

文章编号: 2095-4980(2023)07-0872-06

## 基于平板电路的无源互调耦合测试方法

张可越<sup>a,b</sup>, 陈雄<sup>a,b</sup>, 赵小龙<sup>a,b</sup>, 曹智<sup>a,b</sup>, 张松昌<sup>a,b</sup>, 周昊楠<sup>a,b</sup>, 贺永宁<sup>\*a,b</sup>

(西安交通大学 a. 电子与信息学部微电子学院; b. 西安市微纳电子与系统集成重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 无源互调(PIM)是一个吸引众多领域研究人员的课题, 包括卫星、天线和智能终端等。本文提出一个非接触式 PIM 测量的新思路: 使用一个经过近场重构的基片集成缝隙波导(SISW)作为互调信号的激励和接收路径, SISW 通过对载波信号的远场抑制和近场测试区的优化, 实现了一种针对没有射频端口的样品非线性特性的评估解决方案。该测试平台结合了近场天线的有限辐射特性和多敏度测试区在 PIM 评估中对收发系统和测试样片的适应性。实验结果表明, 该测试方法在稳定性和分辨力方面具有相当大的工程应用潜力。

**关键词:** 小型化测试板; 无源互调; 耦合测试; 非线性杂散

中图分类号: TN015

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022197

## Passive Intermodulation coupling test methods based on planar circuits

ZHANG Keyue<sup>a,b</sup>, CHEN Xiong<sup>a,b</sup>, ZHAO Xiaolong<sup>a,b</sup>, CAO Zhi<sup>a,b</sup>, ZHANG Songchang<sup>a,b</sup>,  
ZHOU Haonan<sup>a,b</sup>, HE Yongning<sup>\*a,b</sup>

(a.School of Microelectronics, Faculty of Electronic and Information Engineering; b.The Key Laboratory of Micro-Nano Electronics and System Integration of Xi'an City, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

**Abstract:** Passive Intermodulation(PIM) is a subject that attracts researchers in many fields, including base station antennas and satellites. In this work, a new setup for non-contact PIM measurement is proposed, which takes a Substrate-Integrated Slotted Waveguide(SISW) designed by field reconstruction as the excitation and reception path. The SISW with field reconstruction enables a solution for the evaluation of the non-linear characteristics of samples without RF ports through far-field suppression and near-field partitioning of the carrier signal. The proposed test platform combines the finite radiation characteristics of near-field antennas and the adaptability of the gradient test area to transceiver systems in the PIM evaluation. The experimental results suggest that the proposed test method presents considerable potential for application in terms of stability and resolution.

**Keywords:** compact test board; Passive Intermodulation; coupling test; nonlinear distortion

在无线通信系统中, 由于越来越多的语音和数据信息需要通过固定的带宽, 无源互调(PIM)成为限制系统容量的一个重要因素。如在有源设备中, 2个或更多的频率在非线性设备中混合在一起, 形成一个假信号(无源交调)。当杂散互调信号落在基站的接收频段内时, 接收器的灵敏度就会降低, 导致通话质量或系统的载波干扰率下降, 并降低通信系统的容量。触发无源互调的因素有很多, 包括机械接触不良、射频通道和射频传导表面的磁导体的污染等。虽然很难准确预测设备的无源互调水平, 但可以使用测量数据来评估设备中 PIM 的风险。

传统的 PIM 测试方案分为腔体测试和辐射测试。当测量有 2 个或更多端口的设备时, 空腔 PIM 测试的传输测量结果更具代表性。因为在这种情况下, 传输 PIM 通常反映了含有多个 PIM 源的器件的最差互调指标。辐射 PIM 测试方法的样本主要是天线或天线反射面。当载波功率送入天线并辐射至自由空间时, 必须在天线周围提供一个足够大的低 PIM 暗室环境。

辐射测试法作为电磁兼容领域内的典型测试方案, 工业领域的 PIM 测试可以通过以下 4 种方法来定位非线性危害。最简单的方法是试错法, 它是视觉识别和冷喷干扰的结合, 同时监测 PIM 的变化。虽然这种方法简单,

