

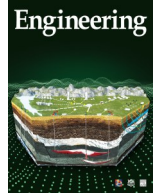


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Passive Intermodulation Measurement—Review

无源互调测量——挑战与解决方案

蔡张华^{a,b}, 刘列^{a,*}, Francesco de Paulis^c, 漆一宏^{a,b,*}

^a General Test Systems Inc., Shenzhen 518000, China

^b College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

^c UAq EMC Laboratory, Department of Industrial and Information Engineering and Economics, University of L'Aquila, L'Aquila 64100, Italy

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 August 2021

Revised 5 January 2022

Accepted 28 February 2022

Available online 20 April 2022

关键词

无源互调 (PIM)

PIM 源定位

消声室

摘要

在现代无线通信系统中,信噪比(SNR)是最重要的性能指标之一。当部件的其他射频(RF)性能设计良好时,无源互调(PIM)干扰可能成为限制系统SNR的重要因素。无论是基站、室内分布式天线系统还是卫星系统,都存在严格的PIM级别要求,以最大程度地减少干扰并增强多载波网络中的网络容量。尤其是5G无线通信等大功率、大带宽的系统,PIM干扰更严重。由于无源互调的复杂性和不确定性,测量是研究和评估无线通信系统无源互调性能的最重要手段。本文介绍了国际电工委员会(IEC)等标准组织推荐的当前主要PIM测量方法,以及PIM测量中的几个关键挑战及其解决方案(包括PIM测试仪的设计、PIM源的定位、紧凑型PIM暗室的设计,以及PIM暗室的评估方法)。这些挑战对于解决实际无线通信系统中设备可能出现的PIM问题具有重要意义。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

信噪比(SNR)是衡量通信系统中接收器性能可靠性的最重要的指标。减少噪声和干扰是所有无线电科学家和工程师一直要实现的目标。系统前端无源器件产生的干扰是最严重的问题之一。无源设备、组件和系统的非线性干扰问题被称为无源互调(PIM) [1–2]。PIM是限制系统SNR的重要因素之一。当非线性器件中存在两个或多个信号时,会产生由原始频率组成的混合信号。当混合信号的频率在接收机通带内时,就会出现PIM干扰。当PIM电平高于系统的本底噪声时,可以显著降低接收器的SNR。对于同时具有接收和发射功能的系统,发射路径中

的大功率信号产生的PIM产物可能会直接进入并影响接收路径。在这种情况下,PIM对SNR的影响尤为明显。以基站为例[3], -104.9 dBm的典型PIM电平非常接近通用陆地无线电接入(UTRA)载波中的-103 dBm本底噪声。稍高的PIM电平可能会严重增加本底噪声。随着SNR降低1 dB,信道容量将降低约11% [4],从而极大地影响系统性能。在卫星通信中,PIM的影响更严重,因此通常要求PIM电平在-200 dBc左右。为了获得更好的无线通信链路性能,必须在设计、制造过程,甚至安装到基站后,对各种PIM指标进行分析、测量和控制。而且,在5G无线系统、智能网联汽车等大功率、多频段或宽带的新兴技术和需求的驱动下,必然会导致更多的PIM问题。

* Corresponding authors.

E-mail addresses: lie.liu@generaltest.com (L. Liu), yihong.qi@generaltest.com (Y. Qi).

2095-8099/© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: Engineering 2022, 14(7): 181–191

引用本文: Zhanghua Cai, Lie Liu, Francesco de Paulis, Yihong Qi. Passive Intermodulation Measurement: Challenges and Solutions. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.02.012>

PIM的来源通常可以分为两种类型：接触非线性和材料非线性。第一个来源是指电流流经不同材料之间的任何类型的结，从而产生非线性行为；主要包括两种类型的接触，即金属-金属和金属-绝缘体-金属类型的接触。表面氧化的或受污染的金属接头也属于这一类。第二个来源是材料非线性，是指由于材料的特性会对施加的电压产生非线性电流响应。这种行为可能与材料的导电、介电性能或磁性有关[5]。

引起非线性响应的物理机制复杂多样[6]。下面提供了一些例子：电子隧穿半导体效应[7-9]；金属-金属界面空隙之间的微放电[10-12]；电热效应[13-15]；接触电阻效应[16-18]；铁磁效应[19-21]。

上面列出的机制也可以组合起来，因此最终的PIM效应可能归因于两个或多个来源。例如，同轴连接器上可能同时存在由电子隧穿效应、铁磁效应、接触电阻效应等引起的非线性。而且，新材料、新结构、复杂集成技术都可能由于上述机制的结合和相互作用而带来新的PIM干扰效应。

因此，在开发新技术或设备时，对可能的PIM来源进行理论分析非常重要。最近，许多研究人员采用建模和仿真的方法来分析典型器件的PIM。Henrie等[22-23]提出了一种应用于同轴连接器的PIM模型，可以预测微波网络中同轴连接器的PIM。此外，Guo等[24]提出了一种具有多个连接器的广义PIM网络模型。Jin等[25-26]对连接器中的涂层材料和基础黄铜中的铁含量的影响进行了建模和分析。参考文献[27-31]讨论了印刷线中PIM的机制，并提出了一系列分布式非线性传输线的PIM模型，可为降低PIM提供一定的指导。参考文献[16-17,32]研究了波导法兰处的PIM。参考文献[33-34]使用全波频域方法评估反射器天线的PIM。Figueiredo等[35]提出了一种新颖的非线性系统表征方法，可用作系统设计、建模和补偿的指南。

上述分析方法可以为降低PIM提供切实可行的指导。降低PIM的方法大致可归纳为三类。第一个旨在改变设备的设计以避免或减少PIM。例如，参考文献[36]采用间隙波导实现非接触式的法兰连接，可以大大降低波导的PIM水平。根据参考文献[28]中的分析，可以通过增加几何不连续性来减少印刷线的PIM。第二种适用于不能改变设计的设备。在这种情况下，可以通过改进制造工艺来降低PIM水平，如尽量减少零件的松动、对表面进行平滑处理、减少毛刺、选择具有相似导电性的组装材料、选择更好的涂层材料[25-26]。第三种解决方案涉及系统级PIM信号的消除[23,37-41]。例如，Henrie等[38-39]通过添加已知的非线性网络抵消了系统原来的PIM，无需特殊设计

非线性器件即可有效降低PIM。Waheed等[38]提出了一种数字消除解决方案来抑制系统中的PIM，他们展示了超过20 dB的PIM抑制。该方法可以有效缓解对器件线性度的要求[38]。

但是，上述大多数分析方法都是针对特定设备开发的。对于实际系统，多个PIM源和多种机制并存，这可能需要多种分析方法和解决方案的组合。这样一来，理论分析的复杂度就会增加，PIM的预测精度会降低。因此，通过实验测试识别PIM源并通过最终系统级测量来评估设备性能也非常重要。标准化PIM测量过程在国际电工委员会(IEC)标准IEC62037 [42]中有详细描述。但是，其中没有提到进行实际PIM测量时的一些相关方面和挑战。这些方面对于PIM测量的准确性和PIM源的识别都非常重要。下面列出了PIM测量方面的几个主要挑战。

第一个挑战是设计具有大动态范围和宽工作带宽的PIM测试仪。PIM测试仪是进行任何PIM测量的先决条件。PIM测试仪的主要挑战是在较大的频率带宽内检测相对较低的PIM值。通常，测量系统的PIM本底噪声需要比被测设备(DUT)的PIM电平低5~10 dB，才能获得准确的测量结果[42]。因此，对于移动通信系统，通常要求PIM本底噪声低于-170 dBc。卫星通信系统的要求更高，所需的本底噪声接近-200 dBc。这需要测量系统内的部件具有非常高的性能。功率放大器、滤波器、耦合器和其他核心组件的PIM性能决定了整个系统的性能。此外，PIM测试仪中还可以使用各种信号消除技术，可以有效提高系统的动态范围[43-45]。

