

文章编号: 2095-4980(2024)02-0168-08

微波毫米波与太赫兹噪声源发展现状

唐靖超, 姜万顺, 邓建钦, 朱伟峰, 石先宝*, 贾定宏*, 王沫, 张胜洲, 梁晓林, 宋青娥*

(中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266555)

摘要: 微波毫米波与太赫兹噪声源主要用于产生噪声信号, 是噪声系数测试系统的核心组成部分。本文对近年来国内外噪声源的发展情况进行总结, 将现有的噪声源归纳为基于数字和模拟电路技术、基于固态二极管技术、基于场效应管技术、基于黑体和热电阻技术、基于光电融合技术共5类噪声源, 并对这5类噪声源的主要技术特点进行了分析, 同时对各类型噪声源的国内外研究现状进行了对比, 并对其应用前景和发展趋势进行了展望。

关键词: 微波毫米波噪声源; 太赫兹噪声源; 噪声系数; 测试测量技术

中图分类号: TN98

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023136

Development of microwave, millimeter wave and terahertz noise sources

TANG Jingchao, JIANG Wanshun, DENG Jianqin, ZHU Weifeng, SHI Xianbao*, JIA Dinghong*,
WANG Mo, ZHANG Shengzhou, LIANG Xiaolin, SONG Qing'e*
(Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao Shandong 266555, China)

Abstract: Microwave, millimeter wave and terahertz noise sources are mainly employed to generate noise signals, and they are the core components of noise figure measurement system. This paper has summarized the development of noise sources at home and abroad in recent years. The existing noise sources are divided into five categories: based on digital and analog circuit technologies, based on semiconductor diode technology, based on field effect transistor technology, based on black body and heater circuit technologies, based on photoelectric fusion technology. The main technical characteristics of these five types of noise sources are analyzed. The research status of different noise sources are compared, and the application prospects and development trends are outlined.

Keywords: microwave and millimeter wave noise sources; terahertz noise source; noise figure; test and measurement technologies

噪声系数是微波毫米波与太赫兹芯片、器件和系统的关键指标, 决定着接收机能够接收到的信号强度下限, 代表了接收机处理微弱信号的能力, 因此能否对噪声系数进行准确测量具有重要意义^[1-2]。噪声系数的测量需要提供已知功率的噪声源, 噪声源是噪声系数测量系统的核心部分^[3]。目前已有的噪声源可分为基于数字和模拟电路的噪声源、基于固态二极管的噪声源、基于场效应管的冷噪声源、基于黑体辐射和热电阻的噪声源、基于光电融合的噪声源, 共5类噪声源。

基于数字和模拟电路的噪声源较多用于通信和网络设备等的检测, 噪声频率较低, 基本在MHz量级。基于固态二极管的噪声源是目前研究和应用较多的噪声源, 主要采用雪崩管等二极管制成, 但固态二极管噪声源(因二极管截止频率的限制)工作在毫米波高频段时, 噪声功率出现大幅度下降。基于场效应管的冷噪声源能够产生远小于室温电阻的等效噪声温度, 主要用于低温段对接收机进行定标, 目前噪声频率同样较低。基于黑体辐射和热电阻的噪声源常被用作标准源, 其输出噪声功率大小与频率关联度极小, 在太赫兹频段仍可以产生噪声输出, 但也存在一些短板: 噪声功率较小, 体积偏大, 且较难将噪声信号直接耦合进波导中, 使得这一类型噪声源的发展受到了限制。基于光电融合的噪声源主要利用混频方式产生噪声, 可实现较高超噪比的噪声信号输出, 是近些年新出现的一类噪声源, 也获得了较多关注。

收稿日期: 2023-05-24; 修回日期: 2023-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61927811); 青岛市关键技术攻关及产业化示范类资助项目(23-1-2-qjh-5-gx)

*通信作者: 石先宝 email:shixianbao@ceyear.com; 贾定宏 email:dinghongjia@gmail.com; 宋青娥 email:sqe2022@163.com

目前毫米波低频段的噪声源技术相对比较成熟，但在太赫兹频段，传统噪声源的频率、超噪比等参数无法满足日益增加的测试需求，需要进一步发展相关技术^[4-6]。

1 基于数字和模拟电路的噪声源

基于数字和模拟电路的噪声源主要用于通信和网络系统等的检测，目前这一类噪声源的频率总体较低，大部分处在MHz量级，仅有少数可达到GHz。早期这一类噪声源较多采用模拟电路，模拟电路产生的噪声更具有随机性，更接近自然噪声，但噪声参数设置的灵活性较差，且容易受到电磁干扰，同时稳定性易受压控振荡器性能的影响。近年来，随着数字电路技术的快速发展，基于数字电路的噪声源获得了较多关注，数字电路产生的噪声是人为控制的信号序列，这种方法可以通过外部串口的配置改变噪声参数，因此更加灵活，但产生的信号序列实际是伪随机数^[7-10]。目前国内针对数字和模拟电路噪声源的研究报道较多，总体频率小于GHz，国外研究机构针对这一类噪声源的研究报道相对较少，并主要基于数字电路技术，但噪声频率相对较高。

