

太赫兹混频器噪声系数测量

陶星宇 刘文杰 孙粤辉 秦菲菲 宋青娥 赵泽宇 刘丽娟 陈天香 王云才

Noise figure measurement of terahertz mixer

TAO Xing-yu, LIU Wen-jie, SUN Yue-hui, QIN Fei-fei, SONG Qing-e, ZHAO Ze-yu, LIU Li-juan, CHEN Tian-xiang, WANG Yun-cai

引用本文:

陶星宇, 刘文杰, 孙粤辉, 秦菲菲, 宋青娥, 赵泽宇, 刘丽娟, 陈天香, 王云才. 太赫兹混频器噪声系数测量[J]. *中国光学*, 2024, 17(4): 943-949. doi: 10.37188/CO.2023-0193

TAO Xing-yu, LIU Wen-jie, SUN Yue-hui, QIN Fei-fei, SONG Qing-e, ZHAO Ze-yu, LIU Li-juan, CHEN Tian-xiang, WANG Yun-cai. Noise figure measurement of terahertz mixer[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 943-949. doi: 10.37188/CO.2023-0193

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0193>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高超噪比宽带毫米波噪声信号光子学产生研究

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

中国光学 (中英文). 2022, 15(2): 251 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0158>

黑砷磷室温太赫兹探测器

Room-temperature terahertz photodetectors based on black arsenic-phosphorus

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 182 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0175>

利用低信噪比小样本太赫兹光谱实现心肌淀粉样变检测

Detection of myocardial amyloidosis by a small number of terahertz spectra with low signal-to-noise ratio

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 443 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0223>

空间激光干涉仪激光抖动噪声抑制研究

Noise suppression of laser jitter in space laser interferometer

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1426 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0045>

基于光场处理方法的太赫兹成像优化

Improving terahertz imaging by light field processing

中国光学 (中英文). 2022, 15(6): 1313 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0005>

太极计划时钟噪声传递的地面原理验证

Ground-based principle verification of clock noise transfer for the Taiji program

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1394 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0012>

文章编号 2097-1842(2024)04-0943-07

太赫兹混频器噪声系数测量

陶星宇¹, 刘文杰^{1,2,3}, 孙粤辉^{1,2,3}, 秦菲菲^{1,2,3}, 宋青娥⁴, 赵泽宇¹, 刘丽娟¹, 陈天香¹, 王云才^{1,2,3*}

(1. 广东工业大学 信息工程学院 先进光子技术研究院, 广东 广州 510006;

2. 广东工业大学 通感融合光子技术教育部重点实验室, 广东 广州 510006;

3. 广东工业大学 广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006;

4. 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘要: 噪声系数是评价高频电子器件传输信号性能的重要参数, 随着工作频率的增加, 高频电子器件的噪声系数通常会增大, 现有噪声源的超噪比无法满足测量需求。为了实现高频电子器件噪声系数的测量, 本文基于非相干光混频技术, 将三束非相干光耦合进入单行载流子光电二极管, 研制了 220~325 GHz 高超噪比且可调谐的太赫兹光子噪声源, 超噪比可调谐至 45 dB。通过 Y 因子法将其应用于大噪声系数、负变频增益太赫兹混频器噪声系数的测量。测量得到太赫兹混频器噪声系数的范围为 16~32 dB, 变频增益约为 -13 dB, 测量不确定度为 0.43 dB。研制的高超噪比且可调谐的太赫兹光子噪声源, 能够满足大噪声系数太赫兹电子器件的测量需求, 对太赫兹电子器件噪声系数的测量以及指导器件的进一步优化有着重要的作用。

关键词: 噪声系数; 噪声源; 太赫兹混频器; 光混频; Y 因子法

中图分类号: TN209 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0193

Noise figure measurement of terahertz mixer

TAO Xing-yu¹, LIU Wen-jie^{1,2,3}, SUN Yue-hui^{1,2,3}, QIN Fei-fei^{1,2,3}, SONG Qing-e⁴, ZHAO Ze-yu¹,

LIU Li-juan¹, CHEN Tian-xiang¹, WANG Yun-cai^{1,2,3*}

(1. *Institute of Advanced Photonics Technology, School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;*

