_4(\omega_{LO})$ 。通过对电信号  $V_1(\omega_{LO}) \sim V_4(\omega_{LO})$  进行数字处理,可求出  $E_s$  不同的频谱分量  $|E_s(\omega_{LO})|$ ,具体推导<sup>[12-15]</sup>如下。

SUT 的光场  $E_s$  经过 PBS 分成偏振态互相正交的

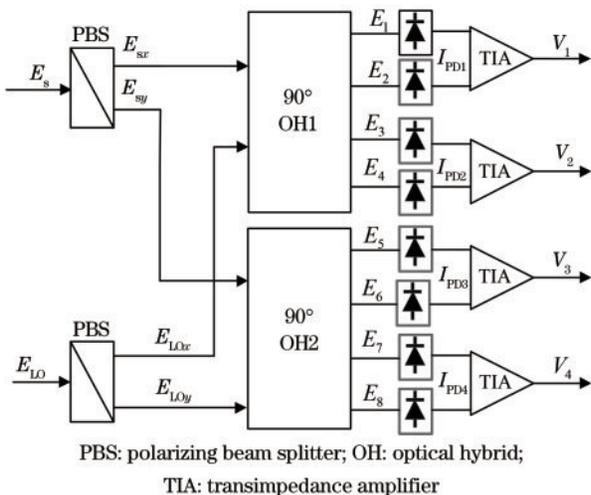


图 1 IQ-COSA 的内部结构图<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Internal structure of IQ-COSA<sup>[11]</sup>

$E_{sr}$  和  $E_{sy}$  分别为

$$\begin{bmatrix} E_{sr} \\ E_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha} A_s \exp(j\delta) \\ \sqrt{1-\alpha} A_s \end{bmatrix} \exp[j\omega_s t + j\varphi_s(t)], \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  和  $\delta$  分别为  $E_s$  分配到两个正交偏振态的功率比和相位差;  $A_s$  和  $\varphi_s(t)$  分别为  $E_s$  的幅度和相位噪声。同理,  $E_{LO}$  经过 PBS 后也分成偏振态互相正交的  $E_{LOx}$  和  $E_{LOy}$  分别为

$$\begin{bmatrix} E_{LOx} \\ E_{LOy} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} A_{LO} \\ A_{LO} \end{bmatrix} \exp[j\omega_{LO} t + j\varphi_{LO}(t)], \quad (2)$$

式中,  $A_{LO}$  和  $\varphi_{LO}(t)$  分别为  $E_{LO}$  的幅度和相位噪声。  $E_s$  和  $E_{LO}$  经过 IQ 混频后输出  $E_1 \sim E_8$  的光场分别为

$$\begin{cases} E_{1,2} = (E_{sr} \pm E_{LOx}/\sqrt{2})/2 \\ E_{3,4} = (E_{sr} \pm jE_{LOy}/\sqrt{2})/2 \\ E_{5,6} = (E_{sy} \pm E_{LOx}/\sqrt{2})/2 \\ E_{7,8} = (E_{sy} \pm jE_{LOy}/\sqrt{2})/2 \end{cases}. \quad (3)$$

$E_1 \sim E_8$  经过平衡探测后输出电流  $I_{PD1}(\omega_{LO}) \sim I_{PD4}(\omega_{LO})$ 。假设 IQ-COSA 内部 8 个光电探测器的响应度均为  $R$ , 4 个跨阻放大器(TIA)的放大倍数均为  $G$ , 则经过 TIA 放大后输出 4 路 IQ 信号的电压  $V_1(\omega_{LO}) \sim V_4(\omega_{LO})$  分别为

$$V_1(\omega_{LO}) = GI_{PD1}(\omega_{LO}) =$$

$$GR \sqrt{\frac{\alpha}{2}} |A_s(\omega_{LO}) A_{LO}(\omega_{LO})| \cos[\varphi_s(t) - \varphi_{LO}(t) + \delta]$$

