

# 级联激光器产生可调谐微波频率梳的实验研究

杨永超<sup>1,2</sup>, 赵清春<sup>1,2</sup>, 朱天意<sup>1,2</sup>, 吴 宾<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学秦皇岛分校 计算机与通信工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 东北大学秦皇岛分校 河北省海洋感知网络与数据处理重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 为了获得高性能的微波频率梳, 提出了基于3个激光器(ML, IL, SL)级联注入产生可调谐微波频率梳的全光方案. 该方案无需外部微波信号源调制, 是一套全光产生装置. 介绍了实验装置及工作原理, 通过实验分析了激光器的泵浦电流、注入光功率、反馈光功率以及2个激光器中心频率失谐对生成微波频率梳信号的梳线数目、带宽、峰值最大功率、频率间隔的影响. 结果表明, 当可调光衰减器 VOA1, VOA2 和 VOA3 的功率衰减值分别为 13, 13 和 21.5 dB, SL 的泵浦电流为 56.1 mA, ML 和 IL 之间频率失谐为 70.625 GHz 时, 可以获得带宽为 11.87 GHz 的微波频率梳信号.

**关 键 词:** 微波频率梳; 光生微波; 激光器; 光注入; 光反馈

中图分类号: TN 248.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2025)06-0026-06

## Experimental Investigations on Generation of Tunable Microwave Frequency Combs by Cascading Lasers

YANG Yong-chao<sup>1,2</sup>, ZHAO Qing-chun<sup>1,2</sup>, ZHU Tian-yi<sup>1,2</sup>, WU Bin<sup>1,2</sup>

(1. School of Computer and Communication Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. Hebei Key Laboratory of Marine Perception Network and Data Processing, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China. Corresponding author: ZHAO Qing-chun, E-mail: zhaqingchun2000@163.com)

**Abstract:** In order to obtain high-performance microwave frequency combs, an all-optical scheme for generating a tunable microwave frequency comb using three lasers in cascading injection is proposed. This scheme does not require external modulation from a microwave signal source, making it a fully optical generation device. The experimental setup and working principle are introduced. The impacts of various factors, namely the pump current, injected optical power, feedback optical power, and central frequency detuning between two lasers, on the number of comb lines, bandwidth, peak maximum power, and frequency spacing of the generated microwave frequency comb signals are analyzed by experiments. The results indicate that when the power attenuation values of VOA1, VOA2, and VOA3 are 13, 13 and 21.5 dB, respectively, the pump current of SL is 56.1 mA, and the frequency detuning between ML and IL is 70.625 GHz, a microwave frequency comb signal with a bandwidth of 11.87 GHz can be obtained.

**Key words:** microwave frequency comb (MFC); optically generated microwave; laser; optical injection; optical feedback

微波频率梳 (microwave frequency comb, MFC) 由一系列频率间隔相等的离散微波信号构成, 可以在一个频段内提供几个至几十个不同频率的微波信号, 在频率测量、无线通信、雷达技术

及卫星遥感等领域<sup>[1-7]</sup>有着广泛的应用. 目前, MFC 的生成方式可分为电学<sup>[8-9]</sup>和光学<sup>[10-13]</sup>两大类. 利用电学方式生成 MFC, 由于受到电子瓶颈的限制, 导致生成的 MFC 信号带宽较低, 很难向

收稿日期: 2024-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62101113); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2123024).

作者简介: 杨永超(1998—), 男, 山西晋中人, 东北大学硕士研究生; 赵清春(1982—), 男, 山东沂南人, 东北大学副教授, 硕士生导师.

更高频带扩展,并且所产生频率梳的梳距不易灵活调节.基于光学方法产生的MFC可以克服电子瓶颈的限制,具有宽带、平坦、可调谐等优点.特别是基于半导体激光器的非线性动态特性<sup>[14-16]</sup>产生MFC的方式,通过适当改变激光器注入强度和激光器之间的频率失谐等参数,可以使激光器输出各种非线性动态,包括稳态、单周期、2倍周期、多倍周期、混沌等状态,其中激光器输出的周期性状态可以用来生成MFC且具有独特的优势.