2. *Key Laboratory of Photonic Technology for Integrated Sensing and Communication, Ministry of Education of China, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;*

3. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;*

4. *Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China)*

* *Corresponding author, E-mail: wangyc@gdut.edu.cn*

Abstract: Noise Figure (NF) is an important parameter in evaluating the performance of transmitting a signal from a high-frequency electronic device. As the operating frequency increases, the NF of high-frequency electronic devices usually increases, and the Excess Noise Ratio (ENR) of existing noise sources cannot meet

收稿日期: 2023-10-28; 修订日期: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61927811)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61927811)

the associated measurement requirements. Therefore, to meet the measurement requirements for the NF of high-frequency electronic devices, we propose combining three incoherent optical beams into an untraveling carrier photodiode (UTC-PD) based on incoherent optical mixing technology. A tunable terahertz (THz) photonics noise source with a high ENR in the 220–325 GHz frequency range is developed. The ENR can be tuned up to 45 dB. By using the Y-factor method, the proposed THz photonics noise source is applied to measure a THz mixer with large NF and negative conversion gain. The measured NF of the THz mixer ranges from 16 to 32 dB, the conversion gain is about -13 dB, and the uncertainty is 0.43 dB. The tunable THz photonics noise source with high ENR can meet the measurement requirements of THz electronic devices with high NF. It will play an important role in the measurement of NF of THz electronic devices and in guiding further optimization.

Key words: noise figure; noise source; terahertz mixer; optical mixing; Y-factor method

1 引言

随着半导体技术的发展,毫米波甚至太赫兹(terahertz, THz)频段的电子器件呈现高速发展态势,它们在通信^[1]、天文^[2]、军事^[3]等领域有着重要的应用。太赫兹混频器的出现是半导体技术不断进步的重要体现,是上述各领域中必不可少的器件。为了确保太赫兹混频器在工作频段内具有良好的信号传输性能,表征太赫兹混频器的噪声系数(Noise Figure, NF)是重要工作,这对验证太赫兹混频器设计和指导优化有着重大意义。

太赫兹混频器的噪声系数通常随着工作频率的增加而增加,噪声系数难以测量,亟需研制相应的高频和大超噪比(Excess Noise Ratio, ENR)的噪声源。广泛应用于噪声系数测量的噪声源的类型有基于普朗克黑体辐射定律的电阻噪声源,基于散弹噪声的二极管噪声源等^[4-6],例如:法国 Fiorese V 等人基于 BiCMOS 55 nm 技术的二极管开发了 140~170 GHz 的超噪比调谐范围为 0~37 dB 的噪声源^[7]。法国 Ghanem H 等人基于 55 nm 的 CMOS 技术研制了频率达 325 GHz 的毫米波噪声源,超噪比最高达到 20 dB^[8]。上述方法受限于电子器件带宽,工作频率越高,输出超噪比越低。为了突破电子带宽的限制,以光子学为基础的噪声源逐渐受到关注^[9-12]。日本 NTT 公司的 Song H J 等人,使用两个阵列波导光栅,通过调谐光栅的频率差产生了每段频率宽度约为 12.5 GHz 的噪声信号,总频率覆盖范围为 295~355 GHz,超噪比约为 20 dB^[13]。经过进一步研

究, Song H J 等人产生了频率范围在 275~340 GHz 的噪声信号,噪声信号的超噪比最高约为 30 dB^[14]。法国 Ghanem H 等人使用微波光子学方法,产生了覆盖 260~320 GHz 频率范围的噪声信号,超噪比最高约为 30 dB^[15]。然而,工作频率在 300 GHz 附近的太赫兹混频器的噪声系数能够达到 30 dB^[16-18],转换增益为负值,现有的噪声源仍旧无法满足这类大噪声系数和负转换增益太赫兹混频器的测量要求。因此,亟需研制高超噪比且可调谐的光子噪声源以满足不同噪声系数太赫兹混频器的测量需求。

