

用于高频电子器件校准的微波功率计量检测技术研究

谢成威*

(广东省云浮市质量计量监督检测所, 云浮 527300)

摘要: **目的** 探讨用于高频电子器件校准的微波功率计量检测技术。**方法** 对微波光链路的三阶无杂散动态范围进行了理论建模, 并分析了激光器输出功率、调制器的半波电压与偏置电压对动态范围大小的影响。**结果** 较大的激光器输出功率、调制器的低偏置工作电压与适中的半波电压是拓宽动态范围的有效方式。**结论** 通过对激光器输出功率、调制器的半波电压与偏置电压进行优化调控, 可显著提升微波光链路在高频电子器件校准应用中微波功率计量检测的准确性与可靠性, 为相关领域的高精度校准工作提供有力的技术支撑与保障。

关键词: 高频电子器件; 校准; 微波功率计量检测技术

0 引言

高能量微波(High-power microwave, HPM)泛指那些频率处于1~300 GHz范围内, 且峰值功率高于100 MW的一致性电磁波。针对多数高效能微波产生器, 普遍采取加速器(脉冲能量设备)来产生可达数百千伏至兆伏水平的超高电压, 利用爆炸发射的阴极产生从数百安培到数万安培的强大电流^[1]。因此, 能输出的峰值功率可高达数十兆瓦乃至吉瓦级别。用来生产此类高能微波的真空电子器件通常被称作相对论型电子器件或电子束器件。高能微波具备如下核心属性: 顶峰功率极高, 常规水平超过兆瓦, 有的更是超过数十吉瓦; 脉冲周期极短, 通常不过数十纳秒; 重复发射频率较低, 大部分高能微波装置仅实现单脉冲发射, 哪怕是能够进行连续脉冲发射的设备, 其频率也大都只在数十到数百赫兹范围内。在这样的高能微波背景下, 高频电子器件的校准显得尤为重要。因为高频电子器件的性能精度直接关系到高能微波系统的整体效能与稳定性, 若校准不准确, 可能导致微波的产生、传输与应用出现偏差甚至故障, 影响其在科研、军事及工业等多领域的应用效果^[2]。本文旨在深入探讨用于高频电子器件校准的微波功率计量检测技术, 通过对微波光链路的三阶无杂散动态范围进行理论建模, 并分析激光器输出功率、调制器的半波电压与偏置电压等关键因素对动态范围大小的影响, 从而为精确校准高频电子器件提供可靠的技术依据与方法, 保障高能微波系统的高效稳定运行, 推动高能微波技术在多领域的深入发展与应用拓展。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

功率计(N432A, 深圳市汇驰恒达科技有限公司)的偏置电阻可调整至100 Ω , 用于在8478B型功率传感器面对较大不匹配时执行测量作业, 以提升参考源反射系数估算的精度。

功率传感器(8478B, 常州市汇高电子有限公司)最大可测量功率范围-60~40 dBm。为提供安全裕量, 最大额定功率要稍高。

1.2 微波功率计量检测的基本原理

微波输出的功率, 即指在单位时间内传递的微波能量速度。它阐述了在同一时间长度内, 微波信号所传递的能量量值。在微波技术范畴, 通常采用微波功率这一指标来评估微波发射器的发射功率、传输系统的能效及微波设备对于微波能量管理的效能等^[3]。

例如, 假如某个微波产生装置的功率输出是100 W, 这意味着此装置每秒钟可以释放出100 J的能量。微波传输设备中, 信号发出端的功率水平对信号的覆盖范围和通信清晰度具有决定性作用, 功率的提高意味着信号可达距离的增加, 但亦可能导致较大的干扰现象和更高的能量消耗。

1.3 高频信号中的反射系数与匹配损耗测量

按照原理图1进行实际测量连接。

调整N432A型功率计的偏置电阻至100 Ω , 能够在8478B型功率传感器面对较大不匹配时执行测量作业, 进而提升参考源反射系数估算的精度。待功率传感器预热完毕, 遵循图1

