

## 采用相干技术的高分辨光谱检测系统设计

刘玉红<sup>1,2</sup>,程其变<sup>1,2</sup>,谭佐军<sup>1,2</sup>,陈建军<sup>1,2\*</sup>

- (1. 华中农业大学 理学院, 湖北 武汉 430070;
2. 华中农业大学 应用物理研究所, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 采用外差相干技术理论上可以获得低至 MHz 量级甚至更高分辨率的光谱信息。介绍了一种基于外差相干技术方法实现的光谱检测系统, 并推导了 90° 光学混频器和平衡探测器的信号传输原理, 讨论了本振光和滤波器的性能参数与光谱检测分辨率的关系。利用光通信系统设计软件 OptiSystem 建立了完整的相干光谱检测系统的模型, 并使用波长扫描和迭代运算模拟了实际本振光信号的工作模式, 验证了该方案实现高分辨光谱分析的可行性和优越性。最后分析了对于频率间隔为 40 MHz 的被测信号, 不同的本振光扫描线宽、扫描步长和滤波器带宽参数组合实现的仿真结果, 并总结了光谱检测精度对本振光和滤波器等关键参数的要求。

**关键词:** 光谱检测; 超高分辨率; 外差相干技术; 滤波

**中图分类号:** TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0417005

## Design of high resolution optical spectrum detecting system based on interference technique

Liu Yuhong<sup>1,2</sup>, Cheng Qiluan<sup>1,2</sup>, Tan Zuojun<sup>1,2</sup>, Chen Jianjun<sup>1,2\*</sup>

- (1. College of Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Institute of Applied Physics, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The optical spectrum details could be detected theoretically even as low as MHz lever based on heterodyne interference principle. A scheme design of optical spectrum detecting system based on heterodyne interference technique was introduced, in which the signal transmission principle from the 90° optical mixer to the balanced detector was deduced. Moreover, the relationship between the settings of the local oscillator, as well as the filter intermediate frequency and the system resolution was concluded. The compact spectrum detecting system is built upon OptiSystem software, in which the wavelength sweep and iteration could be used to simulate actual local oscillator operating mode, thus the feasibility and superiority of the ultra-high resolution spectrum analysis function were verified. In the end, the simulation results of different linewidth and scanning step length of local oscillator, as well as the

收稿日期: 2018-11-14; 修订日期: 2018-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(61605053); 湖北省自然科学基金面上项目(2016CFB496);

中央高校基本科研业务费专项资金(2662016PY059)

作者简介: 刘玉红(1987-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事集成光学、光纤传感和光器件方面的研究。Email: liuyuhong1234@163.com

通讯简介: 陈建军(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事生物光电检测及智能化等方面的研究。Email: chenjianjun@mail.hzau.edu.cn

filtering parameters was given in 40 MHz frequency interval. The resolution requirement on the local oscillator and filter was concluded.

**Key words:** optical spectrum detection; ultra-high resolution; heterodyne interference technique; filtering

## 0 引言

宽带互联网的普及,人们对于网络传输的需求日益增加。光纤通信技术作为支撑通信网络的基础,也不断地发展和提升。目前光传输网络单通道通信速率已经达到 100 Gb/s 以上,偏振复用、四相移键控(QPSK)调制格式和相干接收已经作为商用光纤通信系统的标准技术<sup>[1-3]</sup>。随着光通信系统向 400 Gb/s 乃至 Tb/s 的不断演进,更高阶调制格式被引入至光通道领域中以获得更高的频率效率<sup>[4]</sup>。在这些系统中,副载波的数目通常有数千个,而副载波之间的间隔低至百 MHz 甚至十 MHz<sup>[5]</sup>。传统的光谱检测仪表(OSA)光学分辨率往往在 GHz 级别,难以区分如此精细的光谱,因此,研发具有超高分辨率的光谱检测装置对于未来高速光通信系统的研发、商用网络的光信号检测分析具有十分重要的意义<sup>[6]</sup>。

