

# 利用游标效应的两非相干光频梳混频产生全波段毫米波白噪声

黄奕敏<sup>1</sup>, 刘文杰<sup>1</sup>, 郭亚<sup>2</sup>, 刘俊彬<sup>1</sup>, 张又文<sup>3</sup>, 孙粤辉<sup>1</sup>, 程良伦<sup>4</sup>, 王云才<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>广东工业大学信息工程学院, 广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006;

<sup>2</sup>西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072;

<sup>3</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

<sup>4</sup>广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006

**摘要** 提出了一种可在毫米波全波段产生超大带宽、平坦噪声的方法。利用两频率间隔不等的非相干光光频梳, 基于游标效应, 设计了主尺和副尺的频率间隔和非相干光线宽。仿真证明, 利用所提方法可产生频率范围覆盖 30~300 GHz 的超大带宽、平坦的全波段毫米波白噪声。实验上通过可编程滤波器从放大自发辐射噪声中滤出两束频率间隔为游标式的梳状光, 并在两个不同带宽的单行载流子光电探测器上分别实现了频率范围为 130~170 GHz 和 280~380 GHz 的毫米波白噪声, 其平坦度分别低至  $\pm 2.25$  dB 和  $\pm 3.10$  dB, 验证了理论的正确性。

**关键词** 非线性光学; 毫米波噪声; 游标效应; 超宽带; 平坦度; 非相干光

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1335001

## Generation of Full Band Millimeter-Wave White Noise Using Two Incoherent Optical Frequency Comb Mixing Base on Vernier Effect

Huang Yimin<sup>1</sup>, Liu Wenjie<sup>1</sup>, Guo Ya<sup>2</sup>, Liu Junbin<sup>1</sup>, Zhang Youwen<sup>3</sup>, Sun Yuehui<sup>1</sup>, Cheng Lianglun<sup>4</sup>, Wang Yuncai<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangdong Province Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

<sup>2</sup>School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

<sup>3</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

<sup>4</sup>School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China

**Abstract** A method that can generate ultra-wide and flat noise in the whole millimeter-wave band is proposed. Based the vernier effect, the frequency intervals and incoherent light widths of the main ruler and the subordinate ruler are designed by using two incoherent optical frequency combs with different frequency intervals. Simulation results show that the proposed method can generate ultra-wide band and flat full-band millimeter-wave white noise with a frequency range of 30~300 GHz. Experimentally, the amplified spontaneous emission noise is filtered out of two comb-shaped lights with a vernier frequency interval through a programmable filter, and two millimeter-wave white noises are achieved based on uni-traveling-carrier photodetector with two different band widths. The frequency ranges of the two white noises are 130~170 GHz and 280~380 GHz, and the corresponding flatness are  $\pm 2.25$  dB and  $\pm 3.10$  dB, which verifies the correctness of the proposed theory.

**Key words** nonlinear optics; millimeter-wave noise; vernier effect; ultra-wide band; flatness; incoherent light

收稿日期: 2021-11-22; 修回日期: 2021-12-08; 录用日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61927811)、广东省引进创新创业团队项目

通信作者: \*wangyc@gdut.edu.cn

## 1 引言

毫米波 (MMW) 噪声发生器在许多领域中具有重要应用,如测试雷达的抗干扰性能<sup>[1-2]</sup>、评估通信系统的鲁棒性<sup>[3]</sup>、分析高频芯片的噪声系数<sup>[4-5]</sup>和提高毫米波图像的成像质量<sup>[6-7]</sup>等。其中,产生功率谱平坦的宽带毫米波噪声是对噪声发生器的基本要求<sup>[8]</sup>。