* 通信作者: 谢成威, 副高级工程师, 研究方向为计量检测。E-mail: GDYFZJS@163.com

指示接通测量装置。初始阶段，采用规范的功率传感器对功率计基准源的输出功率进行直接测定。继而，更换长度分别为 1.5 m 与 0.75 m 的电缆，记录下基准源在相位偏移 90° 及 180° 时的输出功率情况。据此收集三个不同相位条件下基准源的输出功率数据，推算出功率计基准源反射系数的幅度。

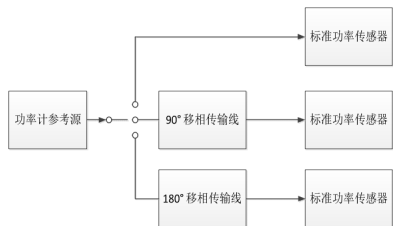


图 1 实验原理图

2 结果与分析

2.1 电缆损耗与功率值

具体的测定过程中，需要处理一项难题：专用电线的损耗问题。表 1 展现了移相器传输路径上的插损情况。通过调整输电线路的能量流失，能够得到移相后功率计基准源的实际输出能量。

表 1 50 MHz 时电缆损耗

电缆长度(m)	1.5	0.75
插入损耗(dB)	0.0285	0.0142

表 2 中列出了在各种相位偏移状态下记录的功率数据。

表 2 功率值

相移角度	读数
0°	0.8881
180°	0.8578
90°	0.8817

通过实际测量所采用的标准功率传感器的反射系数，并将得到的数据代入相应的数学公式中，计算出得到的参考源反射系数结果是 $\Gamma_G=0.31$ 。

2.2 微波功率校准中的动态范围与线性度分析

研究在微波光链路中，初始光功率 P_0 、直流偏压 V_b 以及半波电压 V_π 是如何影响无杂散信号的动态范围 SFDR₃。

2.2.1 输入光功率对 SFDR₃ 的影响

遵循商业组件的实际性能参数，将调制损耗系数设定为 0.8，半峰电压调整至 4 V，并假定激光器的相对强度噪声 RIN 为 10^{-16} ；同时，设直流偏压分别为 $1 V_b$ 等于 1 V、 $2 V_b$ 等于 2 V、 $3 V_b$ 等于 3 V。关于 P_0 ，选择了从 0~1 W 的变化区间，其对无失真动态范围 SFDR₃ 的影响展示在图 2 中。如图 2 所示，激光器在经受不同偏压作用时，输出功率提升导致其动态范围相应扩大，并逐渐进入饱和状态。当偏置电压为 $2 V_b$ 等于 2 V 时，可以看到动态范围饱和的迹象比其他偏置电压出现得更早，这表明偏置点越接近于正交工作点，动态范围就会随光功率提升而更快地达到饱和状态。

设定直流工作参考点为 2 V，即正交操作位置，调节调制

器的半波电压至不同数值，具体为 $1 V_\pi$ 值设为 2.7 V、 $2 V_\pi$ 值设为 4 V 以及 $3 V_\pi$ 值设为 8 V，其对输入光功率对无杂散动态区间 SFDR₃ 的影响如图 3 所示。观察图 3 可以明显发现，总体趋势显示出，调制器的半波电压在影响动态范围方面与偏置电压的作用是相同的。当 $1 V_\pi=2.7$ V 时，微波光传输链路能达到最大的动态范围，原因在于调制装置处于较低的偏置状态，从而确保了链路噪声的最小化。当光电调制器的半波电压为 $2 V_\pi=4$ V 时，随光能量提升，动态范围将首先达到饱和状态，原因在于此时的调制器正处在其正交工作点上。