基于外差干涉的相干光谱检测方法的基本原理是使用波长连续扫描激光器作为本振光源,与待测光信号进行干涉,利用平衡探测的方式提取中频干涉分量信息,之后通过电域解调得到待测信号光谱<sup>[7]</sup>。利用该种测量方法可以获得 MHz 量级乃至更高的光谱分辨率,并且本振光源光功率比信号光功率高几个数量级,可以有效提高系统探测灵敏度。

外差干涉技术在光通信领域的应用已经非常普遍,但是目前该技术主要用于相位调制信号的解调中,譬如 QPSK、16 进制正交振幅调制(16 QAM)等信号解调<sup>[8-9]</sup>,而在其它方面的应用报道甚少。得益于相干光通信相关技术的快速发展,采用相干技术的高精度光谱分析产品的产业化条件日趋成熟,未来将很可能成为一种主流的高精度光谱分析解决方案<sup>[10]</sup>。

文中利用外差干涉理论设计了超高分辨率的光谱检测系统,并通过光通信系统设计软件 OptiSystem 实现了系统设计和功能验证,并分析了本振光、滤波器等参数对光谱测量结果的影响。

## 1 相干光谱检测原理

相干光谱检测系统原理如图 1 所示,待测信号光经过偏振分束器分为两路正交线偏振光,每一路光分别与具有同样偏振态的本振光,经 6 端口 90°混频器得到四路正交的输出光。经过两对平衡探测器得到去掉信号本底的两组干涉信号。干涉信号的强度与被测信号以及本振信号的强度均有关,干涉信号的频率为待测信号和本振信号的频率之差,称为中频信号。控制本振频率在待测信号频率范围内扫描,由于本振信号频率、强度已知,通过电域的解调,可以得到待测信号在任意频率的强度,也即光谱,两路正交偏振态的光谱之和为实际待测光的光谱。

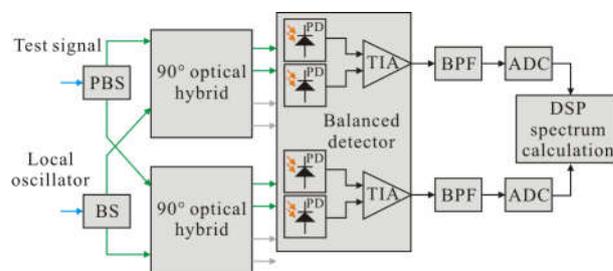


图 1 相干光谱系统原理框图

Fig.1 Schematic of coherent optical spectrum system

待测信号光和本振光可以表示为:

$$E_s(t) = \sqrt{2P_s} \exp\{j(\omega_s t + \varphi_s(t))\} \quad (1)$$

$$E_{Lo}(t) = \sqrt{2P_{Lo}} \exp\{j(\omega_{Lo} t + \varphi_{Lo})\} \quad (2)$$

式中: $P_s$ 为待测信号光功率; $\omega_s$ 为待测信号光的角频率; $\varphi_s(t)$ 为初始相位; $P_{Lo}$ 为本振光功率; $\omega_{Lo}$ 为本振光的角频率; $\varphi_{Lo}$ 为初始相位。

待测光与本振光经过 90°混频器得到四路输出,90°混频器设计原理如图 2 所示,由 4 组 3 dB 耦合器与一个 90°移相器组成<sup>[11]</sup>。

其中,3 dB 耦合器的传输矩阵表示为公式(3):

$$\begin{bmatrix} E_{10} \\ E_{20} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) \\ \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1IN} \\ E_{2IN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $E_{1IN}$  和  $E_{2IN}$  分别对应通道 1 和通道 3 输入分量； $E_{10}$  和  $E_{20}$  对应通道 1 和通道 2 输出分量。