目前已有相应的文献<sup>[17-19]</sup>探索了生成MFC的方法.文献[17]提出采用光电反馈和外部微波调制方式实现半导体激光器谐波频率锁定产生MFC,在信号功率约25 dBm幅值变化范围内,可获得3 GHz带宽的MFC.文献[18]提出通过电流调制的半导体激光器产生频率梳源,然后通过光注入方式提高微波频率梳特性,可获得15.6 GHz带宽的MFC.文献[19]提出利用半导体激光器由任意周期信号调制的光模块注入产生可调谐MFC的方案,在信号功率10 dBm幅值变化范围内,可以获得15 GHz带宽的MFC.以上文献中提出的方案,需要射频信号源和电光调制器,其中射频信号源和电光调制器的成本较高且不易集成.可集成的全光方法产生MFC可以克服这些问题.文献[20]提出了一种利用级联光注入半导体激光器产生MFC的方案,然而该方案仅在数值仿真层面进行了分析,未考虑实验中的光器件噪声以及频谱仪基底噪声等因素.

因此,本文提出了3个激光器级联注入产生MFC的全光方案,并进行了实验验证,详细研究了泵浦电流、可调光衰减器(variable optical attenuator, VOA)VOA1, VOA2, VOA3和频率失谐对生成MFC信号的影响.

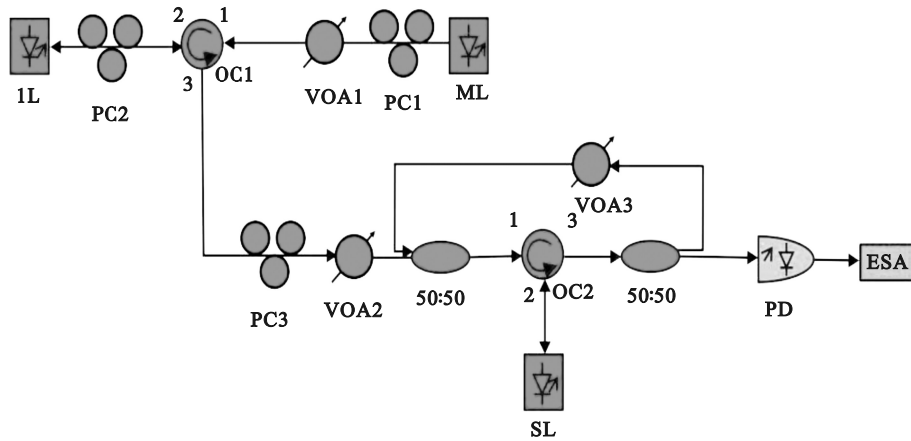
## 1 实验装置

本文提出方案的原理是基于半导体激光器的非线性效应产生MFC信号.首先,将主激光器(master laser, ML)产生的连续光注入到中间激光器(intermediate laser, IL)中,使IL工作在多倍周期振荡状态,接着将产生的信号注入到从激光器(slave laser, SL)中扩展所产生的MFC带宽.这种方法利用了多个激光器之间的相互作用,通过激光器的非线性效应有效地增强了MFC信号的稳定性和带宽.在合适的参数条件下,可以产生出超宽带MFC信号.由3个激光器级联注入产

生MFC的实验装置如图1所示.ML为HP 81689A可调谐激光器,其输出波长和光功率均可调;IL与SL皆是不带隔离器的分布反馈式半导体激光器.IL的光功率和中心波长由驱动源(ILX Lightwave, LDC-3742B)控制;SL的光功率和中心波长分别由电流源(ILX Lightwave, LDX-3412)和温度控制器(ILX Lightwave, LDT-5910B)分别控制.ML输出的光通过偏振控制器(polarization controller, PC)PC1、可调光衰减器VOA1、光环行器(optical circulator, OC)OC1的端口1进入,从端口2输出,再经过PC2注入到IL完成一次注入.注入后的光通过PC2, OC1的端口2进入后从端口3输出,再通过PC3, VOA2,功率分配为50:50的光耦合器,从OC2的端口1进入后从端口2输出,然后注入到SL完成二次注入.注入后的光通过OC2的端口2进入后,从端口3输出到功率分配为50:50的光耦合器中进行光的分束.一束光经过VOA3与经过VOA2的一次注入光通过光耦合器耦合到一起输入到SL构成光纤反馈环,以降低产生MFC的噪声;另一束光进入带宽为31 GHz的光电探测器(photodetector, PD, U2T, MPRV1331A),将光信号转换为电信号,输出的MFC信号通过频谱分析仪(electronic spectrum analyzer, ESA, Rohde & Schwarz, FSEK20, 40 GHz)进行观察.