早年间，基于数字和模拟电路的噪声源的频率主要集中在kHz至MHz的范围。2012年，清华大学利用平行移位寄存器序列信号发生器产生白噪声，然后借助改进的映射表将白噪声转变为高斯白噪声^[8]。2013年，电子科技大学研发了120 MHz频率可调噪声发生器，噪声由模拟电路产生，随后利用直接数字式频率合成(Direct Digital Synthesis, DDS)技术对频率进行调节，频率间隔为1 MHz^[9]。2014年，香港理工大学利用现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)技术产生了800 MHz的高斯白噪声，并实现了通信系统 10^{-15} 误码率的检测^[10]。

近年来，基于数字和模拟电路的噪声源频率逐渐达到了GHz频段。2015年，乌克兰国家科学院放射物理与电子学研究所利用FPGA技术实现了任意波形噪声的发生，首次将频率提高到4 GHz^[11]。2019年美国英特尔公司利用数字电路技术研制了2.5 GHz带宽、1.25 MHz分辨力的高斯噪声源，图1为噪声信号的处理链路图^[12]。

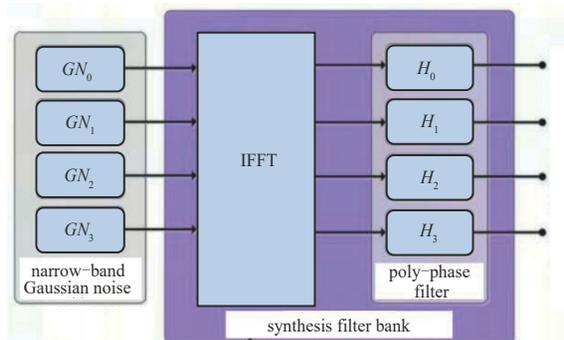


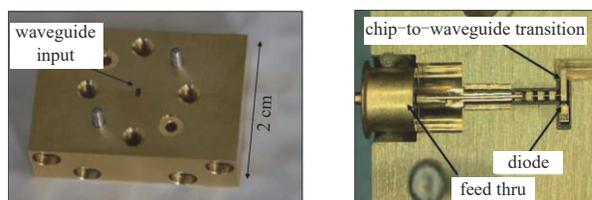
Fig.1 2.5 GHz noise signal processing chain of Intel Corporation in USA

图1 美国英特尔公司2.5 GHz噪声源信号处理链路

2 基于固态二极管的噪声源

在微波毫米波频段，因固态二极管结电容较小，当外加电压反向偏置到雪崩击穿时，可用作噪声源。固态二极管中的噪声电流主要来源于自由载流子与半导体介质中新的自由载流子碰撞产生的电离。目前，在微波毫米波频段，以固态二极管为核心的噪声源因体积小、成本低等特点获得了较多的应用。但进入太赫兹频段后，由于固态二极管截止频率的制约，基于固态二极管的噪声源的超噪比急剧下降，导致在太赫兹频段的发展进入瓶颈^[13-17]。目前国内外针对固态二极管噪声源都进行了较多的研究，国内这类噪声源的频率主要集中在100 GHz以内，国外已经报道的固态二极管噪声源频率最高为330 GHz，但产生的功率较小。

2015年，美国国家航空航天局成功研制出160~210 GHz固态二极管噪声源，超噪比仅为9.6 dB。该噪声源利用了砷化镓肖特基二极管技术，噪声源实物图和内部结构如图2所示^[13]。



(a) actual picture

(b) internal components of noise source

Fig.2 160~210 GHz noise source of NASA

图2 美国国家航空航天局160~210 GHz噪声源

电子科技大学(University of Electronic Science and Technology of China, UESTC)和中国航空工业集团分别基于雪崩二极管研发了一系列噪声源。2017年，UESTC利用雪崩二极管研制出K波段22~32 GHz宽带噪声源，超噪

比(Excess Noise Ratio, ENR)大于 20 dB, 平坦度小于 ± 2 dB^[14]。2018年, 中国航空工业集团利用雪崩二极管研制出 8~12 GHz X 波段平面集成噪声源, 实现了 28 dB 的 ENR, 并用于雷达接收机噪声系数的测量^[15]。2020年, UESTC 同样利用雪崩二极管技术研制出 W 波段噪声源, 在 88~96 GHz 频段范围内, ENR 高于 10 dB, 平坦度为 ± 1.8 dB^[16]。

近几年, 固态二极管噪声源的频率不断提高, 但功率仍然偏小。2020年, 法国国家科学研究中心电子微电子与纳米技术实验室利用肖特基二极管技术, 并基于 55 nm 锗硅半导体工艺, 研制出 260 GHz 噪声源, ENR 为 14 dB 左右^[17]。2022年, 美国弗吉尼亚半导体公司(Virginia Diodes, Inc., VDI)开发出工作频率 220~330 GHz 的噪声源, ENR 在全频段仅 11 dB 左右, 图 3 为该噪声源实物图和 ENR 实测曲线, 该产品的频率是当前已知固态二极管噪声源产品中最高的^[18]。