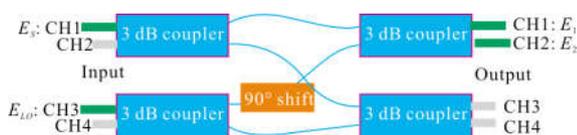


图 2 90°光学混频器原理图

Fig.2 Schematic of 90°optical mixer

待测信号光  $E_S$  和本振光  $E_{LO}$  作为 3 dB 耦合器的输入信号,经过混频器后输出可表示为:

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_S \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} E_{LO} \cdot$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} E_S - \frac{1}{2} E_{LO} \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_S \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) +$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} E_{LO} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} jE_S + \frac{1}{2} jE_{LO} \quad (5)$$

利用平衡探测器接收混频器通道 1 和通道 2 输出的光信号。两路信号光经过光电二极管转换成电流信号,再由差分跨阻放大器(TIA)转换成电压信号输出,输出信号可表示为:

$$V_i(t) = R_{TIA\_Gain} \cdot I_i(t) =$$

$$R_{TIA\_Gain} \cdot \left[ R \cdot |E_2(t)|^2 - R \cdot |E_1(t)|^2 \right] =$$

$$2R_{TIA\_Gain} R \sqrt{P_S P_{LO}} \cos[(\omega_S - \omega_{LO})t + \varphi_S(t) - \varphi_{LO}] =$$

$$2R_{TIA\_Gain} R \sqrt{P_S P_{LO}} \cos[\omega_{IF} t + \Delta\varphi(t)] \quad (6)$$

式中： $R_{TIA\_Gain}$  为 TIA 的跨阻增益； $R$  为平衡探测器的接收增益； $\omega_{IF}$  为待测信号和本振光的频率差<sup>[12]</sup>(中频)。从上式可以看到,平衡探测器的输出电压正比于  $\sqrt{P_{LO}}$ 。因此,在相干检测系统中,利用功率较大的本振光信号可以有效提高系统检测灵敏度。

在实际应用中,待测光信号一般包含多种频率信息,相应的中频信号也存在许多频率分量。利用电滤波器对中频信号进行滤波,其滤波窗口决定了允许通过的中频信号频率范围。某时刻当本振光频率固定,只有与本振光频率差在滤波器滤波窗口内的

待测信号频率分量才能被采集到,可表示为:

$$V = 2R_{TIA\_Gain} R \sqrt{P_S(t) P_{LO}} \cos(\omega_{IF} t + \Delta\varphi(t)) \quad (7)$$

通过控制本振光源在一定频率范围内扫描,探测到的信号光频率窗口也在同步移动,从而实现信号光谱扫描。当相邻的两个中频信号峰刚好不发生混频时所对应的频率差值即为光谱分辨率。滤波器的中心频率  $f$  和带宽  $\Delta f_{BW}$  决定了光谱仪的分辨能力  $\Delta\nu$ <sup>[13]</sup>,如公式(8)所示:

$$\Delta\nu = 2f + \Delta f_{BW} \quad (8)$$

式中： $BW$  表示滤波窗口宽度。

## 2 系统设计

文中使用光通信设计软件 OptiSystem 实现相干光谱检测系统。该设计主要包括测试信号源、本振光扫描模块、信号处理模块,以及光谱分析模块。

该系统通过波分复用和光学滤波模拟待测信号光,中心频率在 193.1 THz 和 193.100 5 THz,不考虑光源的偏振属性。采用周期滤波得到自由光谱范围 FSR 为 40 MHz 的光谱,如图 3 所示。

