高超噪比宽带毫米波噪声信号光子学产生研究

黄海碧 刘文杰 孙粤辉 王安帮 秦玉文 王云才

Photonics generation of broadband millimeter wave noise signals with high excess noise ratios

HUANG Hai-bi, LIU Wen-jie, SUN Yue-hui, WANG An-bang, QIN Yu-wen, WANG Yun-cai

引用本文:
黄海碧, 刘文杰, 孙粤辉, 王安帮, 秦玉文, 王云才. 高超噪比宽带毫米波噪声信号光子学产生研究[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 251–258. doi: 10.37188/CO.2021–0158
HUANG Hai-bi, LIU Wen-jie, SUN Yue-hui, WANG An-bang, QIN Yu-wen, WANG Yun-cai. Photonics generation of broadband millimeter wave noise signals with high excess noise ratios[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 251-258. doi: 10.37188/CO.2021-0158

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2021–0158

文章编号　2095-1531(2022)02-0251-08

高超噪比宽带毫米波噪声信号光子学产生研究

黄海碧[1], 刘文杰[1], 孙粤辉[1], 王安帮[1,2], 秦玉文[1,2], 王云才[1*]
(1. 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;
2. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 受电子器件工作频率及功率的限制, 传统电子学方法产生的噪声源的超噪比通常小于 20 dB, 针对这一问题, 本文提出了一种基于非相干光拍频产生高超噪比宽带毫米波噪声技术。首先, 用两个光滤波器对宽带放大自发辐射光源进行滤波整形。将获得的两束频率不同的放大自发辐射光耦合进入光电探测器进行拍频, 从而产生电噪声信号。理论分析发现, 通过调节拍频光的光谱线型、线宽与功率, 在当前的高速光电探测器响应水平下, 可获得超过 50 dB 的高超噪比毫米波噪声源。在利用数值方法分析影响噪声源超噪比主要因素的基础上, 通过实验方法产生了超噪比大于 50 dB 的毫米波噪声信号。如果采用更高速的光电探测器, 这一技术可在毫米波乃至太赫兹波段构建大超噪比的噪声源。

关　键　词: 毫米波; 噪声源; 超噪比; 微波光子学; 拍频
中图分类号: O43　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2021-0158

Photonics generation of broadband millimeter wave noise signals with high excess noise ratios

HUANG Hai-bi[1], LIU Wen-jie[1], SUN Yue-hui[1], WANG An-bang[1,2], QIN Yu-wen[1,2], WANG Yun-cai[1*]
(1. *School of Information Engineering, Guangdong, Provincial Key Laboratory of Photonics Information Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510006, *China*;
2. *Key Laboratory of Advanced Transducers & Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: wangyc@gdut.edu.cn*

Abstract: The Excess Noise Ratio (ENR) of traditional noise sources is usually less than 20 dB due to the limitation of the working frequency and the power of electronic devices. To solve the problem, we propose a technology to generate a millimeter-wave noise source with a high ENR by two incoherent light beams beating. First, two optical filters are used to filter and shape the broadband amplified spontaneous emission light source. Then, the two obtained beams of amplified spontaneous radiation light with different frequencies are coupled to the photodetector for the beat frequency, which can generate electrical noise signals. A theoretical analysis predicts that a noise source with an ENR larger than 50 dB can be obtained by adjusting the optical spectral, linewidth and optical power of the two incoherent light beams filtered from an amplified spontan-

收稿日期: 2021-08-13; **修订日期:** 2021-09-01
基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61927811, No. 61961136002, No. 61731014); 广东省引进创新创业团队项目基金
Supported by the national natural science foundation of China (No. 61927811, No. 61961136002, No. 61731014); the Introduction of Innovation and Entrepreneurship Team Project of Guangdong Province

eous emission source under the current level of photodetector responsivity. A proof-of-concept experiment achieved a millimeter-wave noise source with an ENR higher than 50 dB. This method could also generate millimeter-wave and even terahertz-wave noise with a high ENR if a higher-speed photodetector was used.
Key words: millimeter-wave; noise source; excess noise ratio; microwave photonics; beat frequency

1 引 言

噪声通常被视为干扰信号，为了减小或抑制噪声引入的不良影响，在通信系统、电子器件及医疗成像等领域中都在研究和表征噪声[1-3]。Y 因子测量是在这些领域中测试设备、元件或系统噪声系数的最常见方法，在测量过程中，通常需要一个已校准的噪声发生器提供一个已知的噪声值。噪声发生器通过向待测器件输入已知功率的宽谱噪声，可以分析电子设备的噪声系数[4] 和电磁兼容性[5]，测试接收机的解调门限、灵敏度、信噪比、载噪比及误码率[6]，检验雷达的抗干扰能力[7]。另外，噪声发生器还可用于随机数的产生[8]。可以说，噪声发生器是一种在通信、遥感、军事、天文等众多领域都有着广泛应用的专用测试设备。