调节ML的中心波长和光功率分别为1 548.923 nm和7 dBm;IL的电流控制在23.8 mA,温度控制在25.63 °C;SL的电流控制在56.1 mA,温度控制在23.37 °C.通过调节VOA功率衰减值的大小来控制光信号的功率,VOA的功率衰减值越大,通过VOA后光信号的功率越小.VOA1的功率衰减值设置为10 dB,VOA2的功率衰减值设置为10 dB,VOA3的功率衰减值设置为21.5 dB;PD工作电压为3.3 V.实验中,保持上述参数值不变,获得如图2所示的MFC信号.MFC的带宽可由ESA确定:首先利用ESA的峰值查找功能,定位频率梳中功率最高的梳线,该梳线频率为1.55 GHz,功率为-30.27 dBm,为MFC的第一根梳线.本文将MFC的带宽定义为使用最大功率值减去10 dBm,在该范围内频率梳分量所具有的带宽即为有效带宽.据此,绘制一条功率为-30.27 dBm的等值线以确定上界,然后绘制功率为-40.27 dBm的等值线以确定下界.梳线频率间隔由半导体激光器工作时所处的频率周期决定,利用频谱仪峰值查找功能可以计算出梳线频率间隔的数值.从图中可

以看出,两条功率等值线之间有 5 根梳线,带宽为 6.25 GHz,最大功率为-30.27 dBm,梳线频率间隔为 1.7 GHz.



注:ML—主激光器; IL—中间激光器; SL—从激光器; PC—偏振控制器; VOA—可调光衰减器; OC—光环行器; PD—光电探测器; ESA—频谱分析仪.

图 1 基于 3 个激光器级联注入产生微波频率梳的实验装置图

Fig.1 Experimental diagram of the generation of the microwave frequency comb based on the cascading injection utilizing three lasers

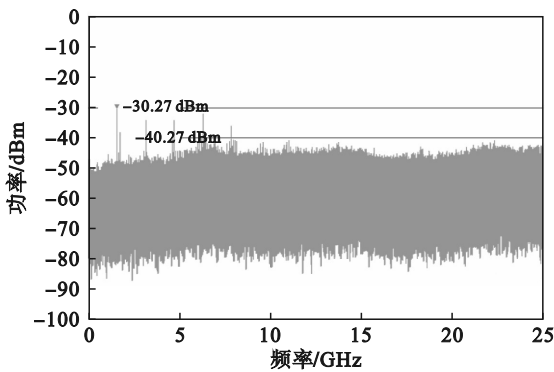


图 2 VOA1 功率衰减值设置为 10 dB 时获得的 MFC  
Fig.2 MFC obtained when VOA1 power attenuation value is set to 10 dB

## 2 实验结果分析

### 2.1 泵浦电流对生成 MFC 的影响

保持其他条件不变,仅改变 SL 的电流,调节范围为 51.5~57.5 mA,步长为 0.5 mA.图 3 给出了泵浦电流对生成 MFC 信号梳线数目、带宽、峰值最大功率、频率间隔的影响.从图 3a 可以观察到,随着 SL 电流的增大,MFC 梳线数目大致呈现先增加后减少的变化趋势.当电流在 53.5~55.5 mA 时,梳线数目保持不变;当电流达到 57.5 mA 时,SL 工作在混沌状态,此时梳线数目和带宽均为 0.MFC 带宽随着 SL 电流的增大也大致呈现先增加后减少的趋势;然而当电流在 56 mA 时,梳线数目 5 根、带宽 2.61 GHz,带宽较小,此时 SL

工作在周期较小的多周期状态.而当电流在 56~56.5 mA 时,带宽增加、梳线数目减少,SL 处于周期较大的多周期状态.从图 3b 观察到,梳线峰值最大功率和频率间隔随电流的增大有逐渐减小的趋势.值得注意的是,当电流在 56 mA 时,由于 SL 工作在周期较小的多周期状态,梳线数目较多、梳线频率间隔小.还可以观察到,峰值最大功率值和频率间隔会随着梳线数目的变化而变化:梳线数目增加时,峰值最大功率值和频率间隔减小;当电流大于 56 mA 时,呈现梳线数目减少的同时,梳线频率间隔整体增大的规律.