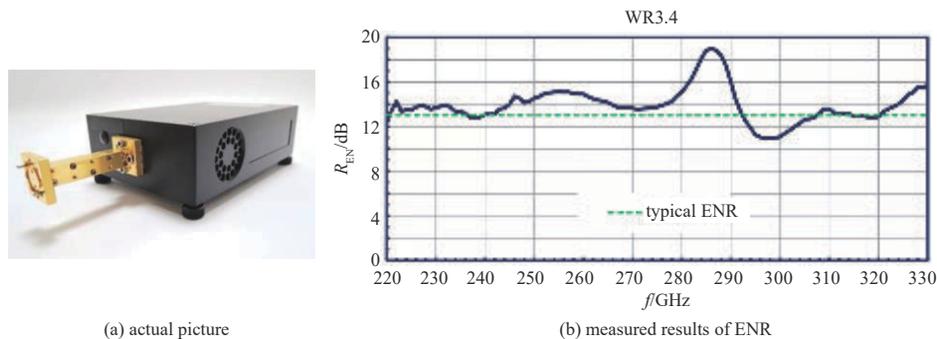


Fig.3 220~330 GHz noise source of VDI in USA

图3 美国 VDI 公司 220~330 GHz 噪声源

目前国内中电科思仪科技股份有限公司(电科思仪)已成功开发出基于固态二极管的系列噪声源产品, 产品实物如图 4(a)所示, 频率覆盖 10 MHz~50 GHz, ENR 可达到 19 dB, 具有带宽较宽、输出端口驻波比小等优点。图 4(b)为 ENR 实测曲线。配合电科思仪研制的噪声系数分析仪^[19], 可为噪声系数测量提供整体解决方案。

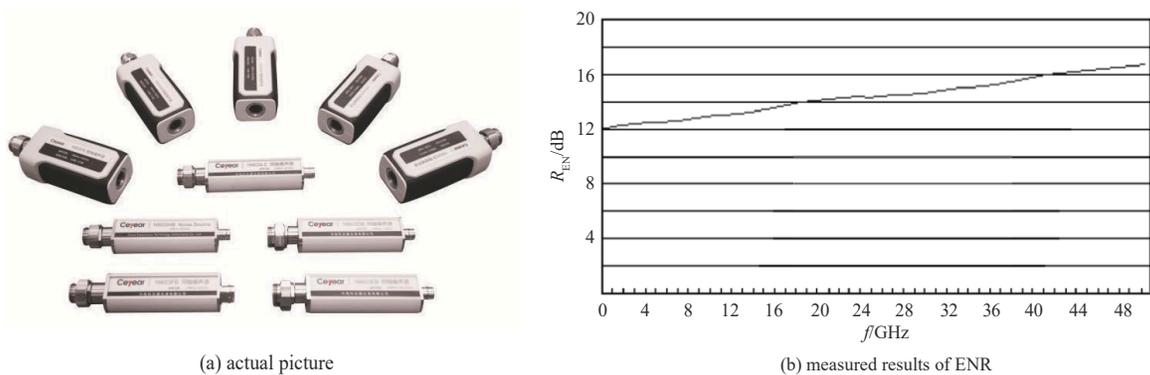


Fig.4 10 MHz~50 GHz noise sources developed by Ceyear Technologies Co., Ltd

图4 电科思仪研制的 10 MHz~50 GHz 系列噪声源

3 基于场效应管的冷噪声源

有源微波冷噪声源是 20 世纪 80 年代发展起来的一类噪声源, 能够在普通室温条件下产生低于室温的等效噪声温度。目前主要用于气象探测、射电天文、海洋监测等领域, 可在低温段对接收机进行精确定标, 以及作为三端环形器的冷终端减少天线等器件的失配, 可实现低亮温目标的高精确度定量观测^[20]。冷噪声源主要利用场效应管技术。场效应管输入阻抗表现为一个较大的电容器加上一个极小的电阻, 当源极加入适当的电感反馈时, 栅极处可获得一个无噪电阻, 此时产生的等效噪声温度的值将比常温低很多, 因此基于场效应管的这一特性开发出有源冷噪声源^[21]。

国内在这一领域起步较晚, 关于这一类噪声源的文献报道相对较少, 目前主要针对微波辐射计的定标成功开发了几款冷噪声源。国外研究机构在这一领域的技术研究较为成熟, 2012年, 德国弗劳恩霍夫应用固体物理研究所(Fraunhofer Institute for Applied Solid-State Physics, IAF)借助变组分高电子迁移率晶体管已成功研制出 75~110 GHz 冷噪声源, 可实现 220 K 的噪声温度输出, 图 5 为冷噪声源的芯片图和模块实物图^[22]。2013年, 美国科

罗拉多大学博尔德分校利用单片微波集成电路技术开发出 1.3~1.5 GHz 有源冷噪声源，噪声温度低于 90 K，回波损耗大于 28 dB^[23]。2015 年，芬兰国家技术研究中心同样利用单片微波集成电路技术完成了 89 GHz 有源冷噪声源的研发，噪声温度为 170 K^[24]。