噪声源是噪声发生器的核心部件，产生噪声源的主要原理有：基于黑体辐射理论的恒温电阻产生的热噪声[9-10]；气体放电管中电子无规则热运动[11]，雪崩二极管电流或电压随机起伏引起的散弹噪声[12-13]；饱和二极管的阳极电子涨落噪声等[14]。目前，工作频率在 0~50 GHz 的噪声产生技术已相对成熟，但受限于电子器件的带宽，毫米波噪声源的产生技术还有待突破。英国卢瑟福实验室[15] 和日本 NTT[16] 相继提出利用掺铒光纤放大器（Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA）中放大的自发辐射噪声（Amplified Spontaneous Emission, ASE）拍频，或直接入射到高速单行载流子光电探测器（Uni-Traveling-Carrier Photodiode, UTC-PD）上产生毫米波电噪声，开辟了基于光子技术的毫米波噪声产生新方向。

超噪比（Excess Noise Ratio, ENR）是噪声源的关键指标之一，其定义为噪声源输出的等效噪声温度超过标准室温下内阻热噪声温度的倍数，它实际上与噪声源输出的噪声功率成正比。当测试具有较大噪声系数的接收机，或校准具有较大动态范围的设备时，常常需要高超噪比的噪声源。

热噪声源主要基于普朗克黑体辐射定律，产生的噪声功率由其温度决定。在给定的电阻负载下，若要实现输出超噪比大于 20 dB，负载温度应超过 30 000 K。如此高的温度，现有技术很难实现。

由半导体结产生的散弹噪声的功率谱密度主要由通过半导体结的平均偏置电流 I 决定。基于此原理的噪声源，要获得大的超噪比，就需要增加偏置电流，或者在输出端级联多个功率放大器[17]，但前者会带来热效应，影响噪声源的可靠性及寿命；后者又造成价格昂贵及体积庞大。特别是，受电子器件带宽的制约，噪声源的工作频率越高，其输出的功率就越低。2015 年，美国 NASA 戈达德太空飞行中心 Negar Ehsan 等人反向偏置 GaAs 肖特基二极管，实现了 G 波段 (160~210 GHz) 噪声源，但超噪比在 200 GHz 处为 9.6 dB[18]。法国国家科学研究中心 Goncalves 等人在 2017 年用 55 nm 的 COMS 工艺线制出 130~170 GHz 的毫米波噪声源芯片[19]，在 2019 年用 SiGe BiCMOS 55 nm 技术进一步产生 140~260 GHz 毫米波噪声源[20]，但超噪比最大只达到 20 dB。2020 年意大利 Federico Alimenti 等人用 130 纳米硅锗 (SiGe) 双极互补金属氧化物半导体 (BiCMOS) 工艺实现了毫米波固态噪声源，超噪比在 40 GHz 处为 19 dB[21]。2020 年，美国乔治亚理工学院先进概念实验室 Coen 等人采用 SiGe 异质结双极晶体管 (HBT) 的集电极-基极结实现雪崩源，在 60 GHz 处只获得 18.7 dB 的超噪比[22]。可见，基于传统的电子方法产生的噪声源的超噪比通常较小，一般低于 20 dB。

西班牙瓦伦西亚理工大学的 Borja Vidal[23] 将 ASE 光噪声经高速光电探测器直接转化后，实验产生了超噪比大于 62 dB 的微波噪声，但其最高噪声频率仅为 20 GHz。日本 NTT 公司采用 ASE 光拍频，利用 UTC-PD 产生了频率为 295~355 GHz 的毫米波噪声，但缺乏对超噪比的分析。本文分析了 ASE 光拍频产生毫米波噪声技术中影响超噪比的主要因素，并通过数值仿真和实验获得了超过 50 dB 的高超噪比的毫米波噪声。

2 理论分析

2.1 毫米波噪声源产生原理

基于 ASE 光拍频产生毫米波噪声的基本原理如图 1 所示。

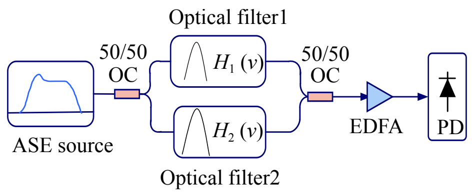

图 1　ASE 光拍频产生毫米波噪声原理图(ASE: 放大自发辐射源; OC: 光耦合器; EDFA: 掺铒光纤放大器; PD: 光电探测器)