研究者已提出了多种方法来产生毫米波噪声信号<sup>[9-14, 15]</sup>。利用晶体管的散弹噪声是产生宽带毫米波噪声的常用方法<sup>[9-11]</sup>。Diebold等<sup>[9]</sup>使用异质结高电子迁移率晶体管(mHEMT)在W波段(75~110 GHz)实现了单片集成有源冷-热噪声源,带宽为35 GHz,平坦度为±1 dB。Ehsan等<sup>[10]</sup>基于砷化镓肖特基二极管在160~210 GHz频段内实现了毫米波噪声输出,平坦度为±3 dB。Ghanem等<sup>[11]</sup>在意法半导体的55 nm 锗化硅互补金属氧化物半导体器件(CMOS)生产线上制备出了频段为140~325 GHz的肖特基二极管噪声源,其平坦度为±7.5 dB。然而,基于上述方法产生的噪声频谱平坦度会随着频率的增加而急剧变差。利用非相干光拍频也可以产生光生毫米波噪声<sup>[12]</sup>。Song等<sup>[13]</sup>使用两个阵列波导光栅对掺铒光纤放大器(EDFA)输出的放大自发辐射(ASE)光噪声进行滤波,并通过单行载流子光电探测器(UTC-PD)将混合的多波长切片光学噪声转换为280~380 GHz频段的毫米波电噪声,平坦度为±5 dB。然而,这种方法产生的毫米波噪声谱并不是连续的,而是需要反复调节阵列波导光栅的滤波通道产生不同频段的噪声,再进行拼接来获得宽带的毫米波噪声。Kanno等<sup>[14]</sup>利用阵列波导光栅<sup>[16]</sup>滤出两束高斯型光谱形状的噪声光拍频产生80~100 GHz频段的毫米波噪声,平坦度为±5 dB。孙健等<sup>[15]</sup>对

ASE噪声光谱进行多波长滤波,再利用多光混频产生了频段为30~50 GHz的毫米波噪声,平坦度为±2.5 dB。综上所述,上述方案虽然都有优势,但在产生全波段毫米波白噪声方面仍存在困难。

针对上述问题,本文提出了一种基于游标式的两束梳状光拍频产生全波段毫米波白噪声的方法。两束梳状光如同游标卡尺的主尺和游标尺,具有不同的模式间隔。为获得特定频率的拍频项,设计两束梳状光的波长和模式间隔,通过拍频项的叠加,可以获得全波段的毫米波白噪声。仿真结果表明,所提方法可产生频率范围覆盖30~300 GHz的白噪声。受现有探测器带宽的限制,实验上用两个不同频率范围的UTC-PD进行原理性验证,获得了频率范围覆盖130~170 GHz和280~380 GHz,平坦度为±2.25 dB和±3.1 dB的毫米波噪声。此外,两个频率范围的实验结果与理论吻合,证实了所提方案的可行性。

## 2 基本原理

本节主要对产生宽带毫米波白噪声的基本原理进行介绍。产生宽带毫米波噪声的原理示意图如图1所示。上下两路的梳状光分别有 $n+1$ 个模式,每一个模式都为具有相同线宽的高斯型光谱。设定两束光的第0个模式的中心频率均为 $x_0$ ,如同游标卡尺的主尺和副尺在 $x_0$ 处进行对准。此时,两束光第一个模式的频率差为 $\Delta x$ ,以此类推,第 $n-1$ 个模式的频率差为 $(n-1)\Delta x$ ,第 $n$ 个模式的频率差为 $n\Delta x$ 。此时这两束光会在 $\Delta x, \dots, (n-1)\Delta x, n\Delta x$ 产生拍频并在频谱上进行叠加。基于此原理可产生频率范围为 $\Delta x \sim n\Delta x$ 的宽带毫米波白噪声,如图1中右图所示。

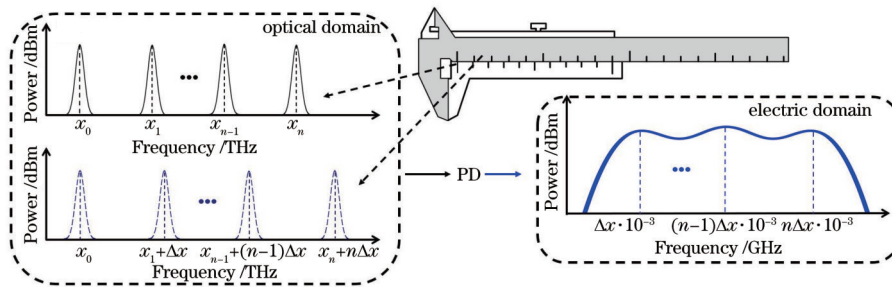


图1 产生宽带毫米波噪声的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle of generating wideband millimeter-wave noise

## 3 仿真结果与分析

为产生30~300 GHz频段的毫米波白噪声,将主尺与副尺的间隔分别设置为3.4 nm和3.2 nm,主尺与副尺的频率差的步长为0.2 nm,即相邻的两个拍频项相差25 GHz。

如图2(a)所示,为方便分析,将光束1和光束2的第一个模式定义为0模( $m=0$ ),其他模式依次定义为1模,2模,3模, $\dots$ ,13模。光束1和光束2的第0个模式中心波长均为1550 nm。光束1和光束2的模式1,