### 2.2 注入光功率对生成 MFC 的影响

保持其他条件不变,只改变 VOA1 的功率衰减,功率衰减值的调节范围为 10~20 dB,步长为 1 dB.分析 MFC 的梳线数目与带宽随 VOA1 功率衰减值的变化关系,即一次注入光功率对生成 MFC 的影响,结果如图 4a 所示.随着 VOA1 功率衰减值的增大,生成 MFC 信号的梳线数目大致呈现先增加后减少的趋势,带宽也随 VOA1 的衰减先增加后减小.这种变化是因为在不同光注入强度下,IL 的工作状态会在单周期、多周期之间不断变化.当 IL 处于周期数较少的状态时,生成的 MFC 的梳线数目较少,带宽较小.通过观察梳线数目与 MFC 带宽的折线图可以发现,带宽与梳线数目的变化基本一致,梳线数目增加,带宽增大.当 VOA1 的功率衰减值为 13 dB 时,信号梳线数目有 6 根,带宽为 9.92 GHz.

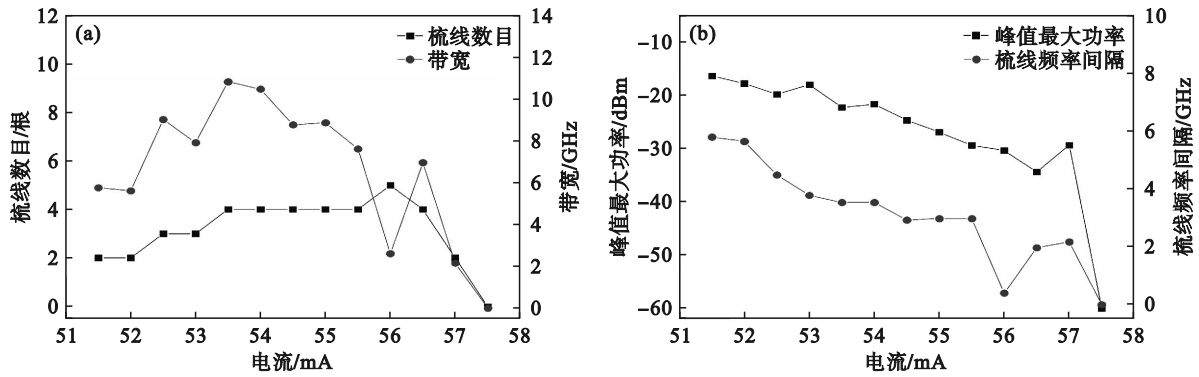


图 3 SL 泵浦电流对生成 MFC 信号的影响

Fig. 3 Influence of SL pump current on the generated MFC signals

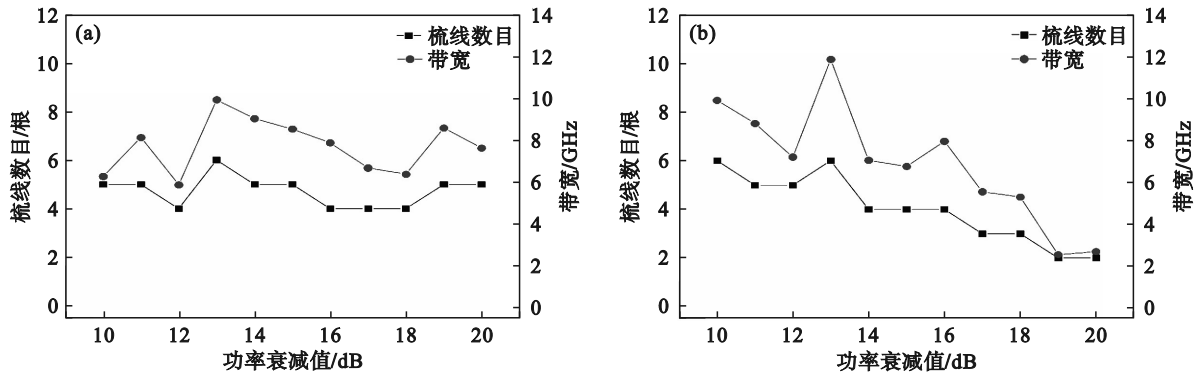


图 4 VOA1, VOA2 不同功率衰减对生成 MFC 信号的影响

Fig. 4 Influence of the different power attenuation values of VOA1 and VOA2 on the generated MFC signals

(a)—VOA1; (b)—VOA2.

图 4b 给出了其他参数固定,只改变 VOA2 的功率衰减时对生成 MFC 信号梳线数目及带宽变化规律的影响.随着 VOA2 的功率衰减增大,生成的 MFC 信号的梳线数目和带宽总体上会减小,但当 VOA2 的功率衰减值为 13 dB 时, MFC 信号的梳线数目有 6 根,带宽为 11.87 GHz,此时 SL 处于多周期振荡状态,从而生成具有较多梳线数目和较大带宽的 MFC 信号.通过调节 VOA1 和 VOA2 的功率衰减可以控制光注入强度,从而使 MFC 的梳线数目和带宽能够满足特定需求.