近几年，中科院国家空间科学中心和中国计量科学研究院等也成功研制出低频冷噪声源。2018 年，中科院国家空间科学中心开发了 4~8 GHz 微波冷噪声源，在 27 °C 的环境温度下，能够产生最低 137.8 K 的等效噪声温度，噪声源的电路图和实物图如图 6 所示^[25]。2019 年，中国计量科学研究院借助低噪声放大器技术，完成了频率 4~8 GHz、最低噪声温度约 100 K 冷噪声源的研发^[26]。

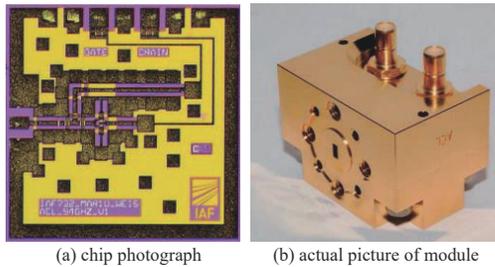


Fig.5 75~110 GHz cold noise source developed by IAF in Germany
图 5 德国弗劳恩霍夫研究所 75~110 GHz 冷噪声源

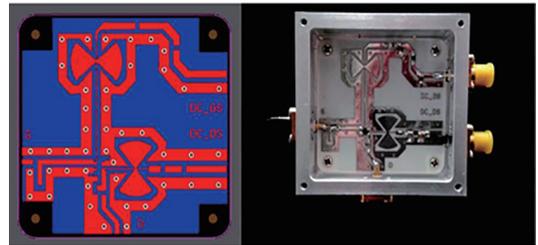


Fig.6 4~8 GHz cold noise source developed by NSSC
图 6 中科院国家空间科学中心 4~8 GHz 冷噪声源

4 基于黑体辐射和热电阻的噪声源

绝对黑体是指能够吸收全部外来电磁辐射，并不会有任何反射和透射的理想物体，简称黑体。黑体同时可以发射电磁波，发射的电磁波频率和能量遵循普朗克定律^[27]：

$$u_{\nu}(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \times \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1)$$

式中： u 为单位频率单位体积内的能量； ν 为频率； T 为热力学温度； h 为普朗克常数； c 为光速， k 为玻兹曼常数。

利用黑体的辐射特性，研究人员开发出基于黑体的噪声源。基于热电阻的噪声源与黑体噪声源的原理相似，热力学温度 T 下的一个电阻 R ，电阻中的电子处在随机运动的状态，这些随机运动会产生热噪声，并且其等效噪声温度是确定的。

基于黑体辐射和热电阻的噪声源精确度较高，能实现较高太赫兹频段的噪声输出，因此常被用作标准源对相关仪器进行定标^[28]。但存在的缺陷也相对明显，体积较大，质量偏重，同时噪声功率偏低，并且较难将噪声信号直接耦合进波导中，操作过程复杂。特别是需要利用液氮制冷的热电阻噪声源，在机载、星载等环境中使用成本偏高，在实际应用中受到一定的限制。目前国外报道的黑体噪声源频率最高可达 950 GHz，且频段覆盖较为全面，常用于计量标准的实验。近些年国内在这一领域也取得了许多进展，已研制出 G 波段热电阻变温噪声源，并进行了实际的测试验证。

黑体噪声源较多用于航天领域，2006 年，美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)戈达德太空飞行中心利用不锈钢粉末、铝粉和环氧树脂混合作为吸波材料，研发出可以为绝对辐射计进行定标的黑体辐射源，工作频率 3~90 GHz，实物如图 7 所示^[29]。2009 年，中国航天科工 203 所完成了 10~90 GHz 变温黑体噪声源的研制，输出亮温的温度范围为 85~340 K^[30]。2013 年，瑞士伯尔尼大学为欧洲航天局极地气象卫星研制了用来定标的黑体辐射源，频率 18~300 GHz，在 20~100 GHz，其 S_{11} 值小于 -40 dB^[31]。

英国 Thomas Keating 等公司近年来进一步提高了黑体和热电阻噪声源的频率，其生产的 84~950 GHz 高温和常温黑体如图 8 所示，高温黑体的工作温度为 90 °C^[32]。美国 Noisecom 公司利用热电阻技术，研制出噪声频率为 260~400 GHz，等效噪声温度为 73.9 K 的标准噪声源，温度准确度为 +1.53 K/-2.27 K，实物如图 9 所示^[33]。美国 Maury 公司同样利用热电阻技术生产了高低温噪声源，工作频率为 75~110 GHz，高低温源的等效噪声温度分别为 77.36 K 和 373.10 K^[34]。

UESTC 在热电阻噪声源方面也取得了较多进展，2018 年成功研制出 3 mm 波段的变温噪声源，工作频段 90~100 GHz，变温范围 70~300 K，图 10 为实验装置图^[35]。2022 年，UESTC 利用热电阻原理研制了 195~205 GHz 变温噪声源，变温范围 20~260 K^[36]。