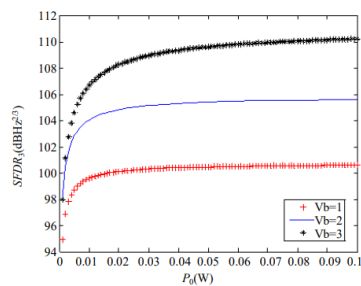


图 2 不同直流偏置电压下 P_0 对 SFDR₃ 的影响

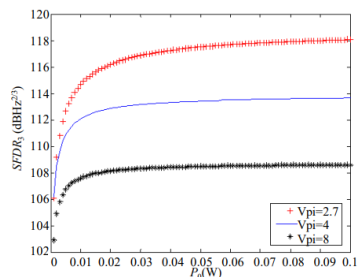


图 3 不同半波电压下 P_0 对 SFDR₃ 的影响

2.2.2 直流偏置电压对 SFDR₃ 的影响

正如前文提及，参考实用电子元件的规格参数，将调制器的衰减常数 α 定为 0.8，设定半波电压为 2.5 V，激光器的相对强度噪声 RIN 取值为 10^{-16} ，初始输入功率 P_0 设定三个层级，即 01P=0.0001 W、02P=0.001 W 及 03P=0.1 W。此外，将 V_b 的选取区间设为 5~7.5 V，以此来考察直流偏置电压在该范围内对 SFDR₃ 的具体影响，详见图 4 所示。

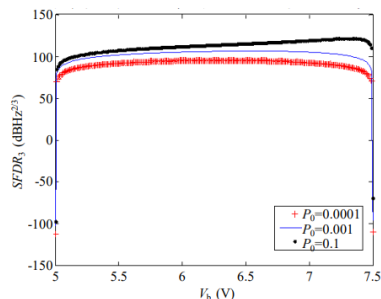


图 4 不同光功率下 V_b 对 SFDR₃ 的影响

从图 4 中可以明显观察到，总的来看，激光发射功率的增强带来了更广阔的动态范围；而当偏置电压增长时，SFDR₃ 的

数值表现为一个先上升后下降的变化过程。照此，当半波电压各自设定为 $1 V_{\pi}$ 等于 2.5 V、 $2 V_{\pi}$ 等于 5 V 及 $3 V_{\pi}$ 等于 7.5 V 时，偏置电压 V_b 的选择区间为 5~7.5 V，而在 P_0 定为 0.01 W 的条件下，其对第三次谐波失真比 (SFDR₃) 的影响便如图 5 所示。

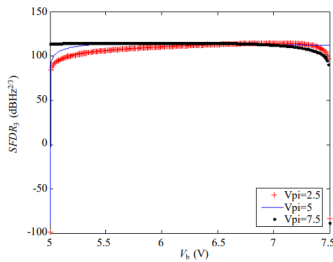


图 5 不同半波电压下 V_b 对 SFDR₃ 的影响

根据图 5 所示，唯独在 $1 V_{\pi}$ 等于 2.5 V 的情况下，动态范围显示出初步上升随后下降的走向，其原因是 V_b 的选定范围为 5~7.5 V 时足以涵盖半个波峰电压的周期。

2.2.3 半波电压对 SFDR₃ 的影响

正如前文所提，依据商业设备的实际性能指标，将调制器的衰减常数 α 设定为 0.8，选取激光器的相对强度噪声 RIN 为 10^{-16} ，并且设定输入功率 P_0 的三组数值分别为 01P 等于 0.0001 W、02P 为 0.001 W 以及 03P 为 0.1 W；在 V_b 为 2 V 的条件下 V_{π} 的选择范围为 2.1~8 V，其对 SFDR₃ 的影响见图 6。从整体上分析，动态范围随着半波电压呈现先上升后下降的变化趋势；高光功率对应更广的动态范围，这与之前的讨论一致。