第二个重要挑战是准确定位PIM源。理论分析不可避免地会漏掉一些PIM源，特别是对于具有多个PIM源的复杂系统，通常对PIM大小的评估是无效的。PIM的电平取决于非线性程度和通过非线性节点的电流的大小。非线性在很多情况下很难评估，如金属表面生锈或接头松动以及金属中铁磁材料的含量。因此，控制电流是降低PIM的关键。然而，在天线等微波元件的设计中，通常只关注电压驻波比(VSWR)和增益等全局参数，很少分析电流的大小。此外，很难确定哪些PIM源对系统有重大影响。参考文献[46-59]针对不同类型的设备报道了一些PIM源识别方法。例如，近场扫描测量方法可用于检测非封闭器件的PIM源，如印刷线[49-52]。声学振动用于检测基站天线中的PIM源[53]。基于 k 空间多载波信号的方法可用于定位微波系统中的多个PIM源[54]。

以下两个挑战与PIM测试暗室有关。电波暗室在提高PIM测量精度方面发挥着重要作用。这些是本文的一些作者所做的工作。

第三个挑战是设计一个具有低背景噪声的紧凑型PIM暗室。PIM干扰在很大程度上取决于每个产品的加工和组装。PIM等级会随着结构的微小变化而变化，如导体表面粗糙度不同、氧化层薄或表面污染、接触松动、接触区有碎屑等。因此，同种产品的不同样品可能具有不同的PIM性能。因此，对于对PIM要求严格的产品应进行产线测量。此外，在长途运输过程中，由于连接器松动和表面污染，PIM性能可能会发生变化。因此，安装后的现场PIM测量对于确保设备的PIM指标始终在允许范围内也非常重要。传统的大尺寸暗室价格昂贵，占地面积大。参考文献[60]提出了一种低PIM消声室设计方法，可用于实现小型化、低成本、高精度的PIM测试室。该方法可用作生产线或现场PIM测量的解决方案。

第四个挑战是PIM测量暗室的评估方法。通常，制造商会给出暗室的背景PIM噪声电平。这对于非辐射器件来说已经足够了，但对于辐射器件可能就不合适了。暗室本身的结构也会产生PIM信号，其功率取决于辐射到暗室PIM源的能量。例如，假设有两个增益不同的天线，它们的实际PIM值都是-150 dBc。在测量过程中，低增益天线辐射的能量很小，可能的干扰只有-160 dBc，对结果几乎没有影响。但是，高增益天线可能会产生-150 dBc甚至更大的PIM干扰，这会导致测量误差很大。因此，暗室的评估应与DUT的增益相关。参考文献[61]提出了一种使用低PIM中等增益天线评估暗室PIM电平的方法。该方法通过降低路径损耗，将中等增益天线等效为高增益天线，避免了设计高增益低PIM天线的困难。

本文的其余部分安排如下。第2节介绍PIM干扰的特性。第3节将根据国际标准IEC62037回顾基本的PIM测量方法。PIM测量的挑战和解决方案将在第4节中详细阐述。最后，对全文进行总结。

2. PIM干扰的特点

为了理解PIM，应该了解谐波和互调产物的基本理论。无源器件的非线性函数可以用以下幂级数来表征[直流(DC)项被省略]:

$$y = \sum_{k=1}^{\infty} a_k x^k \quad (1)$$

式中， x 和 y 分别代表瞬时输入和输出信号；系数 a_k 与器件的非线性特性有关（ k 是幂级数的阶）。当输入信号是频率为 f_1 的单频信号时，输出信号中会出现基频整数倍的谐波信号[公式(1)]，如 $2f_1$ 、 $3f_1$ 等。随着谐波次数的增加，谐波的幅度通常会减小。尽管有一些使用谐波的应用

(如谐波混频器)，但无源设备中的谐波通常是不需要的信号[62]。

根据公式(1)，当输入信号由两个频率(f_1 和 f_2)组成时，输出信号中不仅会有谐波信号，而且由于这两个频率的组合，还会有互调信号。可以将这些信号的频率统称为 $mf_1 + nf_2$ ，其中 $|m| + |n|$ 为PIM信号的阶数。

图1显示了基频附近的互调信号。在大多数情况下，三阶PIM产物是最受关注的，除非卫星通信系统需要考虑高阶PIM干扰。大多数所需的PIM测量都集中在三阶PIM产物上，因为它们最接近系统的工作频率，并且幅度通常在其他所有奇数阶产物中是最大的。

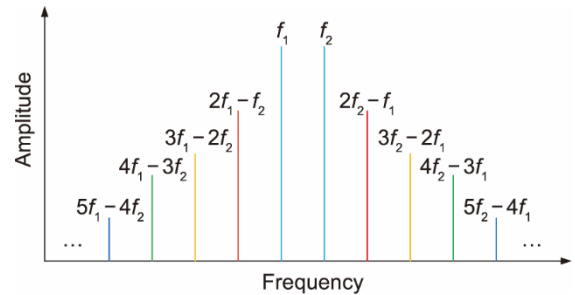


图1. 基频附近的PIM信号频谱。

3. PIM测量标准

尽管第三代合作伙伴计划(3GPP)和国际电信联盟(ITU)已经发布了PIM测量标准[3,63]，但并未给出测量设置的详细信息和指南。PIM失真测试方法通常参考国际标准IEC62037[42]。IEC62037标准提供了测量无源射频(RF)和微波设备的PIM噪声的一般要求和方法。该标准定义了基本的PIM测试方法，指定了测试功率(43 dBm)，并提供了误差分析。目前行业内PIM测试设备的原理和测试方法大体与标准一致。

直通法和反射法是IEC标准提供的基本PIM测量方法。图2同时显示了典型的正向和反向PIM的测量方法。反向和正向这两个术语与测量的PIM相对于大功率信号标称的方向有关。测量反向PIM时，DUT产生的PIM信号反射到端口1并由频谱分析仪(SA)检测。测量前向PIM时，前向传输的PIM从端口2进入SA。当DUT有两个或更多端口时，可能更适合用前向PIM测量，因为这种模式通常可以反映DUT最坏情况下的PIM值。然而，在DUT只有一个端口(如天线)的情况下，反向PIM测量方法更容易实现。

辐射DUT(如天线)的前向PIM可能需要额外的器件来测量。由于辐射系统只有一个端口，因此无法通过传

输方法直接测量前向PIM。应采用辐射法[64]。该方法的原理是将产生的PIM信号通过DUT辐射到空间。辐射的PIM信号可以由探针天线接收并由SA检测以进行分析。

虽然IEC标准描述了基本的测量方法，但该标准并不能解决一些重要的测量问题。如上所述，PIM源的位置对于识别和解决PIM问题非常重要。因此，图2中描述的标准方法不具有普遍适用性。此外，对于有辐射的DUT，环境干扰的控制是提高测量精度的关键，而这通常通过在电波暗室内进行测试来实现。现行标准并没有准确、具体地定义测量环境（电波暗室）的要求。唯一的特定要求是吸波体的吸收率大于30 dB。这远远不足以完整定义环境要求和合适的测试方法，以评估用于测试辐射DUT的消声室。此外，由于新设备的开发，当前标准中包含的测量设置和指南无法满足不断增长的要求。因此，本文的下一部分旨在回顾由这些重要的测量问题所带来的具体挑战以及相应的建议解决方案。