Fig.7 3~90 GHz blackbody radiation source of NASA
图7 美国国家航空航天局3~90 GHz黑体辐射源

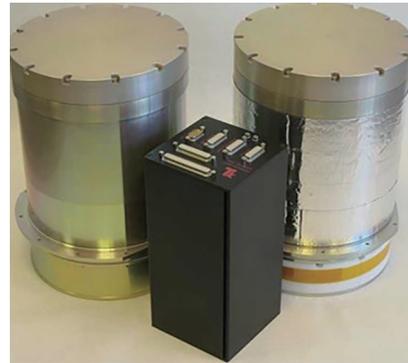


Fig.8 Hot and ambient blackbody noise sources produced by Thomas Keating Limited in UK
图8 英国Thomas Keating公司的高温 and 常温黑体噪声源



Fig.9 NBS-400 primary noise standard produced by Noisecom in USA
图9 美国Noisecom公司NBS-400标准噪声源

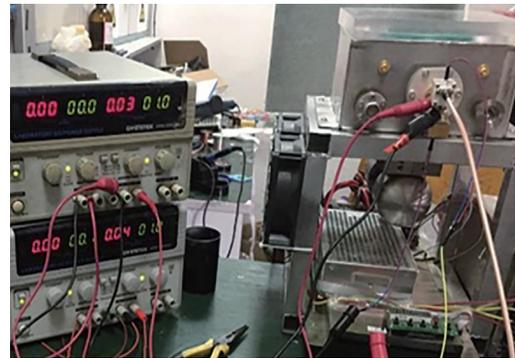


Fig.10 Variable temperature noise source of 3 mm wave band of UESTC
图10 电子科技大学3 mm变温噪声源系统

5 基于光电融合的噪声源

随着光电二极管技术的不断发展，光生电噪声的频率已逐渐进入太赫兹频段，基于光电融合的噪声源也发展成为一类新型的噪声源。基于光电融合的噪声源主要利用混频方式产生噪声信号，与传统的电子学和黑体噪声源相比，它可以实现高超噪比和宽带的噪声输出，特别是在太赫兹频段显示出一定优势。目前这一领域仍处在起步发展阶段，国内外研究机构和企业关于这一类噪声源的研究报道都相对较少。

2014年，日本电报电话(Nippon Telegraph & Telephone, NTT)公司利用光电转换器件对自激发辐射噪声信号进行处理，在280~340 GHz实现了18 dB左右超噪比的输出，其原理如图11所示^[37]。2020年，法国里尔大学同样利用光电融合的方法产生了280~320 GHz太赫兹噪声，并实现了近30 dB的超噪比输出，实测结果见图12^[38]。

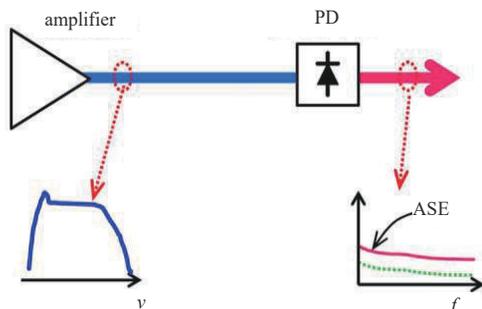


Fig.11 Conceptual diagram of the photonic noise generation technique of NTT in Japan
图11 日本NTT公司光生太赫兹噪声原理图

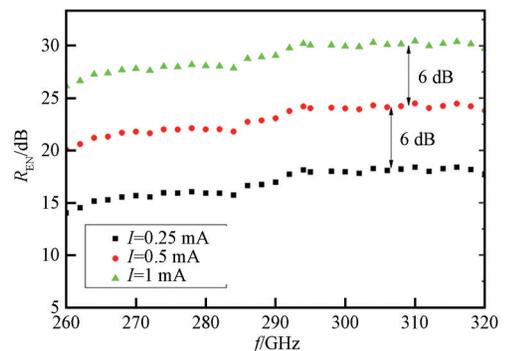


Fig.12 Measured ENR results of 280~320 GHz noise source of Lille University in France
图12 法国里尔大学280~320 GHz超噪比实测图