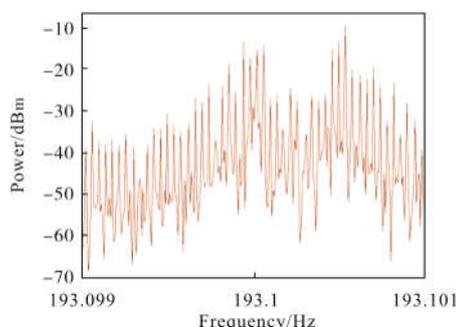


图 3 待测光实际光谱图

Fig.3 Optical spectrum of the test signal

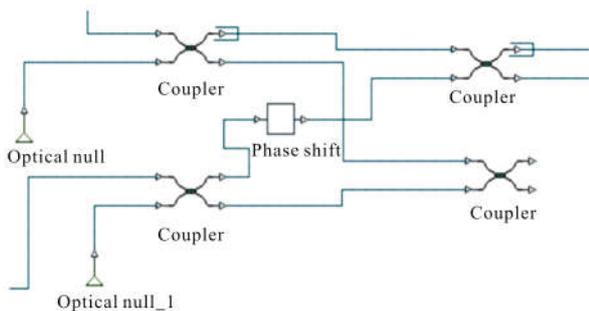
该振光为线偏振光,频率参数设置采用线性扫描“linear sweep”模式,即在一定频率范围内取多个值进行逐点扫描。设置迭代次数  $N$  和扫描范围,可计算出扫描步长,如表 1 所示。

表 1 本振光参数设置

Tab.1 Parameter settings of local oscillator

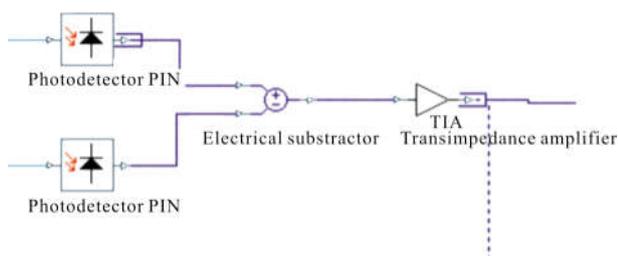
Scanning range/THz	$N$	Step length/MHz
193.099–193.101	50	40
193.099–193.101	400	5

信号处理模块分成光路传输和电路传输两部分,由 90°光学混频器、均衡器和滤波器串联组成,如图 4 所示。其中,耦合器的耦合系数为 0.5,其传输矩阵与上文所述一致,移相器的相位设置为 90°。混频器输出的通道 1 和通道 2 信号经过光电二极管转换为电流信号,差分信号经过阻抗放大器放大成电压信号,该信号再经过滤波器滤波。



(a) 90°混频器仿真结构

(a) Simulation design of 90°optical hybrid



(b) 均衡器仿真结构

(b) Simulation design of balanced detector

图 4 OptiSystem 软件仿真结构图

Fig.4 Simulation structure on OptiSystem

滤波器采用 3 阶 Butterworth 带通滤波器,为对比不同滤波窗口对光谱检测的影响,该系统设计了两组不同参数,如表 2 所示。

表 2 带通滤波器参数设置

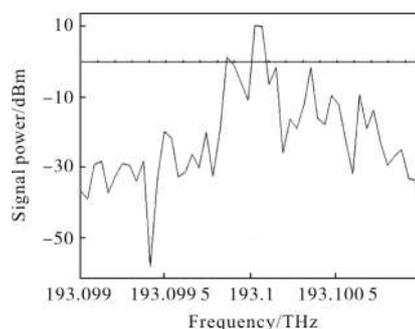
Tab.2 Parameter settings of the bandpass filter

Filtering frequency/MHz	Bandwidth/MHz	FW/MHz	$\Delta\nu$ /MHz
2	4	0-4	10
20	40	0-40	80

带通滤波器输出信号被功率计采集,得到当前扫描时刻下的功率值。以扫描本振光频率作为横轴 X 坐标,对应的功率器输出作为纵轴 Y 坐标,可以得到系统整个扫描周期内收集的光谱信息。