Fig. 1　Block diagram of the millimeter wave noise source generated by ASE light beating. (ASE: amplified spontaneous emission; OC: optical coupler; EDFA: erbium doped fiber amplifier; PD: photodetector)

一个 EDFA 产生的 ASE 噪声经过一个 1×2 耦合器分成两路, 分别经过光谱滤波器 Optical Filter 1 和 Optical Filter 2, 再耦合到响应度为 $\boldsymbol{R}$、内阻为 R_0 的光电探测器(PD)中进行拍频。两光谱滤波器经过滤波产生中心频率分别为 v_1、v_2 的两束非相干光。假设两光谱滤波器的 3 dB 带宽均为 B, 传输函数 $H_1(v)$ 和 $H_2(v)$ 均为高斯型, 被滤波出的光谱半波全宽为 σ, σ 与光滤波器的 3 dB 带宽 B 的转换关系为 $B=(c/\lambda^2)\cdot\sigma$, 其中 c 为光速, λ 为波长, 则耦合光场具有双高斯光谱, 可表示为:

$$s(v)=P_0\left(|H_1(v)|^2+|H_2(v)|^2\right)= P_0\exp\left[-(4\ln 2)\frac{(v-v_1)^2}{\sigma^2}\right]+ P_0\exp\left[-(4\ln 2)\frac{(v-v_2)^2}{\sigma^2}\right] ,\quad (1)$$

光电探测器输出的光生噪声电流功率谱密度可用光谱的卷积表示:

$$S_a(f)=\frac{R_0P_0^2\boldsymbol{R}^2}{4B\sqrt{\dfrac{\pi}{8\ln 2}}}\left\{2\exp\left[-(4\ln 2)\frac{f^2}{\left(\sqrt{2}B\right)^2}\right]+\exp\left[-(4\ln 2)\frac{(f-|v_2-v_1|)^2}{\left(\sqrt{2}B\right)^2}\right]\right\},\quad (2)$$

其中, P_0 为入射到 PD 的光功率, $\boldsymbol{R}$ 与 R_0 分别为 PD 的响应度和内阻。可见, 输出电噪声的功率谱密度包含两个频谱: 一个中心频率 f_{c1}=0 GHz、带宽为 0.707 B 的半高斯谱和一个中心频率 $f_{c2}=v_2-v_1$(设 $v_2>v_1$)、带宽为 1.414 B 的高斯谱, 后者称为拍频项。因此, 通过调谐 v_1 和 v_2, 就可以调控光生噪声源的中心频率, 通过光放大器调控入射光功率就可以调控噪声源输出噪声功率, 通过光谱滤波器控制光谱的线宽就可以调控噪声源的带宽。

2.2 噪声源超噪比分析

根据尼奎斯特定理 $P=k_BTB$(P 为输出的噪声功率, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度, B 为带宽)可知, 噪声源的噪声功率与噪声温度成正比, 结合超噪比的定义, 超噪比可用噪声功率或噪声功率谱密度表示:

$$\mathrm{ENR}=10\log\left(\frac{T_\mathrm{h}-T_\mathrm{c}}{T_0}\right)= 10\log\left(k_BT_\mathrm{h}-k_BT_\mathrm{c}\right)-10\log\left(k_BT_0\right) ,\quad (3)$$

其中, T_h 表示噪声源在正常工作状态下的等效输出噪声温度, T_c 表示噪声源在关闭状态下的等效输出噪声温度, T_0 为标准室温(290 K), k_B 为玻尔兹曼常数。在标准室温下, 热噪声产生的功率谱密度为 10 log(k_BT_0)=−174 dBm/Hz。假设 $T_\mathrm{c}=T_0$, 当 ENR⩾15 dB 时, 则根据式(3)可计算出噪声源在正常工作状态下的等效输出噪声温度超过 9 460 K, 这远大于标准室温。因此, 噪声源的超噪比可近似为:

$$\mathrm{ENR}=10\log\left(k_BT_\mathrm{h}\right)-10\log\left(k_BT_\mathrm{c}\right)= S_\mathrm{a}(f)-(-174)\ \mathrm{dBm/Hz} ,\quad (4)$$

其中, $S_\mathrm{a}(f)$ 为噪声源在正常工作状态下产生的功率谱密度。

根据光电探测器的响应频带, 可将光电探测器视为带通滤波器, 则对于高频段的噪声源, 通常只取拍频项的噪声信号。拍频项噪声的分布位置由其中心频率决定, 而拍频项的噪声中心频率取决于两拍频光的中心波长差$|v_2-v_1|$。由式(2)和式(4)可知, 在入射光功率 P_0、光电探测器响应度 $\boldsymbol{R}$ 和非相干光的线宽 σ 一致的情况下, 拍频项噪声源的超噪比从一个中心频率移到另一个中心频率时, 3 dB 带宽内噪声源的超噪比不会随着中心频率的改变而改变。故影响噪声源超噪比的关键因素主要为入射光功率 P_0、光电探测器响应度 $\boldsymbol{R}$ 和非相干光的线宽 σ。因此, 在 PD 固定的情况下,