本文中涉及的噪声源如表 1 所示，包含了噪声源的类型、研制单位、国家、工作频率、超噪比或噪声温度、噪声信号输出方式、时间和参考文献等信息，方便进行对比分析。

表 1 微波毫米波与太赫兹噪声源汇总表

Table 1 Summary of microwave, millimeter wave and terahertz noise sources

| No. | type | producer | nationality | frequency | ENR/noise temperature | waveguide output or not | year | reference |
|-----|---|--|-------------|---------------|-----------------------------------|-------------------------|------|-----------|
| 1 | | Tsinghua University | China | — | — | no | 2012 | [8] |
| 2 | | UESTC | China | 120 MHz | — | no | 2013 | [9] |
| 3 | digital and analog circuit noise sources | Hong Kong Polytechnic University | China | 800 MHz | — | no | 2014 | [10] |
| 4 | | Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, NAS of Ukraine | Ukraine | 4 GHz | — | no | 2015 | [11] |
| 5 | | Intel Corporation | USA | 2.5 GHz | — | no | 2019 | [12] |
| 6 | | NASA | USA | 160~210 GHz | ENR:9.6 dB | yes | 2015 | [13] |
| 7 | | UESTC | China | 22~32 GHz | ENR:20 dB | yes | 2017 | [14] |
| 8 | semiconductor diode noise source | Aviation Industry Corporation of China | China | 8~12 GHz | ENR:28 dB | yes | 2018 | [15] |
| 9 | | UESTC | China | 88~96 GHz | ENR:10 dB | yes | 2020 | [16] |
| 10 | | CNRS | France | 260 GHz | ENR:14 dB | yes | 2020 | [17] |
| 11 | | Virginia Diodes, Inc. | USA | 220~330 GHz | ENR:11 dB | yes | 2022 | [18] |
| 12 | | Ceyear Technologies Co., Ltd. | China | 10 MHz~50 GHz | ENR:19 dB | yes | — | [19] |
| 13 | | IAF | Germany | 75~110 GHz | noise temperature:220 K | yes | 2012 | [22] |
| 14 | | University of Colorado, Boulder | USA | 1.3~1.5 GHz | noise temperature:<90 K | yes | 2013 | [23] |
| 15 | field effect transistor noise source | VTT Technical Research Centre of Finland | Finland | 89 GHz | noise temperature:170 K | yes | 2015 | [24] |
| 16 | | National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences | China | 4~8 GHz | noise temperature:137.8 K | yes | 2018 | [25] |
| 17 | | National Institute of Metrology | China | 4~8 GHz | noise temperature:100 K | yes | 2019 | [26] |
| 18 | | NASA | USA | 3~90 GHz | noise temperature:2.7 K | no | 2006 | [27] |
| 19 | | Second Academy 203th Institute of China Aerospace Science & Industry Corp. | China | 10~90 GHz | noise temperature:85~340 K | no | 2009 | [30] |
| 20 | | University of Bern | Switzerland | 18~300 GHz | noise temperature:80 K | no | 2013 | [31] |
| 21 | | Thomas Keating Limited | UK | 84~950 GHz | noise temperature:363 K | no | — | [32] |
| 22 | black body and heater circuit noise sources | Noisecom | USA | 260~400 GHz | noise temperature:73.9 K | no | — | [33] |
| 23 | | Maury Microwave | USA | 75~110 GHz | noise temperature:77.36 K/373.1 K | no | — | [34] |
| 24 | | UESTC | China | 90~100 GHz | noise temperature:70~300 K | no | 2018 | [35] |
| 25 | | UESTC | China | 195~205 GHz | noise temperature:70~301 K | no | 2022 | [36] |
| 26 | photoelectric fusion noise source | NTT Corporation | Japan | 280~340 GHz | ENR:18 dB | yes | 2014 | [37] |
| 27 | | University of Lille | France | 280~320 GHz | ENR:30 dB | yes | 2020 | [38] |

6 应用前景和发展趋势分析

微波毫米波与太赫兹噪声源是噪声系数测试系统的核心装置，噪声系数测试目前也是噪声源的主要应用领域。此外，噪声源在电子干扰和成像等领域也有着非常关键的应用，因而噪声源在与基础科学研究和生产生活相关的许多领域都有着重要价值，具体的应用领域有：

1) 噪声系数测试：目前噪声系数测试是噪声源最重要的应用领域，由于噪声广泛存在，且对器件性能危害很大，因此噪声系数是决定器件性能的关键技术指标。围绕着芯片、部件和系统噪声系数的测量，使得噪声源广泛用于微波毫米波与太赫兹相关的领域。

2) 电子干扰：噪声可对信号接收机进行遮盖性干扰，降低接收机信噪比，使信噪比超过检测门限，遮盖甚至完全淹没有用信号，使接收机对目标信号识别困难，因此噪声源在电子干扰等关键领域有着重要应用。

3) 微波毫米波与太赫兹成像：近年来发现，噪声在成像方面也有着十分广阔的应用空间，由于噪声具有相干性差、频谱范围宽的特点，可以消除图像中因干涉而引起的不均匀性，同时丰富的频率分量使图像可以携带更多信息，这使得噪声源在成像方面具有显著的应用优势。

当前微波毫米波与太赫兹噪声源总体在向着更高频率、更高超噪比、更宽带宽的方向发展。在微波毫米波低频段，噪声源的种类较多且研究深入，特别是基于固态二极管的噪声源技术已比较成熟。但进入太赫兹频段后，固态二极管噪声源由于截止频率的限制，其发展进入了瓶颈期，而黑体、热噪声噪声源虽然频率较高，但由于输出功率和输出信号方式等因素的限制，这一类噪声源的发展也受到了影响，因此都有待进一步研究。基于光电融合的噪声源作为新出现的一类噪声源，近年来在太赫兹频段获得了一定关注。总之，目前在微波毫米