4. PIM测量的挑战和解决方案

4.1. 设计PIM测试仪的挑战和解决方案

PIM测试仪是PIM测量的基础。电子元器件的PIM电平决定了PIM测试仪的整体性能。目前，制造商通常通过严格的筛选、昂贵材料的使用和制造工艺的改进来保证器件的性能。还有一些研究工作旨在通过信号合成器[65]、滤波器[66]、负载[67]等组件的独特设计来提高设备的性能。

除了改进设备本身，使用前馈对消技术也是提高系统性能的有效方法[43–45]。前馈对消是指通过产生与原始信号具有相同幅度和反相的信号，然后采用求和方法来对

消原始信号的一种技术。这种方法只会消除前馈信号带来的干扰，而不会影响DUT产生的PIM信号。因此，前馈消除技术特别适用于消除PIM测量系统中的干扰。如图3所示，高动态范围PIM测量系统主要由信号源、放大器、隔离器、合路器等组成，如参考文献[43]所述。该系统只需检测信号的功率以及检测和抵消信号的组合功率，即可预测对消所需的相移，并能自适应地消除前馈信号中的干扰信号。该技术可以在一个宽带内将系统的动态范围扩展至少40 dB，在双音测试系统中可以达到113 dB的动态范围。根据有无对消传输的差异，可以显著提高功率谱密度。这种数字消除方法对于旨在满足更高数据速率需求的5G载波聚合特别有用。

4.2. 定位PIM源的挑战与解决方案

PIM源的识别对解决PIM干扰具有重要作用。传统的PIM源定位方法主要有两种。一种是敲击测试，该方法使用小橡胶锤或螺丝刀柄敲击网络中每个可能的PIM源位置，同时持续监测PIM电平。在这种干扰下，有缺陷的元件会引起PIM电平的较大波动。第二种是分段消除法，该方法是在拆解整个网络和测量部分组件的基础上，逐步缩小PIM源的可能位置，最终确定产生PIM的组件。但上述方法均需人工操作，费时费力，且可能无法准确定位PIM源。许多研究人员对PIM源定位问题进行了研究，本文描述了几种典型的识别方法。

目前，一些PIM分析仪已经集成了PIM源定位功能，如Kaelus [46]、Rosenberger [47]、Anritsu [48]等。其故障定位技术的核心是采用时域反射计（TDR）原理。反射的PIM信号扫描一定的频率范围。可以对反射信号使用快速傅里叶逆变换（IFFT）来重建时域脉冲。这种PIM源定

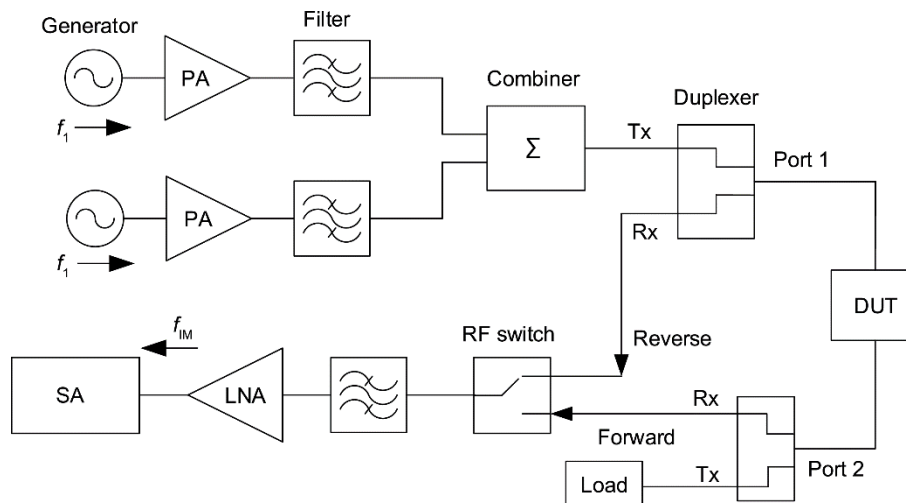


图2. PIM测试原理示意图。SA: 频谱分析仪; PA: 功率放大器; LNA: 低噪声放大器; Tx: 发射; Rx: 接收; f_{IM} : PIM信号的频率。

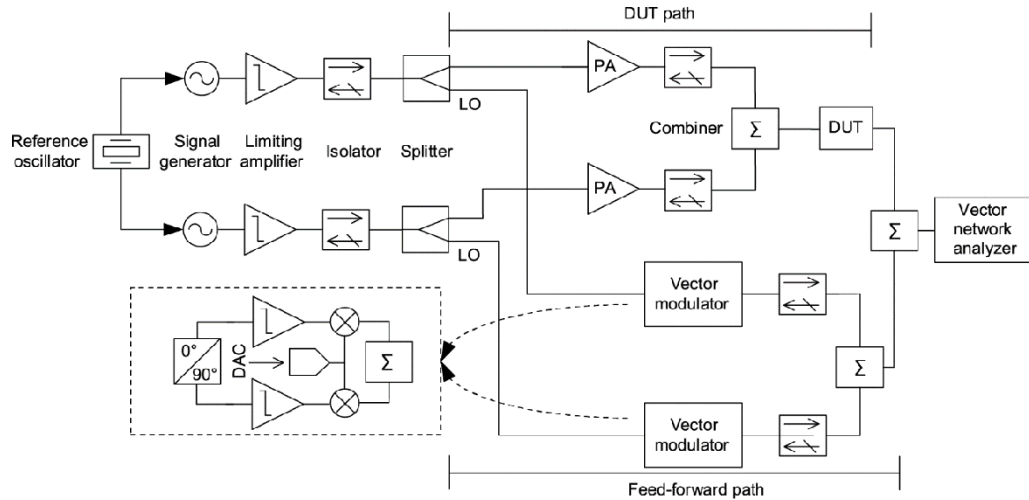


图3. 高动态范围PIM测量系统（可以在DUT的输出端添加一个大值、低PIM衰减器或耦合器，以匹配矢量网络分析仪的功率）[43]。LO：本地振荡器；DAC：数模转换器； Σ ：合路器符号。

位技术有很多局限性。例如，在实际的天馈系统中，滤波器会带来额外的时延，降低定位精度。此外，系统的多个分支的存在会导致定位的不确定性。

近场扫描测量是另一种典型的方法。近场测量方法如图4所示，如参考文献[27,49–52]所述，其基本原理是使用各种探头（如单极天线和小型环形天线）在DUT附近进行非接触式PIM测量。探头检测到最大PIM信号场强的位置很可能是PIM源的位置。虽然探头本身可能是PIM的来源，但可以在DUT测试之前校准探头和整个PIM测试设置，以消除探头引入的弱非线性。这个目标可以通过差分测量或通过后处理测试结果来实现。该方法最初用于确定基站天线中干扰源的位置[49–50]。最近，该方法已被用于印刷电路的PIM测量[27,51–52]。此方法是定位开放结构（如印刷电路）的PIM源的强大工具。但是，该方法无法用于检测封闭组件（如电缆、波导和腔体滤波器）内的PIM源。在这种方法中可以检测到低于 -110 dBm的PIM电平[50]。当用于在印刷线上定位PIM源时，可以达

到小于 1 cm的精度。

由于上述PIM源定位方法的局限性，参考文献[53]提出了一种使用声振动定位PIM源的测量方法。其原理如图5所示。该方法是在DUT的不同位置引入声振动，然后通过检测调制后的PIM信号的强度来识别PIM源的位置。这种方法的基本思想与传统的敲击测试类似，但比传统方法更系统、更准确。该方法经过工程测试，为基站厂商解决了很多PIM问题。因此，可以认为是一种比较成熟、有效的PIM源定位方法。这种方法的精度约为 1 cm。这种方法要求PIM源必须是由松散的机械接触或松动的非线性材料引起的。此外，对于双工器等金属器件，声波可以在整个器件中传播。因此，无法准确定位双工器中PIM源的准确位置。