可以通过光放大器调控入射光功率和通过光谱滤波器控制光谱的线宽,从而调控噪声源的超噪比。

依据现有高速光电探测器响应度水平对毫米波噪声的超噪比进行理论分析。本文选择 3 种典型高速光电探测器为:德国 Fraunhofer 公司 PD(CXPDV145),带宽 DC-145 GHz、响应度$\boldsymbol{R}$=0.4 A/W、饱和输入光功率 P_{max}=14 dBm; ,日本 NTT 公司 UTC-PD(IOD-PMF-13001),带宽 90~140 GHz、$\boldsymbol{R}$=0.35 A/W、P_{max}=15 dBm; 清华大学研制的 PD[24], 带宽 DC-150 GHz、$\boldsymbol{R}$=0.16 A/W、P_{max}=20 dBm。入射光功率对毫米波噪声超噪比(在 100 GHz 频率处)的影响如图 2 所示(彩图见期刊电子版),此时两噪声光的中心频率差 $\nu_2-\nu_1$=100 GHz, 噪声光的光谱线宽均为 0.1 nm。可见,基于 ASE 光拍频产生毫米波噪声源的超噪比与入射光功率成正比。更重要的是,对于 3 种商用的高速 PD, 在 PD 最大饱和光功率下取得的超噪比分别约为 53 dB、53 dB 和 55 dB, 均超过 50 dB。

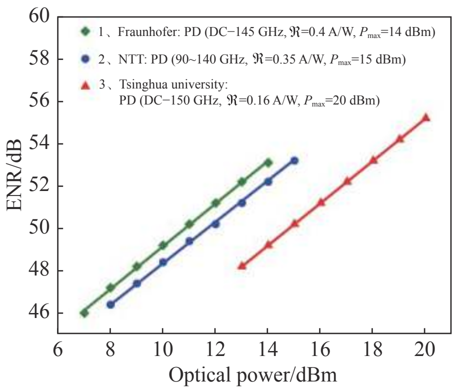

图 2 ASE 噪声光拍频产生噪声超噪比与入射光功率 P_0 的理论曲线(100 GHz 处)

Fig. 2 The excess noise ratio versus the ASE noise power P_0 at 100 GHz

图 3 给出了光生毫米波噪声的超噪比与所采用光电探测器响应度$\boldsymbol{R}$之间的关系曲线。设 ASE 的光功率 P_0=10 dBm, 线宽 σ=0.1 nm, 两 ASE 光谱的中心频率差 $\nu_2-\nu_1$=100 GHz, 光电探测器的响应度约在 0.1~0.6 A/W 之间(如 NTT 公司 280~380 GHz 的 PD(IOD-PMJ-13001) 的响应度典型值为 0.22 A/W, Finisar 公司 DC-100 GHz 的 PD(XPDV412xR)的响应度典型值为 0.6 A/W)。从图 3 中可以看出,当光电探测器的响应度在 0.1~0.6 A/W 变化时,所产生的毫米波噪声在 100 GHz 处的超噪比与 PD 的响应度$\boldsymbol{R}$呈对数关系,当 PD 的响应度大于 0.35 A/W, 且光功率大于 10 dBm 时,光生毫米波噪声源的超噪比大于 50 dB。

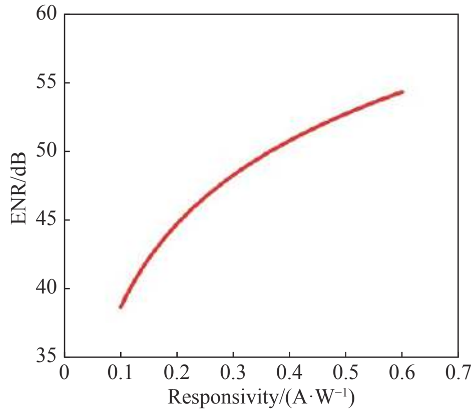

图 3 100 GHz 处的 ENR 与 PD 响应度$\boldsymbol{R}$的关系曲线(σ=0.1 nm, P_0=10 dBm)

Fig. 3 The relationship between the excess noise ratio and the PD responsivity $\boldsymbol{R}$ at 100 GHz(σ=0.1 nm, P_0=10 dBm)