本文基于非相干光混频技术研制了工作频率为 220~325 GHz,超噪比可调谐的太赫兹光子噪声源,输出超噪比可调谐的范围为 18~45 dB,并将其应用于太赫兹混频器噪声系数的测量。之后,演示了用该太赫兹光子噪声源测量工作频率范围在 220~325 GHz 的大噪声系数、负变频增益的太赫兹混频器。通过计算得出测量系统不确定度为 0.43 dB。

2 噪声系数测量原理与光子噪声源的研制

2.1 噪声系数测量原理

超噪比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:

$$\text{ENR} = 10 \lg \left(\frac{T_{\text{on}} - T_{\text{off}}}{T_0} \right) = S_i(f) \text{ dBm/Hz} - (-174) \text{ dBm/Hz} \quad (1)$$

其中, T_{on} 、 T_{off} 分别为噪声源开启和关闭时输出的等效噪声温度, T_0 为标准室温 (290 K), $S_i(f)$ 为噪声源开启时输出的噪声功率谱密度。噪声系数一般定义为信号通过待测器件时的信噪比恶化程度, 其表达式为:

$$NF = 10 \lg F = 10 \lg \frac{S_{\text{in}}/N_{\text{in}}}{S_{\text{out}}/N_{\text{out}}}, \quad (2)$$

其中, F 是噪声因子, S_{in} 是输入信号功率, N_{in} 是输入噪声功率, S_{out} 是输出信号功率, N_{out} 是输出噪声功率。若待测器件的增益为 G , 则输出信号功率 $S_{\text{out}}=GS_{\text{in}}$, 输出噪声功率 $N_{\text{out}}=GN_{\text{in}}+N_a$, 其包含输入端的噪声 GN_{in} 和待测器件内部产生的热噪声 N_a 。

待测器件的噪声系数可用 Y 因子法测量。根据奈奎斯特噪声定理 $N=kTB$ (N 为噪声功率, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, B 为带宽), 可以通过打开和关闭噪声源电源来获得冷热两种状态下的噪声功率^[9], 从而计算出 Y 系数, 其表达式为:

$$Y = \frac{N_{\text{on}}}{N_{\text{off}}} = \frac{T_{\text{DUT}} + T_{\text{on}}}{T_{\text{DUT}} + T_{\text{off}}}, \quad (3)$$

其中, N_{on} 和 N_{off} 分别为噪声源开启和关闭时输出噪声信号通过系统后测量得到的功率, T_{DUT} 是待测器件的噪声温度, 一般情况下 T_{off} 的参考温度为标准室温, 即 $T_{\text{off}}=T_0=290$ K。由此可知待测器件自身的噪声温度表达式为:

$$T_{\text{DUT}} = \frac{T_{\text{on}} - YT_{\text{off}}}{Y - 1}. \quad (4)$$

将式(4)代入式(2), 可得到待测器件的噪声系数:

$$NF_{\text{DUT}} = 10 \lg \left(\frac{T_{\text{on}} - T_{\text{off}}}{T_0} \right) - 10 \lg(Y - 1). \quad (5)$$

根据超噪比的定义可知, 上式等号右边第一项刚好是噪声源的超噪比, 因此公式(5)可简写为:

$$NF_{\text{DUT}} = 10 \lg F_{\text{DUT}} = \text{ENR} - 10 \lg(Y - 1), \quad (6)$$

其中, F_{DUT} 为待测器件噪声因子。

若待测器件的噪声系数很大, 或具有负的变频增益, 当输入噪声的超噪比较低时, 输出噪声会被待测器件的本底噪声掩盖, 导致 Y 因子的值趋近于 1, 此时计算获得的待测器件的噪声系数误

差很大。为了提高测量数据的准确性和精确度, 一般要求噪声源的超噪比要大于某一确定值。假如 300 GHz 的太赫兹混频器的噪声系数约等于 30 dB, 则噪声源的超噪比要达到 30 dB 以上才能获得精度较高的噪声系数。传统电子噪声源受电子带宽的限制, 在太赫兹频段很难输出超噪比大于 30 dB 的噪声, 而光子噪声源则可避免这种限制, 输出更高超噪比的噪声。