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-12-11

\*通信作者: 贺永宁 email:yongning@xjtu.edu.cn

但非常耗时。带有定向天线的接收机也可以通过接收非线性信号来定位 PIM 源<sup>[1]</sup>。在定位过程中,接收天线本身的 PIM 往往会干扰测试结果,以及共振结构的 PIM 信号的再辐射。微波全息技术也用来定位反射面天线中的 PIM 源<sup>[2-4]</sup>。这类测量的主要问题是发射和接收天线本身的 PIM 以及系统需要实现高动态范围。随着 PIM 问题出现的场景多样性和测试的各种要求,近场测量变得越来越重要。通常情况下,近场探头和被测物之间的距离不到十分之一的波长,因此具有很高的空间分辨率<sup>[5-6]</sup>。近场扫描测试的主要限制是,当探头靠近被测件的金属边缘时,扫描仪的灵敏度会降低<sup>[7]</sup>,灵敏度降低的程度取决于探头和被测物体的结构。

PIM 测试的主要问题之一是只能反映系统整体的互调水平,对于包括温度、压力等在内的单一变量很难获得确切的实验测试结果。因此,许多基于微波近场测试原理的测试夹具被开发出来。基于隔膜偏振器的 PIM 测试夹具适用于金属和涂层金属的表征,是一种可靠和敏感的 PIM 测试设备<sup>[8]</sup>。矩形缝隙波导是一种 PIM 测量方法,它利用近场耦合原理来诊断待测的接触结构,可以轻松测量和分析不同物理接触状态和接触结构的 PIM 产品<sup>[9]</sup>。平面化槽形波导为上述工作提供了进一步的小型化思路<sup>[10]</sup>。

本文设计并实现了一种用于 2.6 GHz 非接触 PIM 测试的新型基片集成缝隙波导(SISW),并在此基础上进行了近场测试区重构,得到了测试度、灵敏度更高的基片集成矩形缝隙波导(Substrate-Integrated Rectangle Slotted Waveguide, SIRS W)。

## 1 非接触式 PIM 测试平台的设计和实现

### 1.1 非接触式 PIM 测试实施方法和结构

考虑到电磁测试的安全性,希望测试结构是有方向性的,这将更有效地检测被测材料(Material Under Test, MUT)暴露在测试区域时的互调水平。在这些条件下,定向天线是一个不错的选择,但天线的辐照测量带来了 2 个紧迫的问题。首先,当待测样品放置在天线的辐射区域时,天线的方向图和辐射阻抗会受到影响,最终的 PIM 测试结果不是在一个明确的激励功率下得到的。其次,天线近场的其他潜在互调源也是需要排除的不良因素。这意味着定向天线需要进一步调整和优化,以避免 MUT 对天线辐射阻抗的影响和环境噪声对测试结果的干扰。

在此基础上,以漏波天线为原型,抑制其远场辐射,有望获得理想的高功率和定向的 PIM 测试平台。选择一个波导结构传输线性载波信号,可以将环境噪声对测试结果的干扰降到最低。为了减小测试平台的纵向尺寸和缩短平台的建造时间,放弃了传统的金属矩形波导,选择了具有相同优点的 SISW 作为漏波天线的原型。SISW 结构的特点是低传输损耗、高质量因子和高功率容量;同时因其制造过程与微带线相似,还具有体积小,成本低,易于加工和集成的特点。

### 1.2 线性载波传输的远场抑制

SISW 由波导段、微带端口和过渡结构组成,一个共面梯形微带作为过渡结构。只有当槽与波导表面的电流线垂直时,中断的电流才会转化为位移电流,从而沿槽向外辐射。在这种情况下,槽的长度和宽度决定了激励的场强。SISW 的远场辐射越低,意味着 SISW 的插入损耗越高。结合计算和全波模拟,确定波导的尺寸、过渡结构和狭缝尺寸。