$$V_2(\omega_{LO}) = GI_{PD2}(\omega_{LO}) =$$

$$GR \sqrt{\frac{\alpha}{2}} |A_s(\omega_{LO}) A_{LO}(\omega_{LO})| \sin[\varphi_s(t) - \varphi_{LO}(t) + \delta]$$

$$V_3(\omega_{LO}) = GI_{PD3}(\omega_{LO}) =$$

$$GR \sqrt{\frac{1-\alpha}{2}} |A_s(\omega_{LO}) A_{LO}(\omega_{LO})| \cos[\varphi_s(t) - \varphi_{LO}(t)]$$

$$V_4(\omega_{LO}) = GI_{PD4}(\omega_{LO}) =$$

$$GR \sqrt{\frac{1-\alpha}{2}} |A_s(\omega_{LO}) A_{LO}(\omega_{LO})| \sin[\varphi_s(t) - \varphi_{LO}(t)], \quad (4)$$

则  $E_s$  的频谱分量  $|E_s(\omega_{LO})|$  可表示为

$$|E_s(\omega_{LO})| = \frac{\sqrt{E_{sr}^2 + E_{sy}^2}}{GR |A_{LO}(\omega_{LO})|} =$$

$$\frac{\sqrt{V_1^2(\omega_{LO}) + V_2^2(\omega_{LO}) + V_3^2(\omega_{LO}) + V_4^2(\omega_{LO})}}{GR |A_{LO}(\omega_{LO})|} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可知,在理想条件下  $|E_s(\omega_{LO})|$  与 SUT 和 LO 的相位噪声  $\varphi_s(t)$  和  $\varphi_{LO}(t)$  无关, IQ-COSA 具备一定相位噪声抑制能力。并且  $R$ 、 $G$  和  $|A_{LO}(\omega_{LO})|$  均为常数,  $\omega_{LO}$  可由可调谐激光器(TLS)进行调节,因此,可根据式(5)求得 SUT 任意的频谱分量,重构 SUT 的光谱。

### 3 仿真与实验研究

#### 3.1 仿真与分析

理想激光器发射的连续波的光场为正弦波,即相位、频率和振幅是恒定的,但实际的激光器容易受到自发辐射和泵浦源的影响产生噪声叠加,如存在相对强度噪声(RIN)和相位噪声<sup>[15]</sup>,可利用 COSA 内部平衡探测器(BPD)实现 RIN 抑制<sup>[16-18]</sup>,但还需对 SUT 和 LO 的相位噪声进行抑制。本文利用 OptiSystem15.0 和 Matlab 进行联合仿真以研究 LO 和 SUT 相位噪声对 COSA 功率精度的影响。仿真简化框图如图 2 所示,图中表明传统 RBW-COSA 并无相位噪声抑制结构,而 IQ-COSA 可利用相干接收机内部光 90°混频器进行相位分集处理以抑制相位噪声。

仿真时,SUT 的功率和线宽分别设置为 1 dBm 和 1 kHz,SUT 的功率和线宽分别设置为 10 dBm 和 1 kHz,RBW 滤波器截止频率设置为 10 MHz。SUT 和 LO 的相位差变化范围为 0°~540°,以模拟二者的相位噪声。仿真结果图 3(a)中 ideal IQ-COSA 是指 IQ-COSA 内部光 90°混频器不存在相位偏移,达到 IQ 平衡,而 IQ-COSA 存在 5°相位失衡。图 3(a)表明,当 SUT 和 LO 相位差分别为 128.6°、308.6°和 488.6°时,RBW-COSA 功