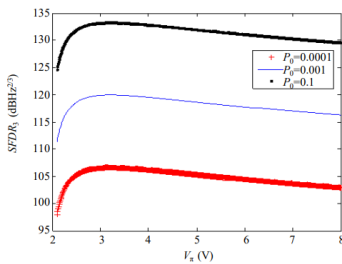


图 6 不同光功率下 V_{π} 对 SFDR₃ 的影响

3 讨论与结论

伴随着高频电子技术稳步而疾速的进步，基于技术的电子设备越来越多地深入各个行业，并且对整体系统的稳定性和性能发展产生了决定性的影响。正因如此，精确的调校工作变得极其关键，成为必不可少的一环。

本项研究深化了对微波动力度量衡技术的认识，该技术主要用于对高频电子设备进行精准调校^[4]。建立了微波光链路三阶互调无杂散动态范围的理论模型后，本研究全面考察了激光器发射功率、偏置电压及调制器半波电压对动态范围的影响程度。调查发现，这三种要素之间存在联系，并且它们共同影响着动态区间^[5]。

考虑到激光设备的发射功率，输出功率较大有益于提升动

态区间的广度，然而这种帮助并不是没有界限，在不同的偏置电压条件下，其效用会有所不同^[6]。例如，当特定的偏压应用时，输出功率的增强可能导致动态范围迅速进入饱和状态。在调制器半波电压调整方面，恰当的半波电压水平是拓宽动态范围的核心，无论是偏高还是偏低均会对动态范围造成负面效应。例如，保持半波电压在一个较低的偏置水平有助于将链路噪声降至最低，进而扩大动态范围。反之，动态范围受到偏置电压的影响先是增加后降低，与半波电压等变量息息相关，因此适宜的偏置电压区间需经全面评估方能确定^[7]。

增强激光发射器的功率输出，减小调制设备的偏置电压，并适当控制半波电压，是拓宽动态范围的有效方法。该研究成果为高频电子设备的精准调校奠定了关键的技术基础，促进了微波功率测量技术准确度和稳定性的显著提升^[8]。在具体应用场景里，基于这些科研成果，可以为各类高频电子设备和系统量身定制，对各项关键参数实行细致优化，确保强能微波系统的持续高效稳定作业，促进高频电子学科在科学研究、军事防御、产业制造等多个行业的进一步拓展和普遍使用^[9]。此外，该研究成果还构建了后续改进微波功率测量技巧的平台，为未来的研究者提供了一个立足点，使他们可以在此基础上进一步分析不同的干扰元素，或者对当前参数设置进行更精细的调整，满足高速发展的高频电子领域的技术要求^[10]。

参考文献

- [1] 王伟,任少华,曾爽,等.基于ASAAC标准的超宽带微波功率模块研究[J].真空电子技术,2023,(01):50-55.
- [2] 龚志伟.毫米波及太赫兹频段功率合成关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2023.
- [3] 李建兵,邱立,王斌,等.T/R双模微波功率模块技术及其应用[J].强激光与粒子束,2024,36(01):12-17.
- [4] 王伟,任少华,曾爽,等.基于ASAAC标准的超宽带微波功率模块研究[J].真空电子技术,2023,(01):50-55.
- [5] 刁康.功率器件测试中关键技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2022.
- [6] 彭松涛.全金属间隙波导技术及其在微波无源功率分配/合成网络中的应用研究[D].成都:电子科技大学,2023.
- [7] 赵毅红,李芳芳,王博锋,等.纳米氮化钛薄膜对高频陶瓷窗片二次电子发射率的影响研究[J].真空科学与技术学报,2023,43(11):960-966.
- [8] 张浚坤.高压直流大功率微波电源关键技术研究[D].长沙:湖南大学,2022.
- [9] 刘世锋,朱楠,潘时龙,等.一种基于功率监测和补偿的微波光子功率均衡器和微波光子功率均衡方法:CN202211582562.2[P].2024-12-01.
- [10] 李晓峰,王玉春,邹雯婧.微波真空电子器件的发展与应用[J].微波学报,2022,38(05):33-38.