图 4(彩图见期刊电子版)给出了非相干光线宽对光生毫米波噪声源超噪比的影响及线宽与带宽的关系,此时 PD 响应度$\boldsymbol{R}$=0.35 A/W, 入射光功率 P_0=15 dBm。如图 4 中红色曲线所示,随着光谱线宽增大,毫米波噪声的超噪比呈对数下降趋势。其原因是,光生毫米波噪声的带宽随着光谱线宽增大而线性增加(如图 4 中蓝色直线所示),加之入射光功率保持不变,从而导致功率谱密度降低。尽管如此,可发现在线宽低于 0.22 nm 时,光生噪声的超噪比仍大于 50 dB。

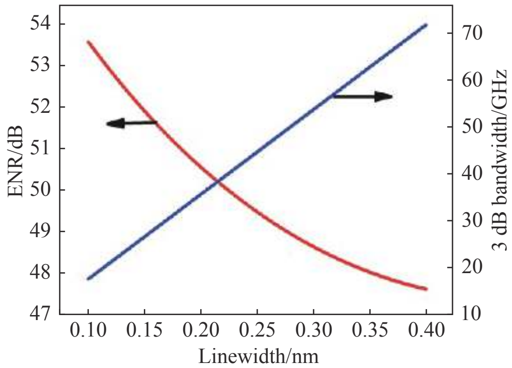

图 4 噪声源的 ENR 和 3 dB 带宽分别与两个高斯光噪声线宽 σ 的关系(@100 GHz, $\boldsymbol{R}$= 0.35 A/W, P_0=15 dBm)

Fig. 4 The variation of the excess noise ratio and the 3 dB bandwidth of the noise source with the linewidth of two Gaussian optical noises.(@100 GHz, $\boldsymbol{R}$ = 0.35 A/W, P_0=15 dBm)

通过上面的理论分析可知, 通过选择入射光功率 P_0、光电探测器的响应度 $\boldsymbol{R}$ 和拍频光噪声信号的线宽 σ 这 3 个因素, 可以产生中心频率与带宽均可调节的高超噪比的毫米波噪声源。

3　实验验证

本文通过实验验证了非相干光拍频产生高超噪比毫米波噪声的设想, 实验装置如图 1 所示。由一个 ASE 宽带光源(KG-ASE-C-13-D-FA)产生的 ASE 噪声信号被两路光滤波器滤波整形, 产生两个中心频率分别为 X 和 Y 的高斯型光噪声信号。图 5(a)所示, 光滤波器 1 滤出一束中心波长为 1 550 nm 的高斯型 ASE 光谱①, 光滤波器 2 滤出一束中心波长为 1 550.28 nm 的高斯型 ASE 光谱②。之后, 这两束光经过一个 3 dB 光纤耦合器进行耦合, 耦合后的光谱图如图 5(b)所示, 两光谱进行耦合叠加后有两个峰值, 这两峰值之间的波长差即为拍频项产生的电噪声信号的中心频率。EDFA(Amonics AEDFA-PA-35-B-FA)用来放大输入光信号的光功率, 使入射到高速光电探测器(Finisar XPDV2120R, $\boldsymbol{R}$=0.65 A/W, P_{max}=10 dBm)的光噪声功率能达到 PD 的最大饱和功率, 从而获得最大的电噪声值。光放大器 EDFA 用于调控入射光功率, 光滤波器用于调控噪声源的中心频率与带宽。因实验中所采用的探测器带宽为 50 GHz, 因此, 在实验中仅在 50 GHz 的范围内来验证本文提出的光生高超噪比毫米波技术方案。

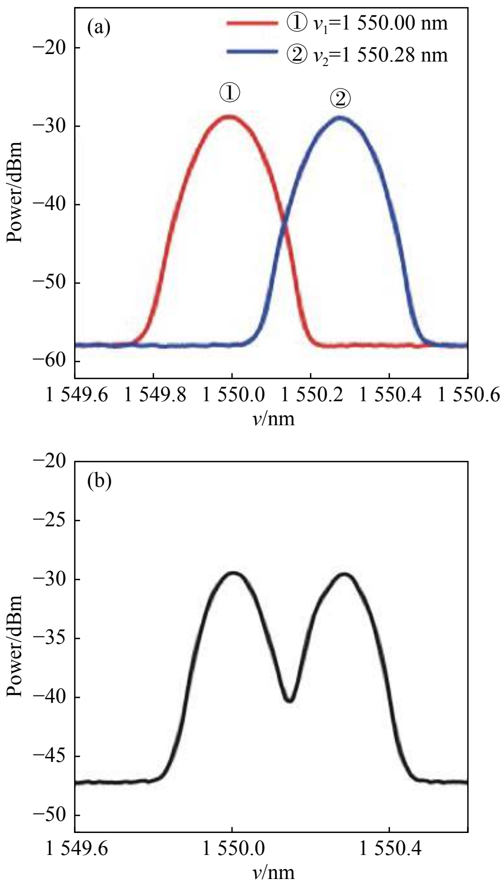

图 5　(a)ASE 噪声源被两光滤波器滤波整形后的两路光谱图; (b)滤波出的两束光被耦合后的光谱图

Fig. 5　(a) Two channel spectra of the ASE noise source filtered and shaped by two optical filters; (b) the spectra of the filtered two beams after coupling