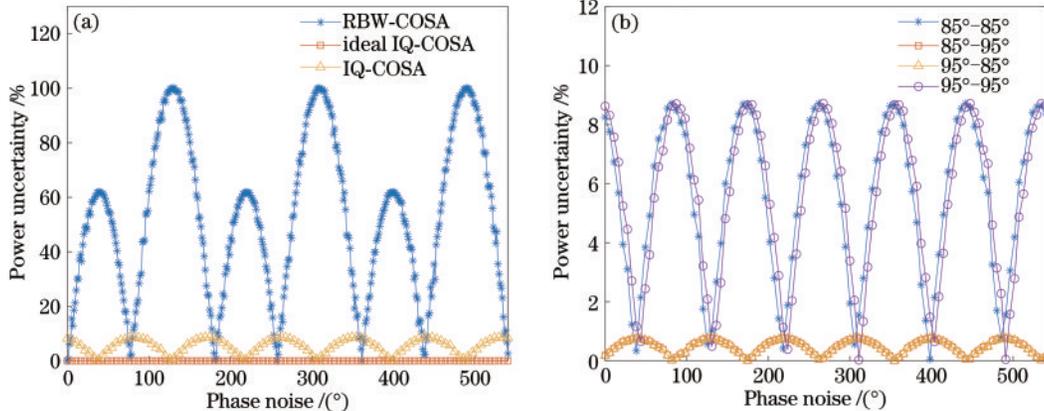


图 3 COSA 功率精度与相位噪声的关系。(a) IQ-COSA 和 RBW-COSA; (b) 不同相位偏移的 IQ-COSA

Fig. 3 COSA power accuracy versus phase noise. (a) IQ-COSA and RBW-COSA; (b) IQ-COSA with different phase deviations

#### 3.2 实验与分析

COSA 实验装置如图 4 所示,单频激光器(SFL, Anritsu, MU952505A)作为光载波与频率间隔为 75 MHz 的多音射频(RF, Ceyear, 1465L-V)输入至马赫-曾德尔调制器(MZM, Fujitsu, FTM7938EZ-L)产生谱线间隔为 75 MHz 的 SUT。可调谐激光器(TLS, Keysight, 81606A)产生的 LO 与 SUT 通过集成相干接收机(ICR, Finisar, CPRV1225A)进行 IQ 混频和平衡探测完成光电转换产生 IQ 电信号,分别为 XI、XQ、YI 和 YQ。使用数字存储示波器(DSO)采集 IQ 信号后利用 Matlab 软件离线处理,以重构 SUT 的光谱。

此外,树莓派(RP)作为微控制器通过 SPI 协议控

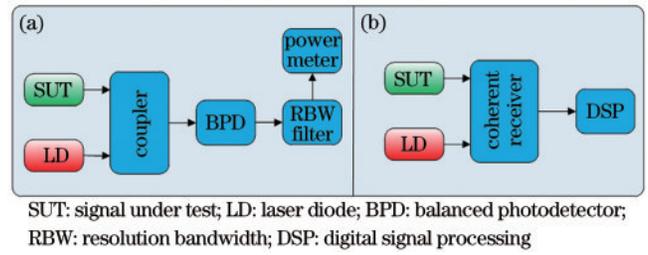


图 2 COSA 仿真简化框图。(a) RBW-COSA; (b) IQ-COSA  
Fig. 2 Simplified block diagram of COSA simulation. (a) RBW-COSA; (b) IQ-COSA

率不确定度达到最大,约为 100%,并呈现周期性特征,周期为 180°;当 IQ-COSA 不存在 IQ 失衡时,功率不确定度趋于零,功率精度接近 100%;当 IQ-COSA 存在 5°相位失衡时,功率不确定度低于 8.70%,功率精度高于 90%,这说明 IQ-COSA 与 RBW-COSA 相比能较好地抑制 SUT 和 LO 的相位噪声对重构光谱功率精度的影响。由于 IQ-COSA 内部包含 2 个光 90°混频器,则需要对这两个器件的相位偏移情况进行研究,仿真研究结果[图 3(b)]表明,当两个光 90°混频器相位偏移均为 5°或者 -5°时,IQ-COSA 的功率不确定度最大,约为 8.75%;当两个光 90°混频器相位偏移分别为 5°和 -5°时,功率不确定度最小,约为 0.76%。