2,3, $\dots$ ,13会在25,50,75, $\dots$ ,300 GHz处产生拍频,频率的步进为25 GHz。对不同线宽的拍频效果进行了仿真,仿真结果如图2(b)所示。结果表明,拍频项的中心频率产生在预期频率处,随着光谱线宽的增加,两束光拍频的频谱逐渐趋于平坦。当高斯型光谱线宽为0.15 nm时,通过对数值仿真的结果进行计算,得到的平坦度小于±0.64 dB。

## 4 实验与结果分析

产生宽带噪声的实验装置系统如图3所示,其中

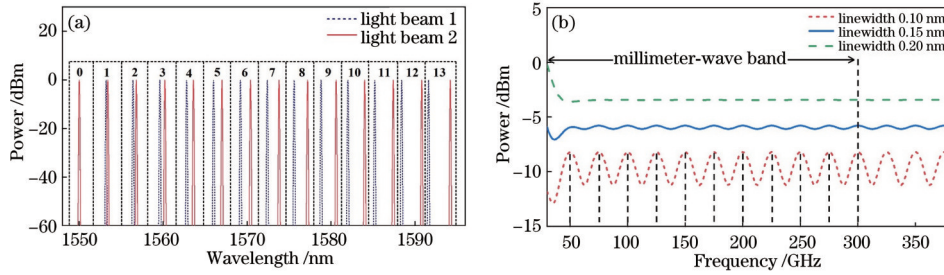


图 2 基于游标效应的多模光的光谱与拍频频谱。(a)光谱;(b)拍频频谱

Fig. 2 Optical spectrum and beat frequency spectrum of multi-mode light based on vernier effect. (a) Optical spectrum; (b) beat frequency spectrum

OSA为光谱分析仪。首先,宽带的非相干光源(SLD, Conquer, KG-SLD)通过1×2的光耦合器(OC)产生两路等功率的光,利用可编程光学滤波器(POF, Finisar, WaveShaper 4000)分别滤出具有不同模式间隔的高斯型梳状光谱,该光谱的第一个模式中心波长为1550 nm,两束梳状光的模式间隔分别为3.2 nm和3.4 nm。接着,利用2×1光耦合器将两束梳状光耦合,并通过掺铒光纤放大器(Amonics, AEDFA-PA-35)对光信号进行放大后,注入到UTC-PD中<sup>[17]</sup>进行拍频,产生的高频噪

声信号通过对应频段的混频器模块(Mixer, VDI-731)进行下变频转换。最后,由带宽为50 GHz的频谱分析仪(ESA, FSW50)对输出的电噪声频谱进行实时测量。采用了工作带宽分别为130~170 GHz(NTT Electronics, IOD-PMD-14001)和280~380 GHz(NTT Electronics, IOD-PMJ-13001)的UTC-PD。此外,经过滤波后的光谱利用高分辨率光谱仪(YOKOGAWA, AQ6370C,分辨率为0.02 nm)进行测量,时序信号由数字示波器(OSC)采集。

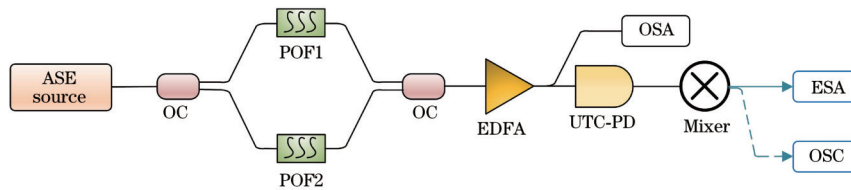


图 3 产生超大带宽毫米波噪声的实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for generating ultra-wide-bandwidth millimeter-wave noise

图 4 为实验上产生的电噪声功率谱图。如图 4(a)所示,当各个模式的光谱线宽为0.2 nm时,130~170 GHz 频率范围内噪声谱的平坦度为±2.25 dB。实验时设定频谱仪的分辨率带宽(RBW)和视频带宽(VBW)分别为3 MHz和5 kHz。实验结果对应的是图 2(b)中当梳状光中的高斯型光谱线宽为0.20 nm时,130~170 GHz 频段的噪声谱。进一步地,在280~380 GHz 频率范围内利用 UTC-PD 对拍频信号进行光电转换实验,结果如图 4(b)所示。结果表明,在280~380 GHz 频率范围内,产生的噪声功率谱的平坦度为±3.10 dB,实验时设定频谱仪的RBW和VBW分别为10 MHz和10 kHz。