在实际测量过程中, 由于信号接收系统(频谱分析仪)本身也会产生噪声功率, 这部分噪声功率会叠加在总的输出噪声功率上, 这时的测量结果是待测器件与信号接收系统级联的噪声因子。因此在测量前, 需要对信号接收系统进行校准, 得到相应的噪声因子。完成测量后根据下式计算出待测器件的增益和噪声因子:

$$G = \frac{N_{\text{on},12} - N_{\text{off},12}}{N_{\text{on},2} - N_{\text{off},2}}, F_{\text{DUT}} = F_{12} - \frac{F_2 - 1}{G}, \quad (7)$$

其中 $N_{\text{on},2}$ 、 $N_{\text{off},2}$ 分别为噪声源开启和关闭时输出噪声信号仅通过信号接收系统后测量的功率, $N_{\text{on},12}$ 、 $N_{\text{off},12}$ 分别为噪声源开启和关闭时输出噪声信号通过待测器件与信号接收系统后测量的功率, F_{12} 是待测器件与信号接收系统级联的噪声因子, F_2 是信号接收系统的噪声因子。

2.2 光子噪声源的研制

基于非相干光混频技术^[20], 本文将三束高斯型非相干光信号进行耦合。耦合信号被注入到单行载流子光电二极管(unitraveling carrier photodiode, UTC-PD)中, 通过改变三束非相干光信号的中心波长差, 耦合的光信号被转换为目标频率范围内的电噪声信号。光信号转换为电噪声信号的原理如图 1 所示, 假设三束非相干光的中心波长分别为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 , 电噪声信号的中心频率分别为 f_1 、 f_2 , 电噪声信号的中心频率与三束高斯型非相干光信号的中心波长差有关, 产生的电噪声信号的功率集中分布在目标频率范围内。

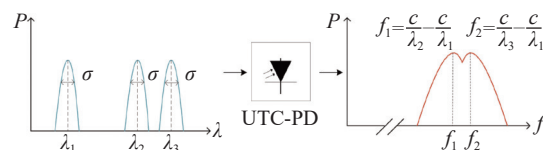


图 1 光信号转换为电噪声信号的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of conversion of the optical signal to the electrical noise signal

产生的电噪声信号与耦合信号自相关成正比,耦合信号和相应电噪声信号的表达式分别如式(8)和(9)所示^[20]:

$$S_{\text{SLD}}(v) = \frac{S_{\text{SLD}}}{3} \exp \left\{ \left[-\frac{(v-v_1)^2}{2\sigma^2} \right] + \left[-\frac{(v-v_2)^2}{2\sigma^2} \right] + \left[-\frac{(v-v_3)^2}{2\sigma^2} \right] \right\}, \quad (8)$$

$$S_i(f) = \frac{\mathfrak{R}^2(f)P^2}{3\sqrt{\pi}\sigma} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{3} \exp\left(-\frac{[f-(v_3-v_1)]^2}{4\sigma^2}\right) + \\ \frac{1}{3} \exp\left(-\frac{[f-(v_2-v_1)]^2}{4\sigma^2}\right) + \\ \frac{1}{3} \exp\left(-\frac{[f-(v_3-v_2)]^2}{4\sigma^2}\right) + \\ \exp\left(-\frac{f^2}{4\sigma^2}\right) \end{array} \right\}, \quad (9)$$

其中, S_{SLD} 为输入光源的振幅, v_1 、 v_2 、 v_3 分别为 3 束非相干光中心波长对应的中心频率, 中心频率 ν 与中心波长 λ 的转换关系为 $\nu=c/\lambda$, 其中 c 为光速, σ 为高斯型光信号的 3 dB 线宽, P 为入射到单行载流子光电二极管的光功率, $\mathfrak{R}(f)$ 为单行载流子光电二极管的响应度。

根据式(9)可知, 在单行载流子光电二极管的响应度 $\mathfrak{R}(f)$ 、光信号中心波长 λ 和 3 dB 线宽 σ 保持不变的情况下, 通过控制入射光功率 P 可以改变相应的光电流 I , 从而控制噪声源的输出噪声功率谱密度, 进而根据超噪比的表达式(1)控制输出超噪比的大小。