### 2.3 光纤反馈环功率对生成 MFC 的影响

保持其他条件不变,通过改变 VOA3 的功率衰减来调节光纤反馈环的输出光功率,VOA3 的功率衰减越大,光纤反馈环的输出光功率越小.VOA3 功率衰减值的调节范围为 15.5~25.5 dB,步长为 1 dB.通过引入光纤反馈环,激光器输出的信号光与光反馈回路中的反射光发生干涉,形成一个稳定的相位关系.这样,激光器输出的 MFC 信号的相位差就可以被抑制,减小相位噪声的影响,改善生成 MFC 信号的质量.图 5a 显示了随 VOA3 功率衰减的变化, MFC 的梳线数目和带宽的变化关系.当 VOA3 的功率衰减范围为

15.5~17.5, 19.5~20.5 和 21.5~22.5 dB 时, MFC 的梳线数目不发生变化.当 VOA3 的功率衰减处于 22.5~25.5 dB 时, MFC 的梳线数目随 VOA3 功率衰减值的增大呈总体减小趋势.在整个变化范围内, MFC 的带宽呈现先增大后减小的趋势.光纤反馈环功率与生成 MFC 的梳线频率间隔之间的关系如图 5b 所示.在 VOA3 的功率衰减增大的情况下, MFC 的梳线频率间隔相对稳定,变化范围没有出现显著的波动.结果表明,光纤反馈环功率的变化对梳线频率间隔的影响较小.

### 2.4 频率失谐对生成 MFC 的影响

ML 与 IL 之间的频率失谐同样影响生成 MFC 的质量.这里频率失谐定义为  $\Delta f = f_{ML} - f_{IL}$ ,保持其他条件不变,仅改变 IL 的温度,调节范围为 24.7~26.0 °C,步长为 0.1 °C.通过 Advantest 波长计 TQ8325 (波长分辨率为  $1 \times 10^{-12}$  m) 记录 ML 注入 IL 后输出光的波长.图 6a 展示了不同频率失谐对生成 MFC 信号梳线数目及带宽的影响关系,变化趋势大概呈左右对称.当频率失谐从 60.375 GHz 增加到 64.125 GHz 时, IL 的工作状态从单周期振荡转变为多周期振荡,梳线数目和带宽不断增加.当频率失谐从 70.625 GHz 增加到

74.75 GHz时,IL的工作状态从多周期振荡改变为单周期振荡,梳线数目和带宽不断减少.在频

率失谐为66.5~69.5 GHz时,IL工作在混沌状态,不能产生MFC,梳线数目和带宽均记作0.