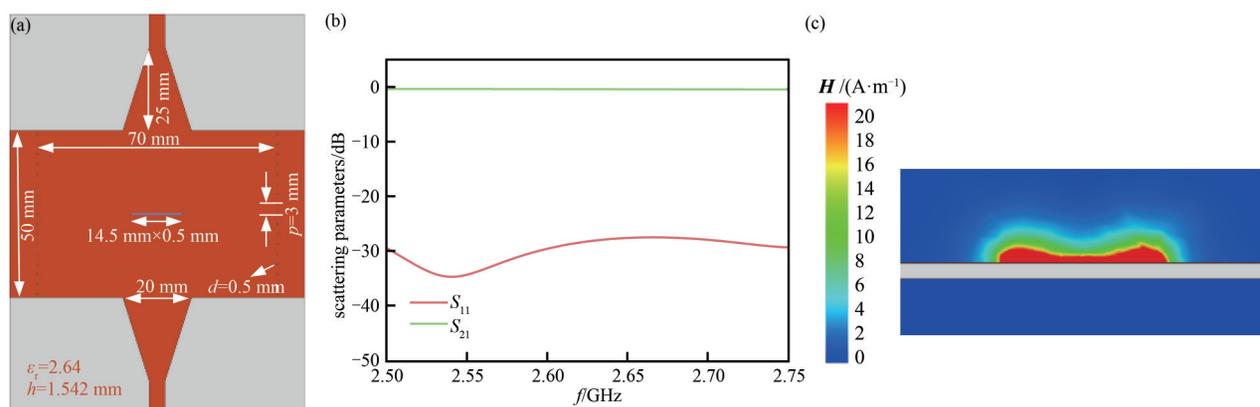


Fig.1 (a) Topology and key parameters of SISW; (b) simulated results of scattering parameters for SISW; (c) simulated result of the magnetic intensity in the near-field region of SISW

图 1 (a) SISW 的拓扑结构和关键参数; (b) SISW 的散射参数的模拟结果; (c) SISW 近场区磁强度的模拟结果

图 1 为 SISW 的拓扑结构和各个关键参数、散射参数和近场磁强度的模拟结果。图 1(a) 中采用的介质基板的相对介电常数和厚度分别为 2.64 mm 和 1.542 mm, 波导的长和宽分别为 70 mm 和 50 mm, 过孔的直径和间距分别为 0.5 mm 和 3 mm。两端均采用微带梯形结构进行过渡, 将波导结构连接至微带端口。图 1(b) 为器件电参数仿真结果, 可以看出 SISW 插入损耗接近 0 dB, 反射系数低于 -25 dB。图 1(c) 为 SISW 的测试区磁场强度仿真结果, 表明 SISW 的近场磁场强度可达 20 A/m; 在其缝隙上方约 4 mm 内有理想的测试灵敏度, 表明 SISW 的远场辐射在槽长为 14.5 mm 和宽度为 0.5 mm 的情况下几乎被抑制。这意味着 SISW 槽可以被视作具有一定灵敏度的 PIM 测试区域。显然, 这个细长的近场范围只适用于条形的 MUT。为了能够对更多形状 of MUT 进行诊断, 将重建 SISW 的近场测试区域。

### 1.3 SISW 的近场重建和响应区的定义

为了适应具有不同 PIM 水平的 MUT, 并提高测试平台对信号源和接收机系统的适应性, 根据场强, 进一步划分 PIM 响应区域。考虑到 MUT 的形状和 SISW 的辐射特性, 对测试区域进行了二维重建。当槽足够宽时, 沿缝隙辐射出去的能量也更高, 但同时也需考虑到散射参数的恶化需要维持在合理的范围内。因此通过尽可能地增加槽的宽度, 理论上可以获得一个相对宽的近场测试区域。考虑散射参数, 采用一个折衷方案, 在槽的中心插入一个额外的隔离金属贴片, 获得一个基片集成矩形缝隙波导(SIRSW)。通过优化新槽的宽度和金属贴片的尺寸, 有希望获得一个更具适应性的 PIM 响应区域。

图 2 为具有二维近场重构的优化测试夹具的关键尺寸、散射参数和近场磁强度的模拟结果。从图 2(a) 可以看出, 原本的狭缝被改为一个中心带方形独立金属贴片的方形缝隙, 波导两侧的过孔改为了金属薄膜。调整后的波导长和宽分别为 50 mm 和 107 mm, 中心矩形贴片的长和宽分别为 25 mm 和 15 mm。图 2(b) 为 SIRSW 的电参数仿真结果, 可以看出, 在本文关注的频段内 SIRSW 的插入损耗非常接近 0 dB, 同时反射系数也低于 -20 dB。图 2(c) 为 SIRSW 的近场磁场仿真结果。相较于 SISW, SIRSW 有更可观的二维 PIM 测试区, 对待测样的尺寸限制会更小, 有助于提高测试灵活性。值得注意的是, 为了减少由于过孔引起的互调风险, 采用由高温绝缘带隔离的铝箔作为 SISW 的窄边。