近场测量和声振法都不能同时定位多个PIM源。参考文献[54]提出了一种基于相干测量技术的多点定位方法（图6）。该方法将参考源引入PIM测试系统，并利用参考源与实际PIM源之间的幅度和相位差来构建 k 空间多载波

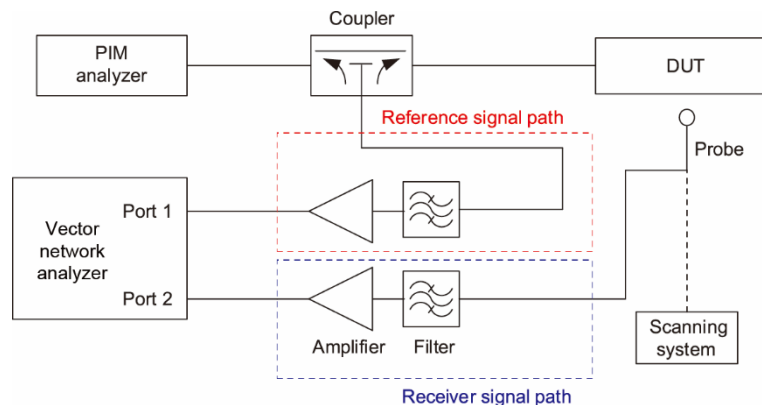


图4. 近场测量系统框图[50]。

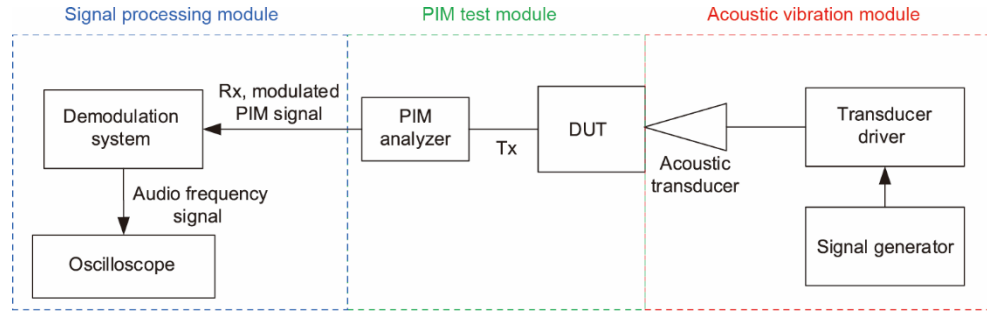


图5. 声振动调制测试系统设置框图[53]。

信号。基于 k 空间傅里叶逆变换和多载波信号的逆优化，提出了一种 PIM 定位算法。该方法可用于定位多点 PIM 源的位置，适用于开放式和封闭式结构。该方法的定位不确定性与总直流相位误差和使用带宽的乘积成正比。这种方法能够识别每个 PIM 源和输入端口之间的距离。然而，对于具有多个分支的 DUT，在定位 PIM 源出现的分支时会出现不确定性。

除上述方法外，还有一些其他 PIM 源定位方法被提出。Aspden 等[55–57]提出了用微波全息成像的方法来定位反射天线的 PIM 源。该方法是通过低互调天线将两个单频信号传输到被测反射面。然后，使用平面扫描仪在二维平面上检测反射波的幅度和相位。经过数据分析，可以得到 PIM 源在反射面上的坐标。Yong 等[58]提出了一种使用发射源显微镜 (ESM) 来定位 PIM 源的方法。ESM 是一种旨在通过测量距离 DUT 几个波长的平面上的场的幅度和相位来定位和表征干扰源的技术[68–70]。该算法基于合成孔径雷达技术，并基于二维傅里叶变换。待测平面上的场可由扫描平面上测得的场计算得出。测量设置如图 7

所示。这种方法不需要给 DUT 馈电，并且可以识别距离较远的 PIM 源。Chen 等[61]提出了一种带有水填充的小型波导单元，如图 8 所示。印刷电路板 (PCB) 只需插入波导两次，即可在 PCB 上定位 PIM 源。在这种情况下，无需为 DUT 供电。因此，该方法特别适用于 PCB 或其他无法直接馈电的开放式平面结构。

这些方法主要致力于由集总非线性产生的 PIM 产物，通常用于一些明显的有主导作用的非线性，如“生锈的螺栓” (rusty bolt)。在近距离内有多个 PIM 源的情况下，可能难以准确区分源，但至少人们可以知道是哪个组件产生了 PIM [50,53]。由于 PIM 来源的多样性，很难用一种方法来完成所有类型设备的 PIM 识别。某些测试方法通常对特定类型的设备更有效。因此，这些方法的可行性必须通过工程检查进行评估，以确定最适合待测试的特定设备的技术。

4.3. 设计紧凑型 PIM 测试暗室的挑战和解决方案

在设计测试暗室时，辐射系统的 PIM 评估带来了额外

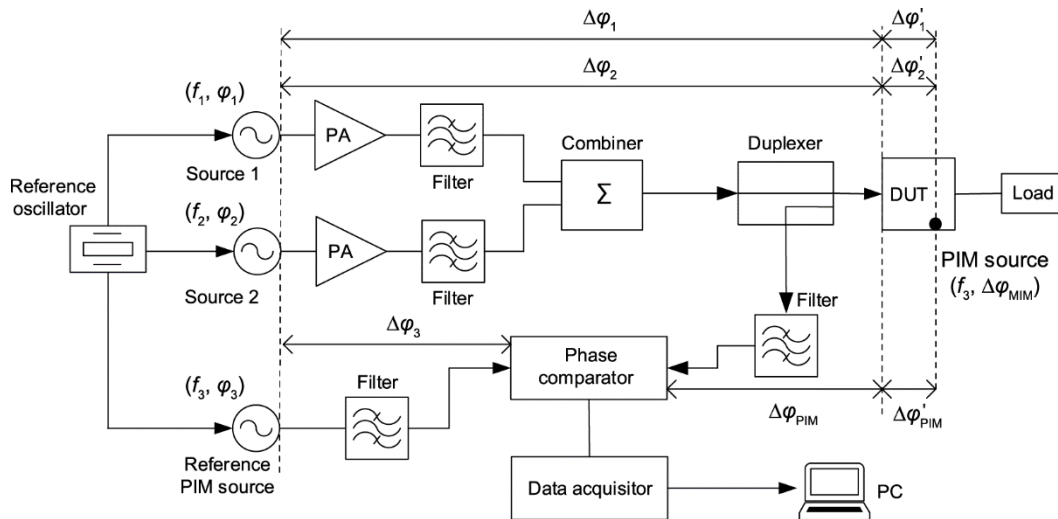


图6. 基于 k 空间多载波信号的定位方法框图[54]。 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 ：分别为源 f_1 、 f_2 、 f_3 的初始相位； $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ ：分别为源 f_1 、 f_2 的输出端口与 DUT 的输入端口之间的相位延迟； $\Delta\varphi_3$ ：源 f_3 输出端与相位比较器的相位延迟； $\Delta\varphi'_1$ 、 $\Delta\varphi'_2$ ：DUT 输入端口与 PIM 源位置之间的源相位延迟； $\Delta\varphi_{PIM}$ ：DUT 输入端口与比较器之间 PIM 信号的相位延迟； $\Delta\varphi'_{PIM}$ ：PIM 源与 DUT 输入端口之间的 PIM 信号相位延迟； $\Delta\varphi_{MIM}$ ：由 PIM 源引起的潜在固有相移；PC：个人电脑。