280~380 GHz 频率范围内的实验结果对应的是图 2(b)中当梳状光中的高斯型光谱线宽为0.20 nm 时,280~380 GHz 频段的噪声谱。仿真与实验的理论值偏差主要受 UTC-PD 的响应曲线不平坦<sup>[18-19]</sup>和混频器的变频损耗影响。实验得到的平坦度比仿真结果略高,主要原因为:1)由于光电探测器的响应曲线并不平坦,故当光信号在 UTC-PD 中转换成电信号时,在不同频率产生的电功率谱密度会有起伏;2)当使用混频器对高频的信号进行降频时,混频器的混频损耗在不同频率处同样有起伏<sup>[20]</sup>。表 1 中列举了文献和本文报道的带宽、平坦度与对应频段的对比。可以看出,在

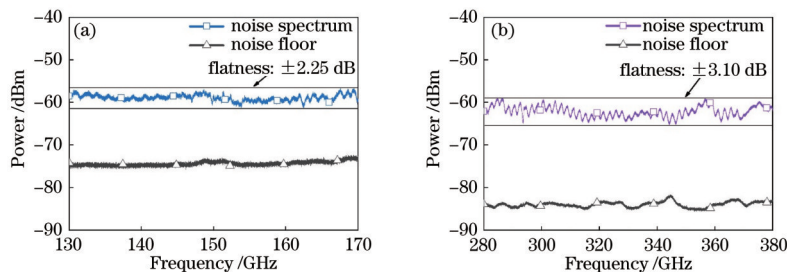


图 4 不同频段的电噪声功率谱。(a) 130~170 GHz;(b) 280~380 GHz

Fig. 4 Electrical noise power spectra in different frequency bands. (a) 130—170 GHz; (b) 280—380 GHz

280~380 GHz 频段内, 本文报道的结果优于文献 [13], 这是因为文献 [13] 利用两束高斯型的光拍频在宽带宽的情况下很难产生平坦的噪声, 这也体现了使用梳状光拍频带来的平坦度优势。通过此实验也证明了利用基于游标效应的两束梳状光进行拍频对产生超大宽带平坦的毫米波噪声, 甚至是太赫兹波噪声均有重要的意义。

表 1 文献与本文中毫米波噪声的带宽、平坦度和对应频段的对比

Table 1 Comparison of bandwidths, flatnesses and corresponding frequency ranges of millimeter-wave noises reported in this paper and in literatures

Flatness /dB	Bandwidth / GHz	Frequency range /GHz	Year
±1	35	75–110	2014 <sup>[9]</sup>
±3	50	160–210	2015 <sup>[10]</sup>
±7.5	185	140–325	2020 <sup>[11]</sup>
±5	100	280–380	2008 <sup>[13]</sup>
±5	20	80–100	2016 <sup>[14]</sup>
±2.5	20	30–50	2020 <sup>[15]</sup>
±2.5	25	55–70	2020 <sup>[21]</sup>
±2.5	60	260–320	2020 <sup>[22]</sup>
±2.25	40	130–170	2021
±3.10	100	280–380	2021

## 5 结 论

提出了一种基于游标效应的两束梳状光拍频产生全波段毫米波白噪声的方法, 并在数值仿真的基础上进行了实验验证, 证明了所提方法的可行性。将光束 1 对应的主尺和光束 2 对应的副尺的模式间隔分别设置为 3.4 nm 和 3.2 nm, 拍频中心频率的步长设置为 25 GHz, 通过特定频率的拍频项叠加, 从理论上获得了全波段毫米波白噪声。受探测器带宽的限制, 实验上用两个 UTC-PD 在毫米波段的不同频率范围进行了验证。通过可编程滤波器将 ASE 噪声分别滤出两束梳状光, 并将其在 UTC-PD 上进行拍频, 分别在 130~170 GHz 和 280~380 GHz 的频率范围内获得了平坦度低至 ±2.25 dB 和 ±3.10 dB 的电噪声功率谱。在这两个频率范围里的实验结果与理论吻合, 证实了所提理论的正确性。本研究可进一步推广至高频的太赫兹波段。因此, 所提方法对于毫米波甚至太赫兹波段白噪声的产生与发展具有重要的应用价值。

### 参 考 文 献

[1] Paik H, Sastry N N, SantiPrabha I. Effectiveness of noise jamming with white gaussian noise and phase noise in amplitude comparison monopulse radar receivers[C]// IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies, January 6-7, 2014, Bangalore, India. New York: IEEE Press,

2014: 14114936.