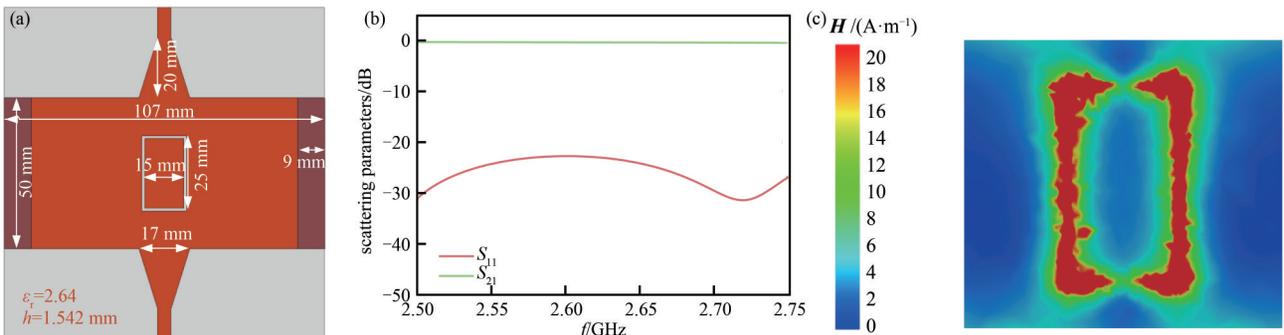


Fig.2 (a) Topology and key parameters of SIRSW; (b) simulated results of scattering parameters for SIRSW; (c) simulated result of the magnetic intensity in the near-field region of SIRSW

图 2 (a) SIRSW 的拓扑结构和关键参数; (b) SIRSW 的散射参数的模拟结果; (c) SIRSW 近场区磁强度的模拟结果

## 2 基于衬底集成波导的非接触 PIM 测试平台的构建和验证

### 2.1 非接触式 PIM 测试平台构建细节

图 3 为 SIRSW 关键参数、测试区域的划分, SIRSW 主要由波导体、矩形槽和阻抗匹配过渡部分组成。考虑到器件的加工和低互调要求, 器件两侧的波导壁由铝箔组成, 中间用聚酰亚胺薄膜隔开。矩形狭缝使得波导的散射参数不会因为狭缝而恶化, 同时狭缝近场的辐射强度可以被设计和优化。

在非接触式 PIM 测量中, 通常的做法是首先利用近场区域的磁场在 MUT 中诱导出一个线性电流, 随后激发出一个非线性信号, 然后沿着原来的路径反馈至接收回路。近场磁场强度影响 MUT 上线性电流的振幅以及接收 PIM 的水平。根据仿真得出的磁场强度, 矩形槽被划分为 3 个具有不同测试灵敏度的测试区域, 如图 3(b) 所示。测试区域①: 磁场辐射范围相对较小, 但平均值相对较高; 测试区域②: 范围很宽, 强度很好; 测试区域③: 磁场辐射范围比②大, 磁场的平均值比①大, 但低于测试区域②。

在微型样品、条状样品和块状样品上进行 PIM 测试, 3 个测试区域由场强的绝对值和场分布的形式区分。通

常情况下，挑选导电织物(微型样品)、镍箔(条状样品)和导电泡沫棉(块状样品)来确认和评估所提测试平台的整体性能。

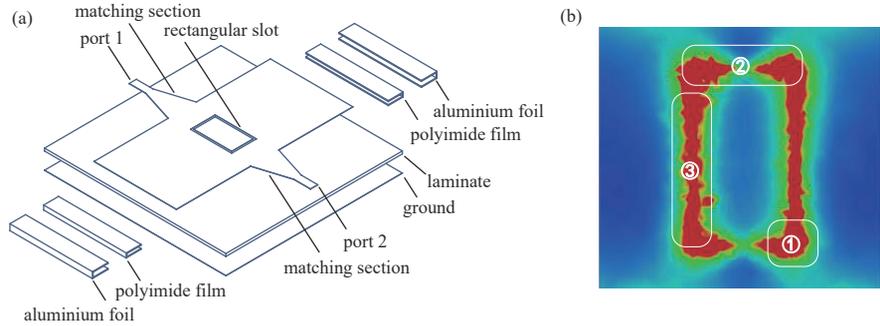


Fig.3 (a) the exploded view of the proposed SIRSW; (b) PIM test region delineation for SIRSW  
图3 (a) SIRSW 的拓扑结构和关键参数; (b) SIRSW 的散射参数的模拟结果