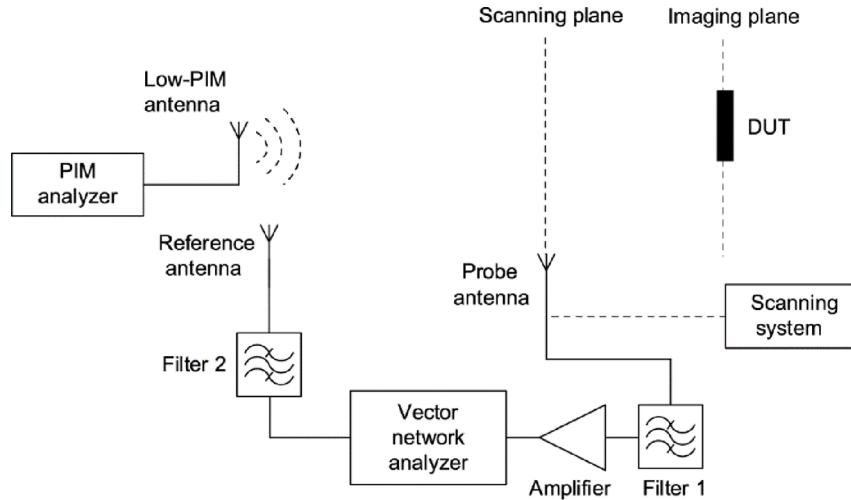


图7. 基于ESM的定位方法[58]。

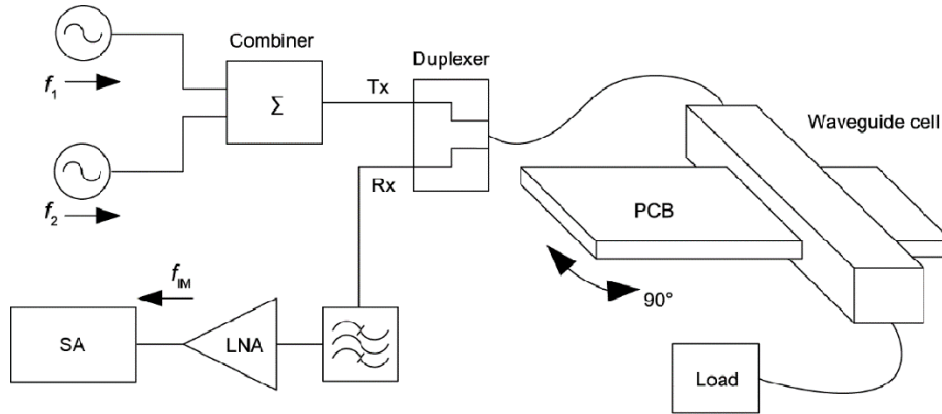


图8. 使用波导单元的定位方法[59]。

的限制。在辐射系统的情况下，DUT不仅可以向空间辐射能量，还可以从空间接收能量。因此，测量PIM时可能会出现以下干扰源：DUT辐射的射频信号可能导致附近物体产生并重新辐射PIM信号；然后，这样的PIM信号可以被DUT接收。由于墙壁等物体的反射，DUT辐射的PIM信号可能会被再次接收。此外，该空间中存在的其他RF信号也可能被DUT接收。所有这些信号都会干扰PIM的测量，导致较大的测试误差。在室内或室外测量的PIM值可能相差数十分贝。因此，为了进行准确可靠的PIM测量，需要一个暗室来限制测试空间并屏蔽外部噪声以及最小化室壁的内部反射。

然而，暗室内部也会有PIM源，其主要来源是吸收材料和屏蔽体中的非线性[60–61]。如图9所示，可以考虑基于反射法测试天线PIM，其中 f_1 和 f_2 是两个工作信号的频率。 S_{IM_Ai} 是被测天线（AUT）的反向PIM； S_{IM_Ar} 也来自AUT，但由反射信号 S'_{f_1} 和 S'_{f_2} 生成（ S'_{f_1} 和 S'_{f_2} 是 f_1 和 f_2 经暗室内壁反射的回波信号）； S'_{IM_Ai} 为 S_{IM_Ai} 经暗室反射的回

波信号； S_{IM_AM} 和 S_{IM_SE} 分别是来自吸波材料和室壁的PIM； S_{IM_EX} 指来自暗室外部的信号； S_{IM_SYS} 表示测试仪器的总PIM噪声。

这些信号大部分可以通过暗室的反射电平和屏蔽效果等指标来估计；但是， S_{IM_AM} 和 S_{IM_SE} 的电平是未知的。根据以往报道，由没有专门设计屏蔽体和吸波材料造成的测量误差可能超过10 dB [60–61]。减少这些PIM信号的传统方法是建造一个巨大的暗室。然后，大的路径损耗可以降低这两种PIM电平。当然，更大的尺寸意味着更高的成本和更大的空间，并且难以移动或运输。此外，一般厂房可能无法满足某些尺寸暗室的要求。这些问题使得传统的PIM测试暗室非常不方便且价格昂贵。小型暗室将更容易组装和搬迁，成本低、效率高。

使PIM暗室小型化的关键是设计低PIM吸波材料和屏蔽体。研究证明，如果吸波材料和屏蔽体不产生PIM，则暗室的大小变得无关紧要[60]。同时，在参考文献[60]中还提出了一种可用的低PIM吸收材料和屏蔽结构。

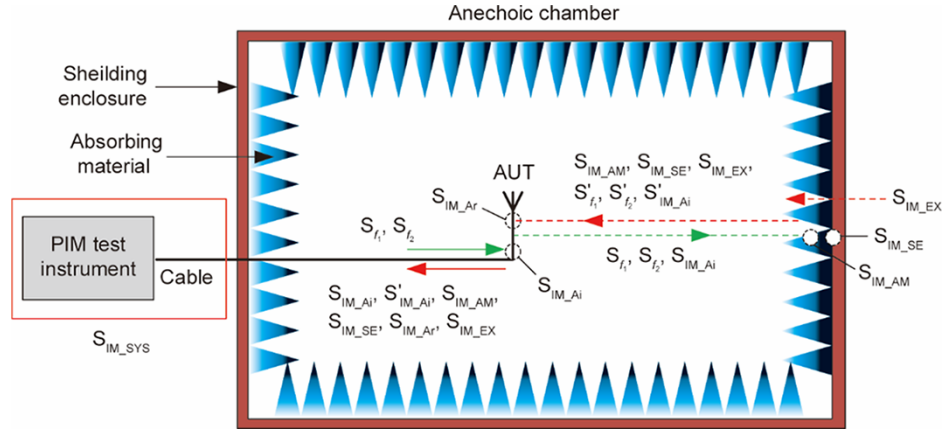


图9. 测试暗室中的PIM信号[60]。 S_{IM_SYS} : 测试仪器的总PIM噪声; S_{f_1} 、 S_{f_2} : 仪表输入的测试信号; S'_{f_1} 、 S'_{f_2} : f_1 、 f_2 经暗室反射后的回波信号; S_{IM_AM} 、 S_{IM_SE} : 分别来自吸波材料和暗室壁的PIM; S_{IM_EX} : 来自暗室外部的信号; S_{IM_Ai} : 被测天线 (AUT) 的反向PIM; S_{IM_Ar} : 来自AUT, 但由 S'_{f_1} 和 S'_{f_2} 生成; S'_{IM_Ai} : S_{IM_Ai} 经暗室反射后的回波信号。