- [2] 孙贵宾, 沈涛, 贾磊, 等. 基于环境噪声的毫米波雷达动态阈值计算[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0328002.  
Sun B B, Shen T, Jia L, et al. Dynamic threshold calculation for millimeter wave radar based on environmental noise[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0328002.
- [3] Shahriar C, la Pan M, Lichtman M, et al. PHY-layer resiliency in OFDM communications: a tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 292-314.
- [4] Pepe D, Barnett C, D'Amore G, et al. On-chip millimeter-wave cold-source noise figure measurements with PNA-X[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(12): 3399-3401.
- [5] Sarmah N, Grzyb J, Statnikov K, et al. A fully integrated 240-GHz direct-conversion quadrature transmitter and receiver chipset in SiGe technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(2): 562-574.
- [6] Chen J, Chen Y Q, Zhao H W, et al. Absorption coefficients of selected explosives and related compounds in the range of 0.1-2.8 THz[J]. Optics Express, 2007, 15(19): 12060-12067.
- [7] Nagatsuma T, Kumashiro T, Fujimoto Y, et al. Millimeter-wave imaging using photonics-based noise source[C]//34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, September 21-25, 2009, Busan, Korea (South). New York: IEEE Press, 2009: 10976884.
- [8] Brooker G M. Mutual interference of millimeter-wave radar systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(1): 170-181.
- [9] Diebold S, Weissbrodt E, Massler H, et al. A W-band monolithic integrated active hot and cold noise source[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(3): 623-630.
- [10] Ehsan N, Piepmeier J, Solly M, et al. A robust waveguide millimeter-wave noise source[C]//European Microwave Conference (EuMC), September 7-10, 2015, Paris, France. New York: IEEE Press, 2015: 853-856.
- [11] Ghanem H, Gonçalves J C A, Chevalier P, et al. Modeling and analysis of a broadband Schottky diode noise source up to 325 GHz based on 55-nm SiGe BiCMOS technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(6): 2268-2277.
- [12] Song H J, Shimizu N, Kukutsu N, et al. Microwave photonic noise source from microwave to sub-terahertz wave bands and its applications to noise characterization [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(12): 2989-2997.
- [13] Song H J, Shimizu N, Furuta T, et al. Subterahertz noise signal generation using a photodetector and wavelength-sliced optical noise signals for spectroscopic

- measurements[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(24): 241113.
- [14] Kanno A, Sekine N, Kasamatsu A, et al. Nondestructive reflection imaging in the W-band using photonics-based incoherent signal source[C]//*IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, May 22-27, 2016, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 16213983.
- [15] Sun Y H, Chen Y X, Li P, et al. Flat millimeter-wave noise generation by optically mixing multiple wavelength-sliced ASE lights[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(22): 1270-1273.
- [16] 孙健, 吴远大, 吴卫锋, 等. 阵列波导光栅解复用器的偏振相关损耗的优化[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0106003.  
Sun J, Wu Y D, Wu W F, et al. Optimization of polarization-dependent loss of arrayed waveguide grating demultiplexer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0106003.
- [17] 甄政, 郝然, 邢东, 等. 高速单行载流子光电二极管的近弹道优化设计[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1006003.  
Zhen Z, Hao R, Xing D, et al. Nearly-ballistic optimization design of high-speed uni-traveling-carrier photodiodes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1006003.
- [18] Furuta T, Ito T, Muramoto Y, et al. D-band rectangular-waveguide-output uni-travelling-carrier photodiode module[J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(12): 715-716.
- [19] Ito H, Furuta T, Muramoto Y, et al. Photonic millimetre- and sub-millimetre-wave generation using J-band rectangular-waveguide-output uni-travelling-carrier photodiode module[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(24): 1424-1425.
- [20] Spectrum analyzer extension modules [EB/OL]. [2021-03-01]. <https://www.vadiodes.com/index.php/en/products/spectrum-analyzer>.
- [21] Coen C T, Frounchi M, Lourenco N E, et al. A 60-GHz SiGe radiometer calibration switch utilizing a coupled avalanche noise source[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, 30(4): 417-420.
- [22] Ghanem H, Lépilliet S, Danneville F, et al. 300-GHz intermodulation/noise characterization enabled by a single THz photonics source[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, 30(10): 1013-1016.