本文采用非相干光混频的方法, 研制了具有高超噪比的太赫兹光子噪声源(IPTL-03), 其原理如图 2(a)所示。超辐射发光二极管(Super Luminescent Diode, SLD)产生的宽带光信号, 经 3 个高斯型光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)滤波后得到 3 束高斯型非相干光信号。FBG 滤波的 3 dB 线宽是 0.3 nm, 中心波长 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别为 1550、1551.76 和 1553.15 nm。随后将耦合后的光信号注入 UTC-PD 中, 在此过程中可通过操控半导体放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)和衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)来控制光信号功率, 进而调节光电流的大小, 最终实现噪声源输出超噪比的调控。图 2(b)给出了所研制噪声源的实物图, 内部结构分为两

层, 上层固定 FBG, 下层固定 SLD、SOA、VOA、UTC-PD 和控制电路。外部控制面板包含主机电源接口、主机电源开关、SLD 电源开关、UTC-PD 电源开关、UTC-PD 外置偏置电压接口(从左到右), 旋钮键用来调控噪声源超噪比的大小, 机箱背部为 WR-03 波导输出噪声信号。

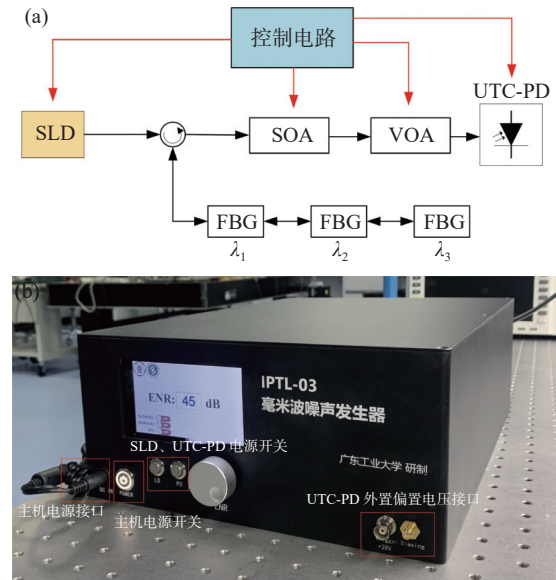
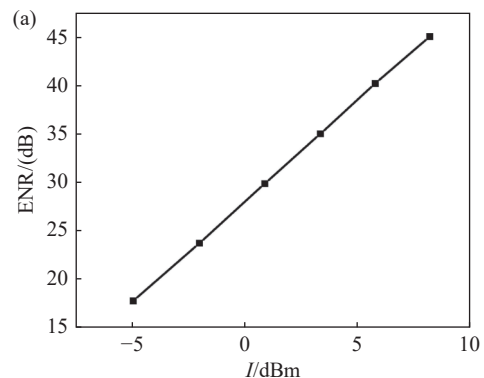


图 2 噪声源(a)原理图及(b)实物图

Fig. 2 (a) Schematic diagram and (b) physical diagram of the noise source

通过控制面板的旋钮可以控制输入单行载流子光电二极管的光功率, 来调节光电流的大小, 进一步调控噪声源输出超噪比的大小。图 3 展示了噪声源输出的超噪比与光电流的变化关系。从图 3(a)中可知, 随着光电流的逐渐增大, 超噪比值也逐渐增大, 两者呈线性关系。从图 3(b)(彩图见期刊电子版)可知, 不同光电流所对应的超噪比曲线趋势一致。实验测量的噪声超噪比处于 18~45 dB 范围内。



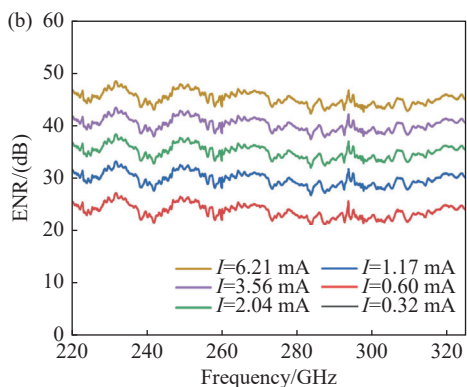


图 3 超噪比与光电流的关系。(a)超噪比随光电流的变化趋势;(b)不同光电流对应的超噪比频谱

Fig. 3 The relationship between the ENR and the photocurrent. (a) The trend of the ENR varying with photocurrent; (b) the frequency spectra under different photocurrents