在设计和制造屏蔽外壳时, 必须同时考虑PIM性能和屏蔽效果。如图10所示, 有效设计的关键是避免大面积的金属-金属接触; 而任何不可避免的大面积接触都应通过重新设计拼接结构使其出现在暗室的外侧。使用的金属板应该是非铁磁性的并且具有平坦表面的实心结构, 而不是由可能产生PIM的金属丝网织物制成。多层金属板结构和有损材料的使用可以在金属-金属拼接处实现良好的屏蔽效果。

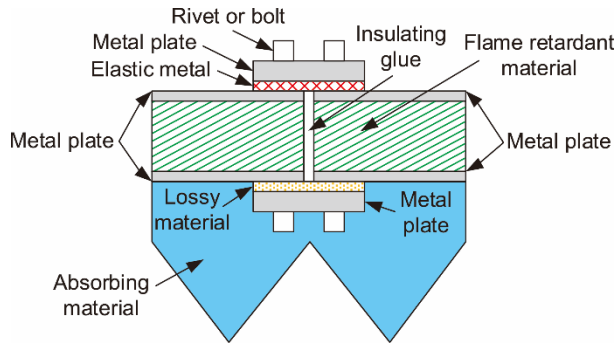


图10. 屏蔽外壳的拼接结构[60]。

吸波材料需要在保持低PIM的同时具有良好的吸波性能。良好的吸收特性可以降低暗室的反射电平, 同时可以衰减到达屏蔽外壳的信号, 进而有效地降低 S_{IM_SE} 的PIM电平。

大多数消声室采用由聚氨酯 (PU) 泡沫、碳颗粒或石墨粉制成的金字塔形吸波体。工艺流程简单, 主要包括对碳粉混合物进行浸泡和干燥。这种工艺比较粗糙, 可能存在材料不均匀、性能不稳定等缺点。对于PIM测量, 该工艺制造的材料中可能存在松散的碳颗粒接触, 将导致PIM产物的出现[1]。

近年来, 发泡聚丙烯 (EPP) 已开始用作消声室的吸

波材料[71]。该材料中的吸收剂使用纳米级炭黑 (CB), 比PU吸收剂中的传统微米级石墨颗粒更细。在成型过程中, 纳米级CB颗粒可以完全接触。因此, EPP具有均匀分布的纳米颗粒并且介电性能稳定。图11显示了EPP吸收剂及其在扫描电子显微镜 (SEM) 下的形态。可以看出, 即使在SEM图像中也很难看到单个CB颗粒 (这可能是PIM噪声的来源)。因此, EPP吸波材料不仅在吸波性能上优于传统PU材料, 而且由于颗粒在纳米尺度内且分布均匀, PIM电平较低。参考文献[60]中的实验表明, 与传统的海绵吸波材料相比, EPP具有优异的性能, 几乎不产生PIM产物。

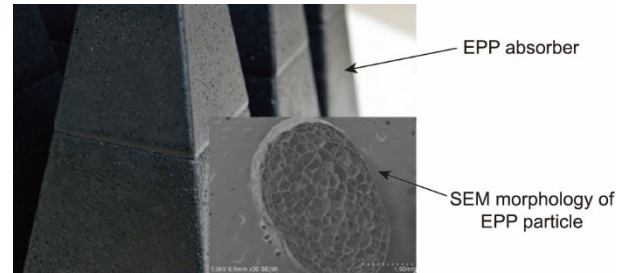


图11. EPP吸收体和SEM下的EPP颗粒形貌[60]。

上面讨论的关于PIM测试暗室设计的相关方面表明, 未来的标准应该包含PIM测试室的设计要求。

4.4. 评估PIM暗室性能的挑战和解决方案

一旦考虑暗室本身的PIM, 就应对PIM测试暗室的性能进行相应的评估。这个过程可以分为两部分: 部件的评估和整个暗室的评估。

部件评估对电波暗室的设计者和制造商具有重要意义。可以保证使用的部件不会造成无源互调干扰。评价的主要对象是吸波材料和屏蔽体。评价指标是每个组件的PIM性能。评估方法可以根据图12 [72-73]使用无端口设

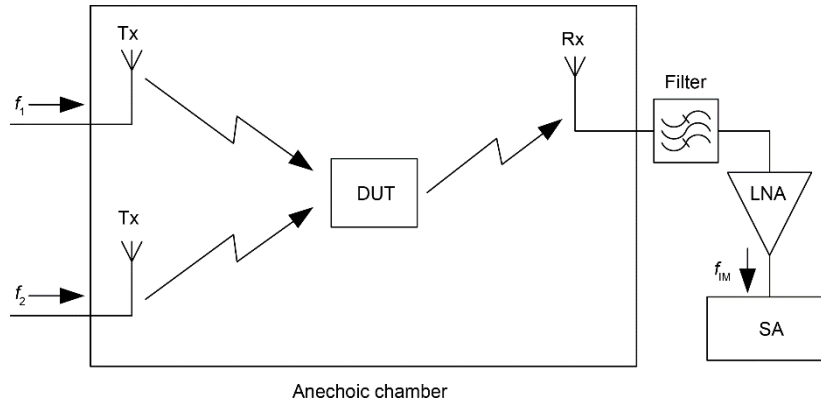


图 12. 无端口部件的辐射测试方法。

备（反射器、天线支架等）的 PIM 测量方法。由于 DUT 是无端口组件，不产生信号，因此可以通过两个发射天线发射两个单频信号。当电磁波照射 DUT 时，会产生 PIM 信号。然后 DUT 上产生的 PIM 信号可以被接收探针接收。在图 12 中，发射天线和接收天线可以共享[72–73]。但这要求探头的 PIM 电平非常低，否则会导致测量结果出现较大误差。

整体评估用于 PIM 暗室的最终验收。如第 1 节所述，暗室的剩余 PIM 与 DUT 的增益有关。因此，理论上，应该使用具有高增益低 PIM 的天线来检测暗室的 PIM 噪声。但是，高增益天线的结构相对复杂，连接点、焊接点和非线性器件较多。因此，很难达到非常低的 PIM 电平。此外，高增益天线具有大口径和窄波束。旋转大型天线（如基站天线）在室内进行扫描以进行全面分析是非常困难的。参考文献[61]提出了一种使用中增益低 PIM 天线测量暗室的方法。通过缩短天线最大增益方向到暗室壁的距离，可以增加天线接收到的回波功率。然后，中增益天线可以达到类似于高增益天线的效果。中增益天线只需一个单元即可实现。与高增益天线相比，中增益天线很容易实现低 PIM，并且通常尺寸更小，具有移动或旋转灵活性更好的优点。因此，中增益天线在设计和适用性方面更加方便。该方法已通过实验验证，证明了其可行性。然而，仍然需要更严格的分析和工程实践来定义标准指南。

5. 总结

测量被认为是研究 PIM 干扰的最有效方法。本文全面介绍了 PIM 测量面临的挑战和解决方案。当前的 PIM 测量标准提供了直通法、反射法和辐射法等基本测量方法。然而，对 PIM 测量中的一些关键问题没有引起足够的重视，如 PIM 测试仪的设计、PIM 源位置的识别方法、紧凑

和廉价的 PIM 暗室的设计方法以及评估 PIM 暗室整体性能的技术。前馈消除技术可以有效降低系统的 PIM 干扰，大大提高 PIM 测试仪的动态范围[14]。本文回顾和总结了多种定位方法，如近场扫描法、声振动法和 k 空间多载波信号法，以定位不同环境和系统中的 PIM 源[46–59]。参考文献[60]提出了一种实现低 PIM 室的设计方法，并且已经证明，如果暗室没有 PIM 源，则暗室的大小在 PIM 测量中变得微不足道。基于特定组装工艺和专门开发的吸波材料的暗室设计可用作设计紧凑型 PIM 暗室的指南。参考文献[61]提出了一种 PIM 消声室评估方法。该方法可以使用中增益天线来等效高增益天线，评估在暗室中的 PIM 干扰。本文所讨论的内容对于解决 PIM 问题，有效定位 PIM 源头，构建低成本、极低残留 PIM 的紧凑环境具有重要意义。本文可能为有关卫星和 5G 基站更高要求的 PIM 测试工作奠定基础。