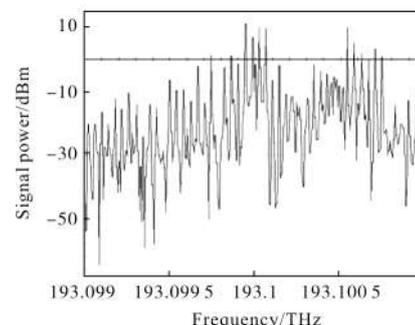
### 3 仿真结果分析

该振光的扫描步长会影响采样的精度,当扫描步长大于滤波器分辨率(8 MHz)时,如图 5(a)所示,扫描结果相对原始光谱(图 3),失去很多细节信息,严重失真。扫描步长必须小于滤波器带宽,如图 5(b)所示,此时可以扫描出所有的待测信号的频谱信息。



(a) 扫描步长 40 MHz、分辨率 8 MHz 仿真结果

(a) Simulation results of 40 MHz step length and 8 MHz resolution



(b) 扫描步长 5 MHz、分辨率 8 MHz 仿真结果

(b) Simulation results of 5 MHz step length and 8 MHz resolution

图 5 扫描步长对光谱分析的影响

Fig.5 Effect of sweep step length on spectrum analysis

滤波器滤波窗口越宽,则能够通过滤波器的中频信号谱越多,系统光学分辨能力则越低,能够检测到的光谱信息越少,如图 6 所示,当分辨率为 80 MHz 时(远大于待测信号 40 MHz 谱宽),将丢失信号的许多细节。

由于实际系统中本振光的线宽差异较大,为分析线宽对光谱分析的影响,文中还对比了 0.1 MHz 和 20 MHz 线宽的分析结果。图 5 和图 6 的本振光线宽均为 0.1 MHz。图 7 为本振光线宽 20 MHz,扫描步长 5 MHz、分辨率 8 MHz 时候的光谱分析结

果。将图 3 和图 5(b)对比发现,本振光线宽越大,则信号谱会出现展宽,相邻信号谱之间出现了混叠,导致细节部分失真。

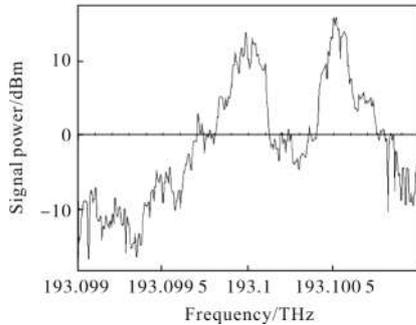


图 6 扫描步长 5 MHz、分辨率 80 MHz 仿真结果  
Fig.6 Simulation results of 5 MHz step length and 80 MHz resolution

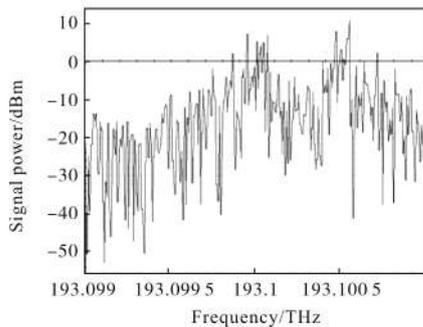


图 7 本振光线宽 20 MHz 仿真结果

Fig.7 Simulation results of 20 MHz linewidth of local oscillator

以频率间隔 40 MHz 的待测信号为例,由仿真结果可知本振光扫描步长、滤波器分辨率、本振光线宽参数对信号检测结果的影响。当本振光扫描步长越小,则光谱检测精度越高,但是同时会带来扫描时间的增加,在某些需要实时上报光谱分析结果的应用中,影响不可忽视<sup>[14]</sup>。此外,滤波器滤波窗口直接影响系统分辨率,若滤波窗口靠近低频,需要更长的采样时间窗口来采集完整的低频信号;反之,若滤波窗口频率越高,要求采样芯片(ADC)具备更高的采样率,进而增加硬件成本;此外,本振光线宽参数也将对整体系统产生重要影响<sup>[15]</sup>。