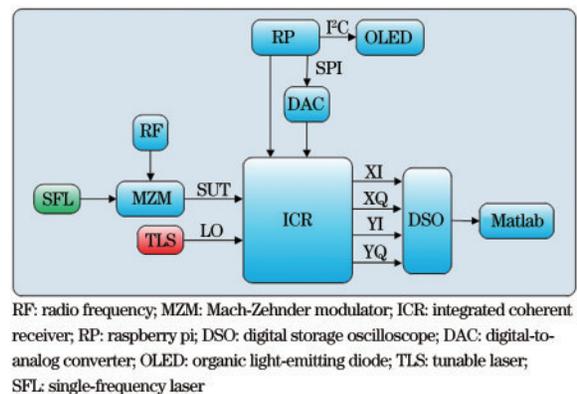


图 4 COSA 实验装置图  
Fig. 4 Experimental setup for COSA

制数模转换器(DAC)输出模拟电压的大小,以调节集成相干接收机(ICR)内部 TIA 电压放大倍数, I<sup>2</sup>C 协议用于 RP 控制有机发光二极管(OLED)输出相应数据提示信息。由于数字存储示波器(DSO)的带宽可调,当仅使用 XI 或者 XQ 数据重构 SUT 时,光谱系统为 RBW-COSA;当使用 XI、XQ、YI 和 YQ 数据重构 SUT 时,光谱系统为 IQ-COSA。

实验时 TLS 产生线性调频连续波光信号 LO,对频率间隔为 75 MHz 的 SUT 进行拍频,经过信号采集处理重构 SUT 频谱分量。为了便于绘图和对比,对 RBW-COSA 和 IQ-COSA 重构的 SUT 光谱实验结果

分别进行功率标定并使用 Matlab 的库函数 Interpolant 进行数据拟合平滑处理,如图 5 所示。在 LO 扫描速率为 1 nm/s 和 40 nm/s 时, RBW-COSA 和 IQ-COSA 重构的 SUT 光谱结构相差不大,如图 5(a)、5(b)所示;在 LO 扫描速率为 80~200 nm/s 范围时,由于 SUT 和 LO 相位噪声的影响, RBW-COSA 重构的 SUT 光谱畸变较为明显,各阶边带对称性被不同程度地破坏,如图 5(c)~5(f)所示。相比之下, IQ-COSA 由于采用 IQ 混频进行相位分集处理对 SUT 和 LO 的相位噪声进行抑制,所重构的 SUT 光谱畸变程度得到明显改善,分辨率优于 12.5 MHz,达到了超高分辨率。因此, IQ-