波低频段, 噪声源的技术相对较成熟, 而在太赫兹频段总体尚处在研究阶段。

7 结语

本文对微波毫米波与太赫兹噪声源的技术特点和发展现状进行了总结, 噪声系数的高精确度测试测量仍是当前微波毫米波与太赫兹领域重要的技术瓶颈, 而噪声源是测试测量系统的核心组成部分。现有的噪声源可分为: 基于数字和模拟电路的噪声源、基于固态二极管的噪声源、基于场效应管的噪声源、基于黑体和热电阻的噪声源、基于光电融合的噪声源共五类源。目前基于数字和模拟电路的噪声源、基于场效应管的噪声源、基于固态二极管的噪声源主要用于微波毫米波低频段, 在太赫兹频段基于光电融合的噪声源正处于发展阶段, 而传统的基于黑体和热电阻的噪声源、基于固态二极管的噪声源的发展都受到了限制, 仍需要更加深入的研究。

参考文献:

- [1] DAS S. Microwave engineering[M]. New York:Oxford University Press, 2015.
- [2] RADATZ J. The IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms[M]. New York:IEEE Standards Office, 1997.
- [3] 宋青娥,董建涛. 微波噪声源定标方法及不确定度的分析[J]. 国外电子测量技术, 2008,27(5):52-54. (SONG Qing'e,DONG Jiantao. Analysis of the measurement method and the measurement uncertainty for microwave noise source[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2008,27(5):52-54.) doi:10.3969/j.issn.1002-8978.2008.05.018.
- [4] 姜万顺,邓建钦. 太赫兹测试测量技术与仪器研究进展[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(5):20-23. (JIANG Wanshun,DENG Jianqin. Research progress of terahertz measurement technology and instruments[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014,33(5):20-23.) doi:10.3969/j.issn.1002-8978.2014.05.006.
- [5] 邓建钦,姜万顺,刘金现. 太赫兹信号发生与接收技术[J]. 微波学报, 2015,31(S1):43-47. (DENG Jianqin,JIANG Wanshun, LIU Jinxian. The technology of terahertz signal generating and receiving[J]. Journal of Microwaves, 2015,31(S1):43-47.) doi: CNKI:SUN:WXB.0.2015-S1-013.
- [6] 年夫顺. 现代测量技术发展及面临的挑战[J]. 测控技术, 2019,38(2):3-7. (NIAN Fushun. Development and challenge of current measurement technology[J]. Measurement & Control Technology, 2019,38(2):3-7.) doi:10.19708/j.ckjs.2019.02.002.
- [7] LIU Bodong, SHENG Ying, XIE Fei, et al. The design and implement of broad band white noise signal generator based on AD9957[C]// 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology(ICEICT). Harbin, China:IEEE, 2016:325-328. doi:10.1109/ICEICT.2016.7879709.
- [8] XU Ziya, CHEN Jingshu, XU Lu, et al. A parallel digital hardware generator of white Gaussian noise stressing on crest factor[C]// 2012 the 18th Asia-Pacific Conference on Communications(APCC). Jeju, Korea(South): IEEE, 2012: 456-461. doi: 10.1109/APCC.2012.6388180.
- [9] ZHAN Huiqin, LI Shuo, PENG Yunwu. FM noise generator based on hybrid method[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013,46(20): 608-613. doi:10.3182/20130902-3-CN-3020.00159.
- [10] LU Qing, FAN Jianfeng, SHAM C W, et al. A high throughput Gaussian noise generator[C]// 2014 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems(APCCAS). Ishigaki, Japan:IEEE, 2014:117-120. doi:10.1109/APCCAS.2014.7032733.
- [11] LUKIN S, ZEMLYANIY O, LUKIN K. FPGA based random waveform generators for noise radars[C]// 2015 The 16th International Radar Symposium(IRS). Dresden, Germany:IEEE, 2015:777-782. doi:10.1109/IRS.2015.7226402.
- [12] PRITSKER D, CHEUNG C, NEOH H S, et al. Wideband programmable Gaussian noise generator on FPGA[C]// 2019 IEEE National Aerospace and Electronics Conference(NAECON). Dayton, OH, USA IEEE, 2019: 412-415. doi: 10.1109/NAECON46414.2019.9058065.
- [13] EHSAN N, PIEPMEIER J, SOLLY M, et al. A robust waveguide millimeter-wave noise source[C]// 2015 European Microwave Conference(EuMC). Paris, France:IEEE, 2015:853-856. doi:10.1109/EuMC.2015.7345898.
- [14] 杨航. K波段宽带噪声源研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017. (YANG Hang. Research on K-band broadband noise source[D]. Chengdu, China:University of Electronic Science and Technology of China, 2017.) doi:CDMD-10614-1017200051.
- [15] 赵晖,刘锋,李庆. 用于雷达接收机检测的平面固态噪声源[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):672-675. (ZHAO Hui, LIU Feng, LI Qing. Planar solid-state noise source for radar receiver test[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):672-675.) doi:10.11805/TKYDA201804.0672.
- [16] CHEN Peng, SUN Chao, YANG Kai. Miniaturized sixteenth-mode substrate integrated waveguide bandpass filter with slot line array[C]// 2020 IEEE the 20th International Conference on Communication Technology(ICCT). Nanning, China: IEEE, 2020: 1049-1053. doi:10.1109/ICCT50939.2020.9295763.