在实验过程中, 设置两拍频光的波长线宽为 0.1 nm, 入射到 PD 的光功率为 9.8 dBm。图 6(a)、6(b)(彩图见期刊电子版)分别给出了非相干光中心频率差为 25 GHz 和 35 GHz 获得的噪声频谱。可见, 电噪声的功率谱包含两个频谱: 一个中心频率 f_{c1}=0 GHz 的半高斯谱和一个中心频率 f_{c2}=25 GHz 或 f_{c2}=35 GHz, 带宽为 1.414 B 的高斯谱, 与理论分析一致。虽然中心频率 f_{c1}=0 GHz 的半高斯谱的幅值大于拍频项, 但是它只分布在低频部分且不能随意调控。所以对于高频段的噪声源通常把 f_{c1}=0 GHz 的半高斯谱滤波掉, 只取拍频项产生的噪声信号作为噪声源。拍频项噪声的分布位置由其中心频率决定, 可通过调控两拍频光噪声信号的中心波长差来控制。图中红色曲线①为实验结果。

同时, 采用 Optisystem 平台进行仿真, 选择两个 LED 模块为宽带光噪声源以及两个高斯型光滤波器对宽带光噪声源进行滤波整形(调谐光滤波器 1 中心频率为 1 550 nm,光滤波器 2 中心频率为 1 550.2 nm 或 1 550.28 nm, 带宽均为 12.5 GHz, 对应光谱线宽为 σ=0.1 nm), 可得出两路已知中心频率和线宽的高斯型光噪声信号, 用 3 dB 耦合器将两路光耦合入射到光放大器模块, 通过调控光放大器模块的增益使得耦合后的光噪声功率为 9.8 dBm, 两非相干光噪声经过耦合放大后在 PIN 光探测器中进行拍频, 设置光探测器响应度为 0.65 A/W, 可得到电噪声。仿真结果如图 6 中蓝色曲线②所示。对比发现, 实验与仿真功率谱在形

状和幅值上均保持一致；3 dB 带宽均为 17.6 GHz，约等于光谱线宽的 1.414 倍，与理论结果吻合。此外，对比图 6(a) 与图 6(b)，噪声谱的频率范围随着中心频率改变而发生变化，但是带宽和谱线形状均可保持。因此，通过调控两个高斯光噪声的中心频率差，易于调控噪声源工作频段。

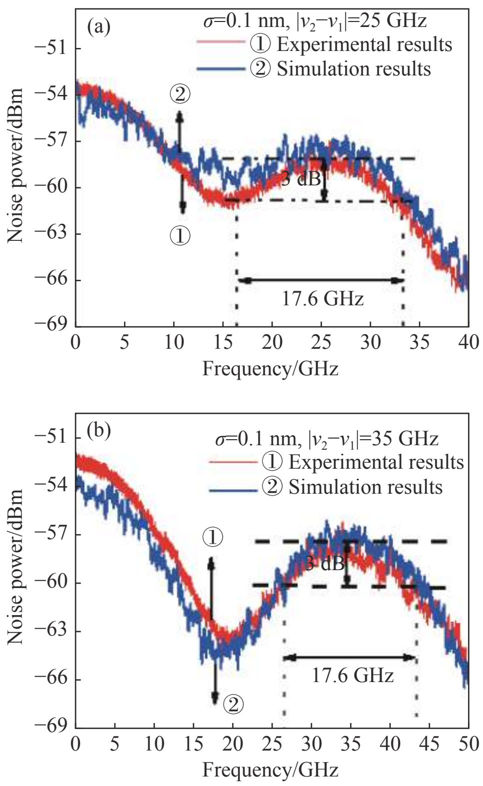

图 6 不同中心频率下，实验与仿真分别产生的宽带毫米波噪声源的频谱图。(a) 25 GHz; (b) 35 GHz

Fig. 6 Power spectra of the broadband millimeter-wave noise (RBW=1 MHz) at different center frequencies. (a) 25 GHz; (b) 35 GHz. Red: experiment; blue: simulation