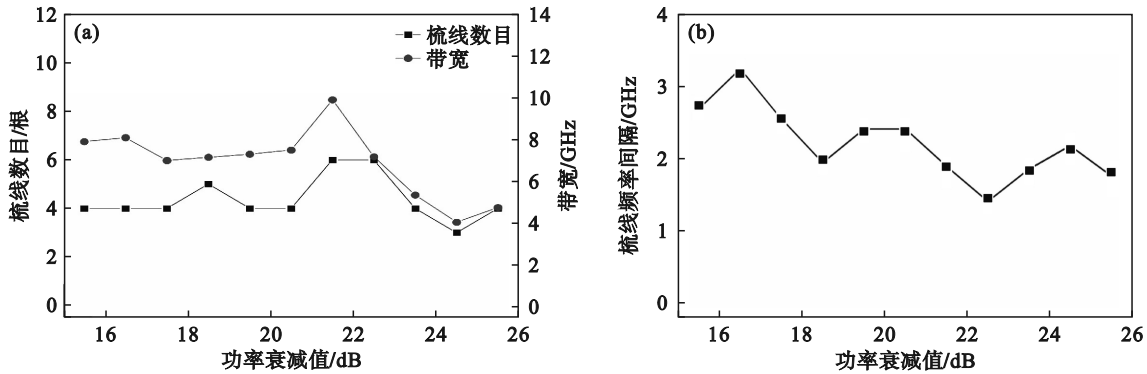


图5 VOA3不同功率衰减对生成MFC信号的影响

Fig. 5 Influence of different power attenuation values of VOA3 on the generated MFC signals

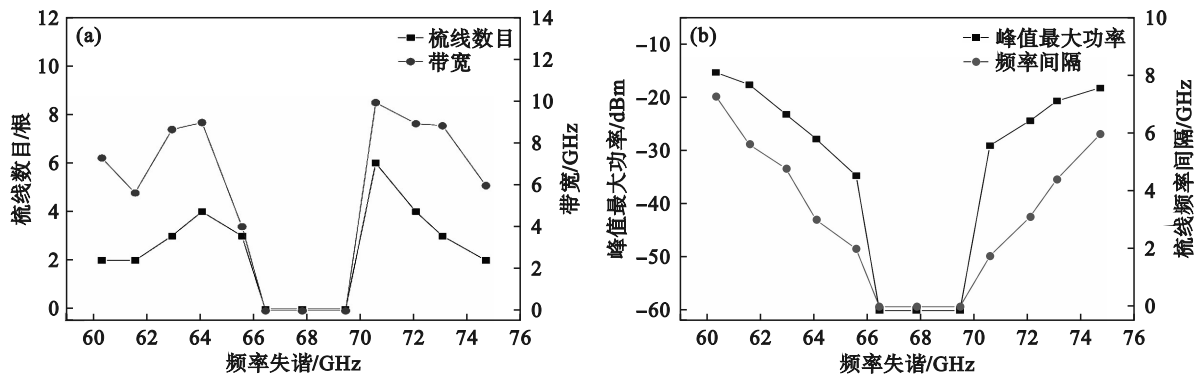


图6 频率失谐对生成MFC信号的影响

Fig. 6 Influence of frequency detuning on the generated MFC signals

图6b展示了MFC信号峰值最大功率和梳线频率间隔随频率失谐的变化趋势,变化趋势大概呈左右对称.具体地,随着频率失谐的变化,IL处于不同的周期态,包括单周期、多倍周期和混沌状态.当频率失谐在60.375~66.5 GHz时,MFC的峰值最大功率和梳线频率间隔随频率失谐的增加而减小.当IL处于混沌状态时,梳线频率间隔为0 GHz.继续增加频率失谐,当频率失谐从69.5 GHz增加到74.75 GHz时,峰值最大功率和梳线频率间隔随频率失谐的增加而增加.

大功率和梳线频率间隔总体呈现出减小的趋势,随着VOA3功率衰减值的增加,MFC的梳线频率间隔没有出现明显的波动.

3) 随着频率失谐的增加,MFC的峰值最大功率和梳线频率间隔呈现先减小后增大的变化趋势,该趋势大概呈左右对称的规律.

### 3 结 论

1) 随着SL泵浦电流、VOA1功率衰减值和频率失谐的增大,MFC的梳线数目和带宽大致呈现出先增加后减小的趋势,而随着VOA2功率衰减值的增加,MFC的梳线数目和带宽总体呈现减小趋势,并且对于频率失谐的变化趋势大概呈现左右对称的规律.