3 噪声系数测量

为了验证该噪声源测量大噪声系数、负变频增益太赫兹混频器的潜力, 测量了太赫兹混频器的噪声系数。其射频频率范围为 220~325 GHz, 该太赫兹混频器由反向并联肖特基二极管芯片、石英基电路构成。石英基电路包含双工器、高通滤波器和中频滤波器^[21]。输入端口的波导为 WR3.4, 中频和本振端口采用 3.5 mm 连接器。测量时本振信号由频谱分析仪提供, 信号功率由频谱分析仪读取, 采用固定中频可变本振的测量模式, 太赫兹混频器输出的中频信号为 1.32 GHz, 使用增益为 26 dB, 噪声系数为 5 dB 的低噪声放大器放大太赫兹混频器中频端口输出的下变频噪声信号。放大器与频谱分析仪构成噪声信号接收系统。测量时的室温为 290 K。图 4 展示了噪声系数测量装置的框图。此外, 测量太赫兹混频器的噪声系数需要射频和中频两个频率范围的噪声源, 使用的中频噪声源同样是基于光子学方法。

采用 Y 因子法对太赫兹混频器的噪声系数进行了测量。测量分为两个阶段, 第一阶段是校准, 中频噪声源直接连接噪声信号接收系统, 目的是测量噪声信号接收系统的噪声系数以及噪声源开关两种状态下的噪声功率, 消除此噪声系数对待测器件噪声系数测量结果的影响。根据式(6)计算出噪声信号接收系统的噪声系数 NF_2 。

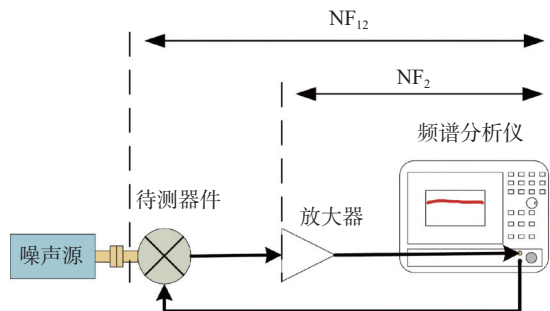


图 4 噪声系数测量装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of NF measurement device

第二阶段是测量, 射频频段的噪声源连接待测器件和噪声信号接收系统, 目的是测量待测器件和噪声信号接收系统级联的噪声系数以及噪声源开关两种状态下的噪声功率。根据式(6)、式(7)可以得到待测器件的噪声系数 NF_1 和变频增益 G 。利用噪声源超噪比可调谐的特点, 确保噪声系数测量结果的准确性以及待测器件处于线性工作状态, 改变噪声源超噪比的大小进行重复测量, 每个超噪比下测量 64 次并对结果求均值。当噪声源输出噪声超噪比小于 30 dB 时, 输出噪声的功率谱与待测器件的本底噪声有部分重叠(如图 5(彩图见期刊电子版)所示)。这导致重叠部分的 Y 因子近似为 1, 测量结果失真。

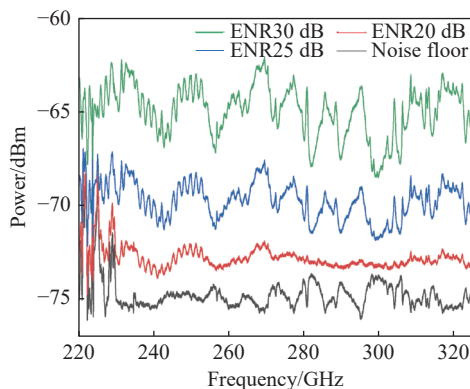


图 5 超噪比为 20 dB、25 dB 和 30 dB 时测得的功率谱
Fig. 5 The power spectra when the ENR is 20 dB, 25 dB, and 30 dB