在实验中，用频谱仪作为接收器对所产生的电噪声信号进行测量，设置其分辨率带宽 RBW 为 1 MHz。根据图 6 中实验获得的噪声功率谱，所产生的噪声信号的功率谱密度可表示为：$S_a(f)=P(f)-10\log(\mathrm{RBW})$，$P(f)$ 是在频谱仪中观测到的功率谱。故根据噪声功率谱可计算得出噪声信号功率谱密度，再结合式(4)可计算出对应频段的超噪比，结果如图 7 所示(彩图见期刊电子版)，只取拍频项 3 dB 带宽内噪声信号的 ENR，其中褐色曲线①和橙色曲线②分别是中心频率为 25 GHz 和 35 GHz 的噪声超噪比分布。可见，实验产生的噪声源在 3 dB 带宽内 (17.6 GHz) 的超噪比分布在 54~57 dB 之间，远高于传统的噪声源。此外，当中心频率从 25 GHz 调节到 35 GHz 时，超噪比没有出现明显改变。

根据这一实验结果，在模拟仿真过程中，根据实验条件同样设置两拍频光光谱线宽 σ=0.1 nm，入射到 PD 的光功率 P_0=9.8 dBm，探测器的响应度 $\boldsymbol{R}$=0.65 A/W。在第一次仿真中分别调控两拍频光的中心波长为 1 550.00 nm 和 1 552.4 nm，在第二次仿真中分别调控两拍频光的中心波长为 1 550.00 nm 和 1 552.56 nm。模拟仿真分别得到了拍频项中心频率为 300 GHz 和 320 GHz 的高斯型电噪声信号，低频部分噪声信号已被滤除，拍频项对应的高频部分噪声的 ENR 结果分别如图 7 中绿色曲线③和蓝色曲线④所示，ENR 仍然保持高斯型变化趋势。高频段噪声信号 3 dB 带宽仍为 17.6 GHz，超噪比仍然保持在 54~57 dB 之间。故在与实验条件相同的情况下，通过调控两拍频光的中心波长差，使在高频段同样能产生与低频段一样大超噪比的噪声源。因此，我们可以合理预测，在实验设备条件允许的情况下，利用光噪声拍频的方法可以产生毫米波甚至亚太赫兹波段的高超噪比噪声源，并且可以根据光功率等参数实现超噪比调控。

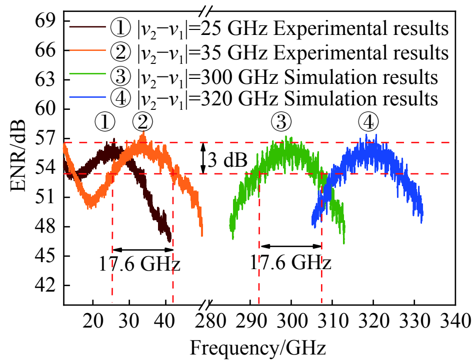

图 7 毫米波噪声源超噪比的实验和模拟结果

Fig. 7 Experimental and simulation results of the excess noise ratio of the millimeter-wave noise source

4 结 论

本文理论上阐明了基于非相干光拍频产生毫米波噪声技术中影响噪声源超噪比的因素，明确了超噪比随入射光功率线性增加、随光电探测响

应度对数增加、随光噪声信号线宽对数降低的关系。我们利用主要供应商和研究组的典型 PD 产品参数进行模拟仿真,发现通过合理调节入射到 PD 的光功率和光噪声信号的线宽,可实现超噪比大于 50 dB 的毫米波噪声源。实验上,产生了频率范围为 17~33 GHz 和 27~43 GHz 的噪声信号,实现了超噪比 54~57 dB,与仿真结果在 292~308 GHz 和 312~328 GHz 频段一致验证了理论预期。同时,通过选择两非相干光的中心频率差,我们就可以在毫米波甚至太赫兹波段产生高超噪比的噪声信号,从而弥补目前基于电子元件的毫米波噪声发生器的缺乏。

参考文献:

[1] 王璐钰, 李玉琼, 蔡榕. 空间激光干涉仪光程倾斜耦合噪声抑制[J]. 光学精密工程, 2021, 29(7): 1491-1498.
WANG L Y, LI Y Q, CAI R. Optical path slanting coupling noise suppression in space laser interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(7): 1491-1498. (in Chinese)

[2] 李乐, 汪龙祺, 黄煜, 等. 光电探测系统噪声特性研究与降噪设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(12): 2674-2683.
LI L, WANG L Q, HUANG Y, *et al*.. Research on noise characteristics and noise reduction design of photoelectric detection system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(12): 2674-2683. (in Chinese)

[3] 赵九龙, 马瑜, 李爽, 等. 三维医学图像的混合噪声去除方法[J]. 液晶与显示, 2015, 30(2): 340-346.
ZHAO J L, MA Y, LI S.*et al*.. Hybrid Noise Removal method for 3D medical image[J]. *Liquid crystal and Display*, 2015, 30(2): 340-346. (in Chinese)

[4] HSIAO H F, TU C H, CHANG D C, *et al*.. Noise figure verification using cold-Source and Y-factor technique for amplifier and down-converted mixer[C]. *2014 Asia-Pacific Microwave Conference*, *IEEE*, 2014: 901-903.