## 4 结 论

文中对基于相干技术的高分辨光谱检测原理做了系统分析,并利用 OptiSystem 软件构建了完整的光谱检测系统。在设计基于相干技术的光谱检测

系统时,需要综合考虑系统各部分的关键参数,以达到预期的设计效果。一般而言,文中系统设计应从实际待测信号频谱特性出发,得到系统分辨率需求。以此为出发点,确定电域滤波窗口参数。电域滤波窗口决定了能够被采样探测到的电信号频率分量,进而会对系统采样率、系统采样时间窗口长度产生影响。

总之,文中提出的采用相干技术的高分辨光谱检测系统,各部分功能单元之间密不可分,彼此关联、互相制约。文中通过 OptiSystem 软件仿真,阐明了部分关键系统参数对实际检测结果的影响,对实际光谱检测系统的设计具有重要指导意义。

## 参 考 文 献:

- [1] Shieh W, Bao H, Tang Y. Coherent optical OFDM: theory and design[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 841–859.
- [2] Nakazawa M, Kikuchi K, Miyazaki T. High Spectral Density Optical Communication Technologies[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 24–28.
- [3] Yang Xianglin. Optical Fiber Communication System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 139–141, 217–220.
- [4] Li Fang, He Jun, Xu Tuanwei, et al. Fiber laser sensing technology and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1025–1032. (in Chinese)  
李芳, 何俊, 徐团伟, 等. 光纤激光传感技术及其应用[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 1025–1032.
- [5] Chen Yuchen. Research of relative phase measurement of periodical signal based on ultra-high resolution optical spectrum [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)  
陈宇晨. 基于超高分辨率光谱的周期性信号相对相位测量方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [6] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013902.
- [7] Dai Yonghong, Liu Yanfei, Zhou Haotian, et al. Sensitivity testing and experiment of balanced photodetectors in the space coherent optical communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3110–3116. (in Chinese)  
代永红, 刘彦飞, 周浩天, 等. 空间相干光通信中平衡探测器灵敏度测试实验 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(10):

- 3110–3116.
- [8] Chen Mu, Ke Xizheng. Power spectrum performance and bit error rate of mixed noise in QPSK modulated optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1022005. (in Chinese)  
陈牧, 柯熙政. QPSK 调制光通信中混合噪声的功率谱性能与误码率[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1022005.
- [9] Xue Shuhao, Chen Xue, Liu Wentao. A novel carrier phase recovery for optical coherent receivers with 16 QAM modulation format[C]//ICMMCT, 2016: 194–198.
- [10] Rejoy Isaac. High resolution optical coherent -channel analyzer using balanced-coherent detection and temperature-tuned DFB laser as local oscillator [D]. Victoria: University of Victoria, 2008.
- [11] Yohei Sakamaki, Yusuke Nasu, Toshikazu Hashimoto, et al. Reduction of phase-difference deviation in 90° optical hybrid over wide wavelength range [J]. *IEICE Electronics Express*, 2010, 7(3): 216–221.
- [12] Yu Jun, Huang Mingliu, Zou Yaozhao, et al. Phase noise cancellation for coherent optical OFDM system based on polarization diversity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806001. (in Chinese)  
余骏, 黄鸣柳, 邹焱昭, 等. 偏振分集相干光 OFDM 通信系统中的相位噪声消除[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0806001.
- [13] Jiang Xuelin. The study of ultra-high resolution coherent spectral analysis system based on heterodyne interference[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)  
姜雪林. 基于外差干涉的超高分辨力相干光谱分析系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [14] Tian Haiting, Zhang Chunxi, Jin Jing, et al. Effect of modulation frequency jitter on coherent detection and its elimination algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 604–610.
- [15] Li Jing, Zhang Wen, Miao Wei, et al. Development of ultra high sensitivity superconducting THz detectors [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 122–130. (in Chinese)  
李婧, 张文, 缪巍, 等. 超高灵敏度太赫兹超导探测技术发展[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 122–130.