2) 随着SL泵浦电流的增加,MFC的峰值最

### 参考文献:

- [1] Yasui T, Yokoyama S, Inaba H, et al. Terahertz frequency metrology based on frequency comb [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(1): 191-201.
- [2] Kim W, Kim D. High-throughput primary cell frequency switching for multi-RAT carrier aggregation [J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2019, 102(6): 1210-1214.
- [3] Chen S Z, Liang Y C, Sun S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 218-228.
- [4] Yi L, Yuan J, Qi X H, et al. A diode laser spectrometer at 634 nm and absolute frequency measurements using optical frequency comb [J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(4): 1409-1412.

- [5] Li J L, Xu L, Wu Z H, et al. A novel W-band frequency measurement method based on Fabry-Pérot resonator [C]//2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Chengdu, 2021:1-2.
- [6] 卢开旺,杨杰,祁小庆,等. 基于多频段 DVB-T 信号的无源 ISAR 成像研究[J]. 现代雷达, 2014, 36(4): 24-30. (Lu Kai-wang, Yang Jie, Qi Xiao-qing, et al. A study on passive ISAR imaging based on multi-channel DVB-T signals [J]. *Modern Radar*, 2014, 36(4): 24-30.)
- [7] Sun G M, Liu J, Ma J Y, et al. Design and implementation of multiband noncontact temperature-measuring microwave radiometer [J]. *Micromachines*, 2021, 12(10): 1202.
- [8] Rapinoja T, Stadius K, Xu L G, et al. A digital frequency synthesizer for cognitive radio spectrum sensing applications [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(5): 1339-1348.
- [9] Li Q L, Jiang W S, Xu Y F, et al. Analysis and design of wide-band comb generator based on SRD [C]//2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Shenzhen, 2012:1-3.
- [10] Fan L, Xia G Q, Deng T, et al. Generation of tunable and ultra-broadband microwave frequency combs based on a semiconductor laser subject to pulse injection from a current modulated laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 5502310.
- [11] Juan Y S, Lin F Y. Ultra broadband microwave frequency combs generated by an optical pulse-injected semiconductor laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 18596-18605.
- [12] Hagmann M J, Stenger F S, Yarotski D A. Linewidth of the harmonics in a microwave frequency comb generated by focusing a mode-locked ultrafast laser on a tunneling junction [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(22): 223107.
- [13] Hagmann M J, Henage T E, Azad A K, et al. Frequency comb from 500 Hz to 2 THz by optical rectification in zinc telluride [J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(23): 1459-1460.
- [14] Fan L, Wu Z M, Deng T, et al. Subharmonic microwave modulation stabilization of tunable photonic microwave generated by period-one nonlinear dynamics of an optically injected semiconductor laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(23): 4660-4666.
- [15] Zhao W, Mao Y F, Li Y B, et al. Frequency-tunable broadband microwave comb generation using an integrated mutually coupled DFB laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(22): 1407-1410.
- [16] Simpson T B, Liu J M, Huang K F, et al. Nonlinear dynamics induced by external optical injection in semiconductor lasers [J]. *Quantum and Semiclassical Optics: Journal of the European Optical Society Part B*, 1997, 9(5): 765-784.
- [17] Chan S C, Xia G Q, Liu J M. Optical generation of a precise microwave frequency comb by harmonic frequency locking [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(13): 1917-1919.
- [18] Fan L, Xia G Q, Tang X, et al. Tunable ultra-broadband microwave frequency combs generation based on a current modulated semiconductor laser under optical injection [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 17764-17771.
- [19] Zhao Q C, Zhai M H, Shi W B, et al. Generation of tunable microwave frequency comb utilizing a semiconductor laser subject to optical injection from an SFP module modulated by an arbitrary periodic signal [J]. *Complexity*, 2020, 2020: 9504152.
- [20] 蒋鑫,方捻,王陆唐. 级联光注入半导体激光器产生超宽带微波频率梳[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 121403. (Jiang Xin, Fang Nian, Wang Lu-tang. Ultra-broadband microwave frequency comb generated from cascaded optically injected semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 121403.)