[5] PARASHARE C R, KANGASLAHTI P P, BROWN S T, *et al*. . Noise sources for internal calibration of millimeter-wave radiometers[C]. *2014 13th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad)*, *IEEE*, 2014: 157-160.

[6] SHAHRIAR C, PAN M L, LICHTMAN M, *et al*.. PHY-layer resiliency in OFDM communications: a tutorial[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(1): 292-314.

[7] 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]. *2014 IEEE International Conference on Electronics*, *IEEE*, 2014: 1-5.

[8] 余恒炜, 黎大兵, 孙晓娟, 等. 量子随机数高斯噪声信号发生器[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1492-1499.
YU H W, LI D B, SUN X J, *et al*.. Quantum Random number Gaussian Noise signal generator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1492-1499. (in Chinese)

[9] BELAND P, LABONTE S, ROY L, *et al*.. A novel on-wafer resistive noise source[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1999, 9(6): 227-229.

[10] 梁伟军, 高秋来. WR28低温标准噪声源[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(31): 7672-7676,7681.
LIANG W J, GAO Q L. A WR28 cryogenic standard noise source[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(31): 7672-7676,7681. (in Chinese)

[11] PAWAR N Y, GANGAL S A, SHALIGRAM A D, *et al*.. Development of X-band microwave noise source using neon gas fluorescent gas discharge tube[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2021, 2335(1): 050002.

[12] 曹逸庭. 3mm肖特基势垒二极管雪崩噪声源[J]. 红外与毫米波学报, 1990, 9(4): 317-320.
CAO Y T. Avalanche noise source of Schottky barrier diode in the 3 mm band[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1990, 9(4): 317-320. (in Chinese)

[13] 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.

[14] 刘玉栋, 杜磊, 孙鹏, 等. 静电放电对功率肖特基二极管*I-V*及低频噪声特性的影响[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 137203.
LIU Y D, DU L, SUN P, *et al*.. The effect of electrostatic discharge on the *I-V* and low frequency noise characterization of Schottky barrier diodes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(13): 137203. (in Chinese)

[15] HUGGARD P G, AZCONA L, ELLISON B N, *et al*.. Application of 1.55 μm photomixers as local oscillators & noise

sources at millimetre wavelengths[C]. *Infrared and Millimeter Waves, Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on 2004 and 12th International Conference on Terahertz Electronics*, *IEEE*, 2004: 771-772.

[16] 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.

[17] ZHAO R K, YAO T M, DUAN X D, *et al*.. Design of a 0.1~18GHz high-power broadband noise source[C]. *2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, *IEEE*, 2020: 1-3.

[18] EHSAN N, PIEPMEIER J, SOLLY M, *et al*.. A robust waveguide millimeter-wave noise source[C]. *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, *IEEE*, 2015: 853-856.

[19] GONCALVES J C A, QUEMERAIS T, GLORIA D, *et al*.. A 130 to 170 GHz integrated noise source based on avalanche silicon Schottky diode in BiCMOS 55 nm for in-situ noise characterization[C]. *2017 International Conference of Microelectronic Test Structures (ICMTS)*, *IEEE*, 2017: 1-3.

[20] GONÇALVES J C A, GHANEM H, BOUVOT S, *et al*.. Millimeter-wave noise source development on SiGe BiCMOS 55-nm technology for applications up to 260 GHz[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(9): 3732-3742.

[21] ALIMENTI F, SIMONCINI G, BROZZETTI G, *et al*.. Millimeter-wave avalanche noise sources based on p-i-n diodes in 130 nm SiGe BiCMOS technology: device characterization and CAD modeling[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 178976-178990.

[22] 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.

[23] VIDAL B. Broadband photonic microwave noise sources[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(10): 592-594.

[24] CHAO E F, XIONG B, SUN CH ZH, *et al*.. Comprehensive design method of MUTC-PD for terahertz applications[C]. *2020 Asia Communications and Photonics Conference(ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC)*. *IEEE*, 2020: 1-3.

作者简介：

黄海碧（1995—），女，广东湛江人，现为广东工业大学硕士研究生，主要从事光子毫米波噪声产生技术方面的研究。E-mail: hhbwbs@163.com

王云才（1965—），男，山西太原人，博士，教授，博士生导师，1997 年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得理学博士学位，现为广东工业大学教授，博士生导师。主要从事微波光子学与毫米波器件，硬件保密通信，密钥分发技术等领域的研究。E-mail: wangyc@gdut.edu.cn