### 2.2 PIM 试验台电气参数验证

将上述 3 个 MUTs 分别放置在 3 个测试区域，并记录测试平台的散射参数。实验表明，测试平台的散射参数在加载 MUT 后出现轻微波动，对测试区域的依赖性较小。在这种情况下，以区域②为例，图 4 为测量得到的 SIRSW 的散射参数。结果表明，SIRSW 的散射参数在 PIM 测试频段几乎不受样品的影响，回波损耗低于 -15 dB。因此，可以近似忽略 SIRSW 上槽的远场辐射。简而言之，SIRSW 的散射参数符合 2.6 GHz 的 PIM 测试要求。

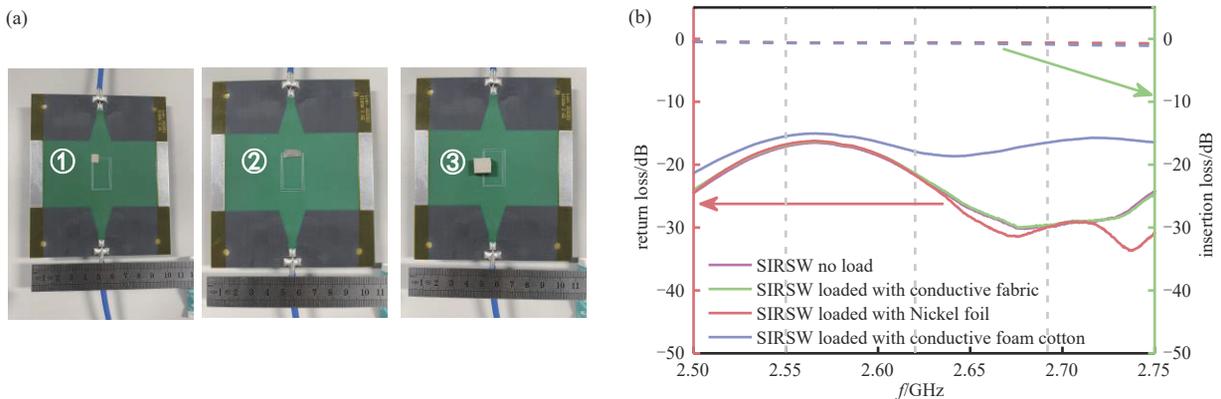


Fig.4 (a) the test region marked on the SIRSW photograph; (b) comparison of scattering parameter test results of SIRSW loaded with MUT  
图4 (a) SIRSW 照片上标记的测试区域; (b) 装有 MUT 的 SIRSW 的散射参数测试结果比较

### 2.3 PIM 测试平台功能测量和结果分析

图 5 为 SIRSW 的 PIM 测试示意图。在 2.6 GHz 频段采用 20 W 的双载波 PIM 测试回路，在 3 个测试区域中的每个区域都放置导电织物(5 mm × 5 mm)、镍箔(5 mm × 10 mm)和导电泡沫棉(10 mm × 10 mm)，在 40 s 内记录反射 PIM，得到 3 条 PIM 测试曲线，如图 6 所示。经过处理的 SIRSW 的剩余 PIM 底线小于 -165 dBc，整体测试偏差在 1 dB 以内。

导电织物显然在区域①内具有更高的 PIM 响应水平，在区域①中，磁辐射范围相对较小，但平均值相对较高，因此更适用于 5 mm × 5 mm 内的样品的 PIM 评估，区域①为 5 mm × 5 mm 的样品测试区域。同样地，区域②磁辐射范围宽且强度好，对镍箔更敏感，因此区域②指定为 5 mm × 10 mm 的样品测试区域。区域③的磁场范围更大，但磁场强度比区域②低，使得区域③中较大的样品更容易获得较高的 PIM 响应。因此，区域③被指定为 10 mm × 10 mm 的样品测试区域。

具有普适性的测试夹具对于微波可靠性测试领域是很有意义的研究方向，不仅缩短了校准不同测试夹具之间误差的时间，而且给工程师提供了相同测试环境和电磁指标下的测试平台。对于电磁领域中常见材料、面料和部件等不具备射频结构的元件，SIRSW 是一个很好的 PIM 快速表征夹具。它对于泡棉、导电布和镍箔等常见的电接触材料有可观的测试灵敏度和分辨力，这是新型 PIM 表征思路，脱离了传统的对阻抗匹配有严格要求的传导 PIM 测试和需要严格低 PIM 环境的辐射 PIM 测试方法。