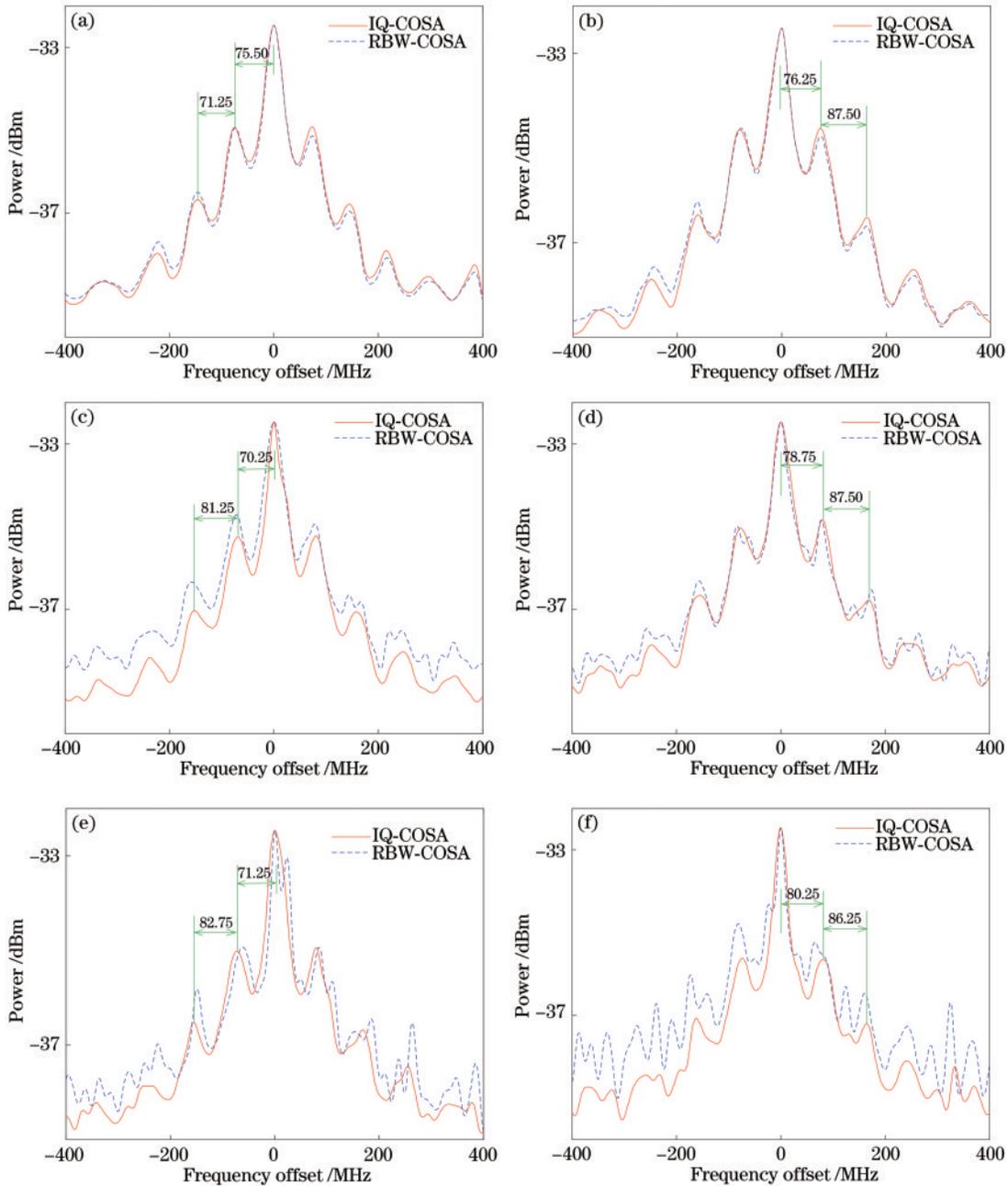


图 5 IQ-COSA 和 RBW-COSA 在不同 LO 扫描速率下重构的 SUT。(a) 1 nm/s; (b) 40 nm/s; (c) 80 nm/s; (d) 100 nm/s; (e) 150 nm/s; (f) 200 nm/s  
 Fig. 5 SUT reconstructed by IQ-COSA and RBW-COSA at different LO sweeping rates. (a) 1 nm/s; (b) 40 nm/s; (c) 80 nm/s; (d) 100 nm/s; (e) 150 nm/s; (f) 200 nm/s

COSA 可用于快速提取 UDWDM 精细的光谱结构,并且由于方案中采用了集成器件,使得光谱分析系统具有体积小、质量轻和便于携带的优点。

## 4 结 论

提出了利用相干接收机内部 IQ 混频器进行相位噪声抑制的 IQ-COSA 方案。实验结果表明, IQ-COSA 与无相位噪声抑制的 RBW-COSA 相比,在本振扫描速率为 80~200 nm/s 时,能有效改善由于相位噪声导致的分辨率下降的问题,分辨率优于 12.5 MHz,与基于衍射光栅的 OSA 常见的 1.25 GHz 分辨率相比,提升了约 100 倍,具备超高分辨率,可用于 UDWDM 系统进行频谱感知。事实上, COSA 的分辨率还取决于本振的波长精度和稳定度,当使用更高质量的本振时,可进一步提升 IQ-COSA 的分辨率。