当噪声源输出噪声的超噪比大于 30 dB 时, 输出噪声的功率谱与待测器件的本底噪声无重叠, 此时待测器件的噪声系数和增益如图 6(彩图见期刊电子版)所示。从图 6 中可以看到, 利用不同超噪比的噪声测量待测器件的噪声系数和增益时, 测量结果完全一致。由此可知该测量方法准确度高, 且待测器件在测量过程中始终处于线性工作状态。

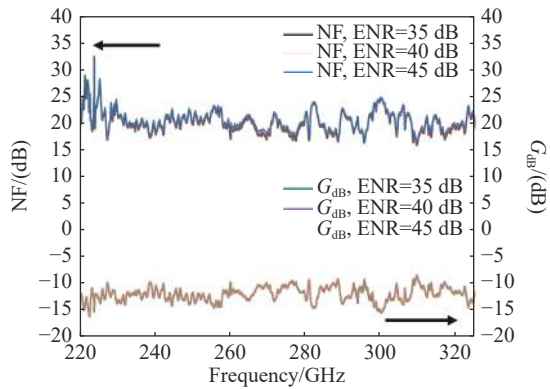


图 6 超噪比为 35 dB、40 dB 和 45 dB 时测量的噪声系数与增益

Fig. 6 NF and gain when the ENR is 35 dB, 40 dB, and 45 dB

从上述结果可以看出,工作频率范围为 220~

$$U = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{F_{12}}{F_1} \sqrt{(\delta NF_{12})^2 + (\delta ENR)^2}\right)^2 + \left(\frac{F_2}{F_1 G} \sqrt{(\delta NF_1)^2 + (\delta ENR)^2}\right)^2 + \left(\frac{F_2 - 1}{F_1 G} \sqrt{(\delta G_{dB})^2 + (\delta ENR)^2}\right)^2}, \quad (10)$$

式(10)中, u_1 为待测器件和噪声信号接收系统级联时测量的噪声系数引入的不确定度分量, u_2 为测量噪声信号接收系统的噪声系数引入的不确定度分量, u_3 为测量待测器件的增益引入的不确定度分量。

以 300 GHz 为例计算了在本文测量系统下,测量系统的不确定度。上述各物理量的值如表 1 所示。

表 1 各物理量的值

Tab. 1 The values of each physical quantity

物理量	δENR	δNF_{12}	δNF_2	δG_{dB}
计算值	0.27 dB	0.38 dB	0.38 dB	0.27 dB
物理量	F_1	F_2	F_{12}	G
测量值	285.68	1.73	311.58	0.03

参考文献:

- [1] NIU ZH Q, ZHANG B, DAI B L, *et al.*. 220 GHz multi circuit integrated front end based on solid-state circuits for high speed communication system[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2022, 31(3): 569-580.
- [2] MAIER D, REVERDY J, BILLON-PIERON D, *et al.*. Upgrade of EMIR's band 3 and band 4 mixers for the IRAM 30 m telescope[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, 2(2): 215-221.
- [3] PAGNINI L, COLLODI G, CIDRONALI A. A GaN-HEMT active drain-pumped mixer for S-band FMCW radar front-end applications[J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4479.
- [4] LIANG W J, GAO Q L. A WR28 cryogenic standard noise source[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(31): 7672-7676,7681.
- [5] FORSTÉN H, SAIJETS J H, KANTANEN M, *et al.*. Millimeter-wave amplifier-based noise sources in SiGe BiCMOS

325 GHz 的待测太赫兹混频器的噪声系数为 16~32 dB, 变频增益约为 -13 dB, 超噪比大于噪声系数才能够得到准确的测量结果。高超噪比且可调谐的光子噪声源能改善待测器件本底噪声掩盖噪声源输出噪声信号的情况。因此, 高超噪比可调谐的太赫兹光子噪声源对测量具有大噪声系数、负变频增益的待测器件有着重要作用。

4 测量系统不确定度

测量系统不确定度 U 根据式(10)进行计算(未考虑失配), 噪声系数测量系统的不确定度主要来源于噪声源超噪比、待测器件和噪声信号接收系统^[22]:

将上述物理量的值代入式(10)后可以得到测量系统不确定度 U 为 0.43 dB。

5 结论

本文研制了高频和超噪比大范围可调谐的太赫兹光子噪声源, 频率范围为 220~325 GHz, 超噪比调谐范围为 18~45 dB, 并用其表征了太赫兹混频器的噪声系数, 相比于现有电阻、二极管等电子噪声源, 其具有噪声系数测量范围更大, 工作频率更高的优势。本文研究表明了太赫兹光子噪声源在测量大噪声系数、负变频增益器件的潜力, 为毫米波与太赫兹器件的性能表征和优化提供了新的方案。

- technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(11): 4689-4696.
- [6] ZHAO R K, ZHANG ZH ZH, ZHANG Y, *et al.*. Design and implementation of 50GHz-110GHz ultra-broadband noise source[C]. *2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, IEEE, 2022: 1-3.
- [7] FIORESE V, GONCALVES J C A, BOUVOT S, *et al.*. A 140 GHz to 170 GHz active tunable noise source development in SiGe BiCMOS 55 nm technology[C]. *2021 16th European Microwave Integrated Circuits Conference*, IEEE, 2021: 125-128.
- [8] GHANEM H, GONCALVES 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.
- [9] 黄海碧, 刘文杰, 孙粤辉, 等. 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.
HUANG H B, LIU W J, SUN Y H, *et al.*. Photonics generation of broadband millimeter wave noise signals with high excess noise ratios[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 251-258. (in Chinese).
- [10] 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.
- [11] VIDAL B. Broadband photonic microwave noise sources[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(10): 592-594.
- [12] LIU J B, LIU W J, SUN Y H, *et al.*. Generation of broadband flat millimeter-wave white noise using rectangular ASE slices mixing[J]. *Optics Communications*, 2023, 530: 129106.
- [13] 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.
- [14] SONG H J, YAITA M. On-wafer noise measurement at 300 GHz using UTC-PD as noise source[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, 24(8): 578-580.
- [15] GHANEM H, LEPILLIET 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.
- [16] KHAMAISI B, SOCHER E. A 230-310 GHz down converter with integrated local oscillator in 65 nm CMOS technology[C]. *9th European Microwave Integrated Circuits Conference*, IEEE, 2014: 136-139.
- [17] HARA S, KATAYAMA K, TAKANO K, *et al.*. A 32Gbit/s 16QAM CMOS receiver in 300GHz band[C]. *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, IEEE, 2017: 1703-1706.
- [18] OJEFORS E, HEINEMANN B, PFEIFFER U R. Subharmonic 220- and 320-GHz SiGe HBT receiver front-ends[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(5): 1397-1404.
- [19] 董建涛. Y-因子算法与噪声系数不确定度分析[J]. *国外电子测量技术*, 2009, 28(3): 28-30.
DONG J T. Y-factor method and the analysis of NF uncertain[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2009, 28(3): 28-30. (in Chinese).
- [20] 孙粤辉, 郭亚, 王云才, 等. 130~170 GHz 平坦毫米波噪声信号产生技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2022, 52(11): 2155-2162.
SUN Y H, GUO Y, WANG Y C, *et al.*. Generation of 130-170 GHz flat millimeter-wave noise signal[J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2022, 52(11): 2155-2162. (in Chinese).
- [21] CHEN ZH, DENG J Q, WANG M, *et al.*. Design of a novel 170GHz-260GHz sub-harmonic mixer based on planar Schottky diodes[C]. *Proceedings of IEEE 9th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies*, IEEE, 2016: 186-188.
- [22] 陈晓华. 3mm 噪声系数测量系统[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
CHEN X H. *3mm noise figure measurement system* [D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese).

作者简介:



王云才(1965—),男,广东工业大学特聘教授,博士生导师,1986年于南开大学电子科学系获得学士学位,1994、1997年分别于中国科学院西安光学精密机械研究所获得工学硕士和理学博士学位,主要从事混沌、随机数、噪声的产生、应用与研究方面的工作。E-mail: wangyc@gdut.edu.cn