随着无线通信技术的发展，PIM 问题涉及复杂的多物理条件、多调制模式和重叠信道，因此可能成为需要进一步扩展和深入研究以获得可行解决方案的热门研究课题。在这种情况下，未来可能需要能够在宽带和动态范围内识别和评估 PIM 量的仪器。此外，与当前多样化的定位方法相比，未来的 PIM 源定位方法应准确开发并标准化，以便应用于更多种类的设备。对于 PIM 测试暗室，还应制定标准，作为 PIM 分析方法和仪器未来发展的一部分。最后，PIM 易受环境干扰（温度变化或环境应力等）的影响，在某些情况下可能需要高灵敏度的实时监测设备。

Compliance with ethics guidelines

Zhanghua Cai, Lie Liu, Francesco de Paulis, and Yihong Qi declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Lui PL. Passive intermodulation interference in communication systems. *Electr Commun Eng J* 1990;2(3):109–18.
- [2] Sanford J. Passive intermodulation considerations in antenna design. In: *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*; 1993 Jun 28–Jul 2; Ann Arbor, MI, USA. IEEE; 1993. p. 1651–4.
- [3] TR 37.808: Passive intermodulation (PIM) handling for base stations (BS). 3GPP standard. France: 3GPP; 2013.
- [4] Butler R. PIM testing: advanced wireless services emphasize the need for better PIM control. Report. Soochow: CommScope; 2017.
- [5] Hienonen S. Studies on microwave antennas: passive intermodulation distortion in antenna structures and design of microstrip antenna elements [dissertation]. Helsinki: Helsinki University of Technology; 2005.
- [6] Wilkerson JR. Passive intermodulation distortion in radio frequency communication systems [dissertation]. Raleigh: North Carolina State University; 2010.
- [7] Simmons JG. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film. *J Appl Phys* 1963;34(6):1793–803.
- [8] Higa WH. Spurious signals generated by electron tunneling on large reflector antennas. *Proc IEEE* 1975;63(2):306–13.
- [9] Bond C, Guenzer C, Carosella C. Intermodulation generation by electron tunneling through aluminum–oxide films. *Proc IEEE* 1979;67(12):1643–52.
- [10] Sorolla E, Anza S, Gimeno B, Perez AMP, Vicente C, Gil J, et al. An analytical model to evaluate the radiated power spectrum of a multipactor discharge in a parallel-plate region. *IEEE Trans Elect Devices* 2008;55(8):2252–8.
- [11] Wen H, Yang H, Kuang H, Qin X, Cai G. Global threshold prediction of multicarrier multipactor with time distribution and material coefficients. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2017;60(5):1163–70.
- [12] You JW, Wang HG, Zhang JF, Tan SR, Cui TJ. Accurate numerical analysis of nonlinearities caused by multipactor in microwave devices. *IEEE Microw Wirel Compon Lett* 2014;24(11):730–2.
- [13] Wilkerson JR, Gard KG, Schuchinsky AG, Steer MB. Electro–thermal theory of intermodulation distortion in lossy microwave components. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2008;56(12):2717–25.
- [14] Chen X, Wang L, Pommerenke D, Yu M. Passive Intermodulation on coaxial connector under electro–thermal–mechanical multiphysics. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2021;70(1):169–77.
- [15] Ansuinelli P, Schuchinsky AG, Frezza F, Steer MB. Passive intermodulation due to conductor surface roughness. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2018;66(2):688–99.
- [16] Zhao X, He Y, Ye M, Gao F, Peng W, Li Y, et al. Analytic passive intermodulation model for flange connection based on metallic contact nonlinearity approximation. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2017;65(7):2279–87.
- [17] Vicente C, Hartnagel H. Passive-intermodulation analysis between rough rectangular waveguide flanges. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2005;53(8):2515–25.
- [18] Bahrami M, Culham J, Yovanovich M. Modeling thermal contact resistance: a scale analysis approach. *J Heat Transf* 2004;126(6):896–905.
- [19] Bailey GC, Ehrlich AC. A study of RF nonlinearities in nickel. *J Appl Phys* 1979;50(1):453–61.
- [20] Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Trans Magn* 2002;24(1):621–30.
- [21] Chen X, He Y. Reconfigurable passive intermodulation behavior on nickel-coated cell array. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2017;59(4):1027–34.
- [22] Henrie J, Christianson AJ, Chappell WJ. Linear–nonlinear interaction and passive intermodulation distortion. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2010;58(5):1230–7.
- [23] Henrie J, Christianson A, Chappell WJ. Engineered passive nonlinearities for broadband passive intermodulation distortion mitigation. *IEEE Microw Wirel Compon Lett* 2009;19(10):614–6.
- [24] Guo H, Yao Y, Xie Y. Evaluation of passive intermodulation from multiple connectors with generalized network method. *IEEE Microw Wirel Compon Lett* 2021;31(3):312–5.
- [25] Jin Q, Gao J, Flowers GT, Wu Y, Xie G. Modeling of passive intermodulation with electrical contacts in coaxial connectors. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2018;66(9):4007–16.
- [26] Jin Q, Gao J, Flowers GT, Wu Y, Xie G, Bi L. Modeling of passive intermodulation in connectors with coating material and iron content in base brass. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2019;67(4):1346–56.
- [27] Shitvov AP, Zelenchuk DE, Schuchinsky AG, Fusco VF. Passive intermodulation generation on printed lines: near-field probing and observations. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2008;56(12):3121–8.
- [28] Shitvov AP, Olsson T, Banna BE, Zelenchuk DE, Schuchinsky AG. Effects of geometrical discontinuities on distributed passive intermodulation in printed lines. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2010;58(2):356–62.
- [29] Rocas E, Collado C, Orloff ND, Mateu J, Padilla A, O’Callaghan JM, et al. Passive intermodulation due to self-heating in printed transmission lines. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2011;59(2):311–22.
- [30] Zelenchuk DE, Shitvov AP, Schuchinsky AG, Fusco VF. Passive intermodulation in finite lengths of printed microstrip lines. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2008;56(11):2426–34.
- [31] Kozlov DS, Shitvov AP, Schuchinsky AG, Steer MB. Passive intermodulation of analog and digital signals on transmission lines with distributed nonlinearities: modelling and characterization. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2016;64(5):1383–95.
- [32] Vicente C, Wolk D, Hartnagel HL, Gimeno B, Boria VE, Raboso D. Experimental analysis of passive intermodulation at waveguide flange bolted connections. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2007;55(5):1018–28.
- [33] Liu Y, Mao YR, Xie YJ, Tian ZH. Evaluation of passive intermodulation using full-wave frequency-domain method with nonlinear circuit model. *IEEE Trans Veh Technol* 2016;65(7):5754–7.
- [34] Mao YR, Liu Y, Xie YJ, Tian ZH. Simulation of electromagnetic performance on mesh reflector antennas: three-dimensional mesh structures with lumped boundary conditions. *IEEE Trans Antennas Propag* 2015;63(10):4599–603.
- [35] Figueiredo R, Carvalho NB, Piacibello A, Camarchia V. Nonlinear dynamic RF system characterization: envelope intermodulation distortion profiles—a noise power ratio-based approach. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2021;69(9):4256–71.
- [36] Chen X, Sun D, Cui W, He Y. A folded contactless waveguide flange for low passive-intermodulation applications. *IEEE Microw Wirel Compon Lett* 2018;28(10):864–6.
- [37] Henrie J, Christianson A, Chappell WJ. Cancellation of passive intermodulation distortion in microwave networks. In: *Proceedings of 2008 38th European Microwave Conference*; 2008 Oct 27–31; Amsterdam, Netherlands. IEEE; 2008. p. 1153–6.
- [38] Waheed MZ, Korpi D, Anttila L, Kiayani A, Kosunen M, Stadius K, et al. Passive intermodulation in simultaneous transmit–receive systems: modeling and digital cancellation methods. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2020;68(9):3633–52.
- [39] Jin Q, Gao J, Huang H, Bi L. Mitigation methods for passive intermodulation distortion in circuit systems using signal compensation. *IEEE Microw Wirel Compon Lett* 2020;30(2):205–8.
- [40] Miao X, Tian L. Digital cancellation scheme and hardware implementation for high-order passive intermodulation interference based on Hammerstein model. *China Commun* 2019;16(9):165–76.
- [41] Keehr EA, Hajimiri A. Successive regeneration and adaptive cancellation of higher order intermodulation products in RF receivers. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2011;59(5):1379–96.
- [42] IEC62037: Passive RF and Microw devices intermodulation level measurement. International standard. Geneva: International Electrotechnical Commission; 2021.
- [43] Wilkerson JR, Gard KG, Steer MB. Automated broadband high-dynamic-range nonlinear distortion measurement system. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2010;58(5):1273–82.
- [44] Waheed MZ, Campo PP, Korpi D, Kiayani A, Anttila L, Valkama M. Digital cancellation of passive intermodulation in FDD transceivers. In: *Proceedings of 2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*; 2018 Oct 28–31; Pacific Grove, CA, USA. IEEE; 2018. p. 1375–81.
- [45] Wetherington JM, Steer MB. Robust analog canceller for high-dynamic-range radio frequency measurement. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2012;60(6):1709–19.
- [46] Range to fault (RTF) [Internet]. Spokane Valley: Kaelus; c2020 [cited 2021 Aug 30]. Available from: <https://www.kaelus.com/en/test-measurement-solutions/portable-pim-testing/range-to-fault-rtf-en>.
- [47] PIM rack analyzer [Internet]. Fridolfing: Rosenberger; c2018 [cited 2021 Aug 30]. Available from: <https://www.rosenberger.com/product/pim-rack-analyzer/>.
- [48] anritsu.com [Internet]. Kanagawa: Anritsu; c2022 [cited 2021 Aug 30]. Available from: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/support/downloads?model=MW82119B>.
- [49] Hienonen S, Vainikainen P, Raisanen AV. Sensitivity measurements of a passive intermodulation near-field scanner. *IEEE Antennas Propag Mag* 2003;45(4):