此外,针对 IQ-COSA 内部器件实际性能与理想设计存在差异,如光 90°混频器存在相位偏移、光电二极管响应度不一致、放大器存在非线性等,使得 LO 和 SUT 进行 IQ 混频后进行光电探测输出的 I 路和 Q 路信号常常存在 IQ 失衡的问题,从而使 IQ-COSA 分辨率下降,可尝试通过数字域算法进行校正;针对 COSA 存在镜像频率干扰、分辨率难以提升的问题,可以在 IQ-COSA 的 IQ 电信号输出端添加改进型 hartley 抑制镜像结构,以抑制镜像频率干扰。

## 参 考 文 献

- [1] Segarra J, Sales V, Polo V, et al. Flexible coherent UDWDM-PON with dynamic user allocation based on limited-tunability lasers[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(9): D27-D35.
- [2] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013902.
- [3] Preussler S, Schneider T. Stimulated Brillouin scattering gain bandwidth reduction and applications in microwave photonics and optical signal processing[J]. *Optical Engineering*, 2015, 55(3): 031110.
- [4] van Deventer M O, de Blok C M, Park C. High-dynamic-range heterodyne measurement of optical spectra [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(9): 678-680.
- [5] Preussler S, Wiatrek A, Jamshidi K, et al. Ultrahigh-resolution spectroscopy based on the bandwidth reduction of stimulated Brillouin scattering[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(16): 1118-1120.
- [6] Ip E, Lau A P T, Barros D J F, et al. Coherent detection in optical fiber systems[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 753-791.
- [7] Andriolli N, Bontempi F, Rannello M, et al. 100 Gb/s (4×28 Gb/s) transmission in C-band by a directly modulated integrated transmitter and DSP-free coherent detection[J]. *Optics Communications*, 2021, 486: 126779.
- [8] Baney D M, Szafraniec B, Motamedi A. Coherent optical spectrum analyzer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(3): 355-357.
- [9] Szafraniec B, Law J Y, Baney D M. Frequency resolution and amplitude accuracy of the coherent optical spectrum analyzer with a swept local oscillator[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(21): 1896-1898.
- [10] Feng K P, Cui J W, Dang H, et al. Investigation and development of a high spectral resolution coherent optical spectrum analysis system[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25389-25402.
- [11] 吴伟东. 高分辨力相干光谱分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
Wu W D. The study of high resolution coherent spectral analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [12] 余建军, 迟楠, 陈林. 基于数字信号处理的相干光通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 46-48.  
Yu J J, Chi N, Chen L. Coherent optical communication technology based on digital signal processing[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2013: 46-48.
- [13] 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.  
Feng Y, Wen H, Zhang H Y. Digital optical coherent detection of polarization-multiplexed differential phase shift keying signal and analysis of adaptive digital polarization demultiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1268-1273.
- [14] 李赞, 李正璇, 黄新刚, 等. 基于相位调制本振的相干检测系统[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2006001.  
Li Y, Li Z X, Huang X G, et al. Coherent detection system based on phase-modulated local oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2006001.
- [15] 张骥. 光纤激光器噪声测量与抑制技术的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.  
Zhang J. Research on the noise measurement and suppression technology of fiber laser[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [16] 贝劲松, 尹凡, 钟一鸣, 等. 基于时间交织相位分集检测的相干光接入系统[J]. *光学学报*, 2021, 41(23): 2306004.  
Bei J S, Yin F, Zhong Y M, et al. Coherent optical access system based on time interleaved phase-diversity detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 2306004.
- [17] 陈敬月, 高一然, 吴钟涵, 等. 100.8 km 大动态零差相干微波光子传输链路[J]. *光学学报*, 2022, 42(5): 0506001.  
Chen J Y, Gao Y R, Wu Z H, et al. Homodyne coherent microwave photonic transmission link with 100.8 km high dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(5): 0506001.
- [18] 潘国鑫, 刘惠, 翟泽辉, 等. 平衡零拍探测器的噪声特性分析与实验研究[J]. *量子光学学报*, 2021, 27(2): 109-116.  
Pan G X, Liu H, Zhai Z H, et al. Analysis of the noise spectra in balanced homodyne detector[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2021, 27(2): 109-116.