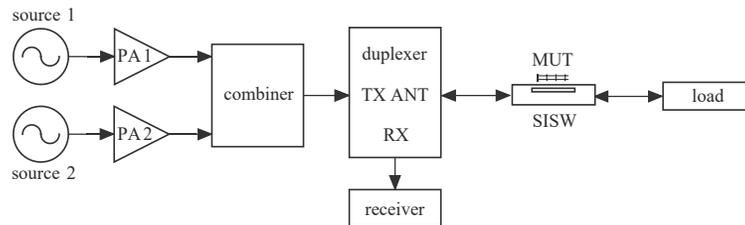


Fig.5 PIM test schematic of SIRSW  
图5 SIRSW的PIM测试示意图

### 3 结论

为了鉴定各种无射频端口的非线性材料的PIM水平,本文设计并实现了一个PIM非接触式测试平台,该平台有3个基于SIRSW的测试敏感区域,具有高灵敏度、可观的分辨率、稳定性、非破坏性和小型化的优点。实验表明,基于SIRSW设计理念的近场PIM测试台能够在 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 内对常用的射频导电材料进行灵活的PIM验证。提供的3个不同场强的测试区域,可以更好地适应信号源和接收系统的测试阈值。此外,通过重新设计漏电结构,有望获得更多适用于不同场合的平面化非接触式PIM测试装置。

#### 参考文献:

- [1] KIMINO T, KUGA N. Basic consideration on non-contact localization for a PIM source in array antenna[C]// International Symposium on Antennas and Propagation(ISAP). Osaka, Japan:IEEE, 2021:395-396.
- [2] ZHURAVLEV A, RAZEVIK V, ROGOZIN A, et al. Microwave imaging of concealed objects with linear antenna array and optical tracking of the target for high-performance security screening systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 2022,71(3):1326-1336. doi:10.1109/TMTT.2022.3217593.
- [3] AHMED A, KUMARI V, SHEORAN G. Non-destructive dielectric measurement and mapping using microwave holography[C]// 2022 2nd Asian Conference on Innovation in Technology. Ravet:India:IEEE, 2022. doi:10.1109/ASIANCON 55314.2022.9909059.
- [4] BENNETT J C, ANDERSON A P, MCINNES P A, et al. Whitaker: microwave holographic metrology of large reflector antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1976,24(3):295-303.
- [5] YONG Shaohui, YANG Sen, ZHANG Ling, et al. Passive intermodulation source localization based on emission source microscopy[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020,62(1):266-271. doi:10.1109/TEMC.2019.2938634.
- [6] SHITVOV A P, SCHUCHINSKY A G. Mechanisms and sources of passive intermodulation in printed circuits[C]// Proceeding of the 11th Microcoll Conference. Lake Buena Vista, USA:[s.n.], 2013:226. doi:10.1109/USNC-URSI. 2013.6715530.
- [7] HIENONEN S, VAINIKAINEN P, RAISANEN A V. Sensitivity measurements of a passive intermodulation near-field scanner[J]. IEEE Antennas Propagation Magazine, 2003,45(4):124-129. doi:10.1109/MAP.2003.1241323.
- [8] MONTERO J M, BRAVO A, TABERNERO D. PIM setup based on septum polarizer[C]// Proceeding of International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation. Noordwijk, Holland:[s.n.], 2017:1-6.
- [9] ZHANG Songchang, ZHAO Xiaolong, CAO Zhi, et al. Experimental study of electrical contact nonlinearity and its passive intermodulation effect[J]. IEEE Transactions on Components Packaging Manufacturing Technology, 2020,10(3):424-434. doi:10.1109/TCPMT.2019. 2955283.
- [10] ZHANG K, ZENG M, ZHANG S, et al. Design and implementation of a compact passive intermodulation coupling test board[C]// International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation. Valencia, Spain:[s.n.], 2022:1-6.

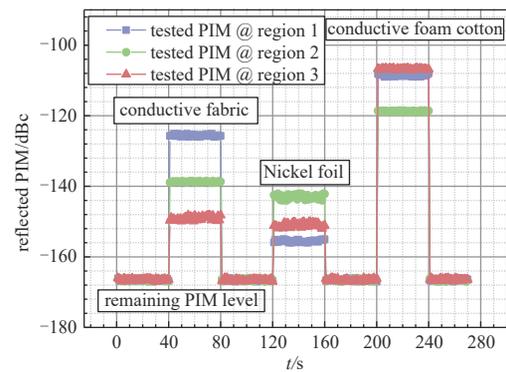


Fig.6 The reflected PIM results in three test regions of SIRSW  
图6 SIRSW三个测试区域的反射PIM结果