- [17] 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. doi:10.1109/TMTT.2020.2980513.
- [18] Virginia Diodes Inc. Type:WR-3.4N[EB/OL]. [2023-05]. <https://www.vadiodes.com/en/products/noise-sources>.
- [19] Ceyear Technologies Co., Ltd. Type:16603/16604[EB/OL]. [2023-05]. https://www.ceyear.com/noise_figure_analyser-28.
- [20] 王振占,董帅,殷晓斌,等. 有源微波冷噪声源的原理及其应用分析[J]. 遥感技术与应用, 2017,32(2):247–254. (WANG Zhenzhan, DONG Shuai, YIN Xiaobin, et al. Analysis of active microwave cold noise source: principles and applications[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017,32(2):247–254.) doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.2.0247.
- [21] 董帅. L/C波段微波辐射计定标及有源微波冷噪声源研究[D]. 北京:中国科学院国家空间科学中心, 2016. (DONG Shuai. Study on L/C-band microwave radiometer calibration and active cold noise source[D]. Beijing, China: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2016.) doi:CDMD-80073-1016209191.
- [22] WEISSBRODT E, TESSMANN A, SCHLECHTWEIG M, et al. Active load modules for W-band radiometer calibration[C]// 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany: IEEE, 2012:2945–2948.
- [23] SCHEELER R, POPOVIC Z. A 1.4 GHz MMIC active cold noise source[C]// 2013 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). Monterey, CA, USA: IEEE, 2013:1–4. doi:10.1109/CSICS.2013.6659183.
- [24] KANTANEN M, WEISSBRODT E, VARIS J, et al. Active cold load MMICs for Ka-, V-, and W-bands[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2015,9(8):742–747. doi:10.1049/iet-map.2014.0243.
- [25] 董帅,王振占,李彬,等. C波段有源微波冷噪声源设计及其性能分析[J]. 电子学报, 2018,46(11):2797–2802. (DONG Shuai, WANG Zhenzhan, LI Bin, et al. Design and characterization of C-band active cold noise source[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(11):2797–2802.) doi:10.3969/j.issn.0372-2112.2018.11.030.
- [26] LIANG Weijun, CHEN He, XU Hao. An active cold and hot noise generator[C]// 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT). Guangzhou, China: IEEE, 2019:1–3. doi:10.1109/ICMMT45702.2019.8992168.
- [27] 谢静. 大口径太赫兹高温黑体定标源的研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015. (XIE Jing. Research on large aperture and high temperature blackbody calibrator in terahertz waveband[D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.)
- [28] 吴斌,年夫顺,王洪超,等. 太赫兹计量技术研究进展[J]. 微波学报, 2015,31(S1):1–5. (WU Bin, NIAN Fushun, WANG Hongchao, et al. Research progress in terahertz metrology[J]. Journal of Microwaves, 2015,31(S1):1–5.)
- [29] FIXSEN D J, WOLLACK E J, KOGUT A, et al. Compact radiometric microwave calibrator[J]. Review of Scientific Instruments, 2006,77(6):064905. doi:10.1063/1.2209960.
- [30] 程春悦,翟宏,陈晋龙,等. 10~90 GHz宽口径变温噪声源[C]// 2009年全国微波毫米波会议论文集. 西安:电子工业出版社, 2009:813–816. (CHENG Chunyue, ZHAI Hong, CHEN Jinlong, et al. The wide aperture temperature adjusted noise source in 10~90 GHz[C]// Proceedings of the 2009 National Microwave and Millimeter Wave Conference. Xi'an, China: Publishing House of Electronics Industry, 2009:813–816.)
- [31] MURK A, REVELES J R, WYLDE R, et al. Low mass calibration target for mm-wave remote sensing instruments[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013,61(4):1547–1556. doi:10.1109/TAP.2013.2242828.
- [32] Thomas Keating Ltd. Type:ALMA bands 1-10/ ALMA bands 3-10[EB/OL]. [2023-05]. <http://www.terahertz.co.uk/resources>.
- [33] Wireless Telecom Group Inc. Type: NBS-series[EB/OL]. [2023-05]. <https://noise.com/products/standards/nbs-series-cryogenic-primary-noise-standards>.
- [34] Maury Microwave Corporation. Type:MT7090J99[EB/OL]. [2023-05]. https://www.maurymw.com/Precision/Noise_Calibration_Systems_Accessories
- [35] 陈卓然. 三毫米波变温噪声源研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018. (CHEN Zhuoran. Research on variable temperature noise source of 3 mm band[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.) doi:CDMD-10614-1018991449.
- [36] 周刚. 太赫兹频段噪声源研制[D]. 成都:电子科技大学, 2022. (ZHOU Gang. The development of terahertz band noise source[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.) doi:CDMD-10614-1022545501.
- [37] SONG Hojin, YAITA M. On-wafer noise measurement at 300 GHz using UTC-PD as noise source[J]. The IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014,24(8):578–580. doi:10.1109/LMWC.2014.232476.