- 124–9.
- [50] Hienonen S, Golikov V, Vainikainen P, Raisanen AV. Near-field scanner for the detection of passive intermodulation sources in base station antennas. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2004;46(4):661–7.
- [51] Shitvov AP, Zelenchuk DD, Schuchinsky AG, Fusco VF, Buchanan N. Mapping of passive intermodulation products on microstrip lines. In: *Proceedings of 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*; 2008 Jun 15–20; Atlanta, GA, USA. IEEE; 2008. p. 1573–6.
- [52] Oonishi K, Kuga N. A consideration of sensitivity of non-contact PIM measurement using a coaxial probe. In: *Proceedings of 2008 Asia-Pacific Microwave Conference*; 2008 Dec 16–20; Hong Kong, China. IEEE; 2008. p. 1–4.
- [53] Yang S, Wu W, Xu S, Zhang YJ, Stutts D, Pommerenke DJ. A passive intermodulation source identification measurement system using a vibration modulation method. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2017;59(6):1677–84.
- [54] Zhang M, Zheng C, Wang X, Chen X, Cui W, Li J, et al. Localization of passive intermodulation based on the concept of k -space multicarrier signal. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2017;65(12):4997–5008.
- [55] Aspden PL, Anderson AP, Bennett JC. Microwave holographic imaging of intermodulation product sources applied to reflector antennas. In: *Proceedings of 1989 Sixth International Conference on Antennas and Propagation*; 1989 Apr 4–7; Coventry, UK. IET; 1989. p. 463–7.
- [56] Aspden PL, Anderson AP. Identification of passive intermodulation product generation on microwave reflecting surfaces. *IEE Proc H* 1992;139(4):337–42.
- [57] Aspden PL, Anderson AP, Bennett JC. Evaluation of the intermodulation product performance of reflector antennas and related structures by microwave imaging. In: *Proceedings of 1989 19th European Microwave Conference*; 1989 Sep 4–7; London, UK. IEEE; 1989. p. 853–8.
- [58] Yong S, Yang S, Zhang L, Chen X, Pommerenke DJ, Khilkevich V. Passive intermodulation source localization based on emission source microscopy. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2020;62(1):266–71.
- [59] Chen X, An L, Yu M, Pommerenke DJ. Waveguide cell with water filling for passive intermodulation localization on planar circuits. *IEEE Microw Wirel Compon Lett* 2021;31(11):1247–50.
- [60] Cai Z, Zhou Y, Liu L, Qi Y, Yu W, Fan J, et al. Small anechoic chamber design method for on-line and on-site passive intermodulation measurement. *IEEE Trans Instrum Meas* 2020;69(6):3377–87.
- [61] Cai Z, Zhou Y, Liu L, Paulis FD, Qi Y, Orlandi A. A method for measuring the maximum measurable gain of a passive intermodulation chamber. *Electronics* 2021;10(7):770.
- [62] Denisowski P. *Understanding PIM*. Report. Munich: Rohde & Schwarz; 2019 Nov.
- [63] ITU-R SM.1446: Definition and measurement of intermodulation products in transmitter using frequency, phase, or complex modulation techniques. International standard. Geneva: Radiocommunication Sector of ITU; 2011.
- [64] Kim JT, Cho IK, Jeong MY, Choy TG. Effects of external PIM sources on antenna PIM measurements. *ETRI J* 2002;24(6):435–42.
- [65] Shi C, Sánchez-Sinencio E. On-chip two-tone synthesizer based on a mixing-FIR architecture. *IEEE J Solid-State Circuits* 2017;52(8):2105–16.
- [66] Yoshida S, Kuga N. A planar band rejection filter composed of slit-loaded side-coupled filter for 3rd-order PIM measurement. In: *Proceedings of 2009 Asia Pacific Microwave Conference*; 2009 Dec 7–10; Singapore. IEEE; 2009. p.2613–6.
- [67] Smacchia D, Soto P, Guglielmi M, Morro JV, Boria V, Raboso D. Implementation of waveguide terminations with low-passive intermodulation for conducted test beds in backward configuration. *IEEE Microw Wirel Compon Lett* 2019;29(10):659–61.
- [68] Maheshwari P, Kajbaf H, Khilkevich VV, Pommerenke D. Emission source microscopy technique for EMI source localization. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2016;58(3):729–37.
- [69] Zhang L, Khilkevich VV, Jiao X, Li X, Toor S, Bhohe AU, et al. Sparse emission source microscopy for rapid emission source imaging. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2017;59(2):729–38.
- [70] Sørensen M, Kajbaf H, Khilkevich VV, Zhang L, Pommerenke D. Analysis of the effect on image quality of different scanning point selection methods in sparse ESM. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2019;61(6):1823–31.
- [71] Zhang Y, Luo Q, Zhu Y, Liu L. Development of conductive expanded polypropylene rigid foam for OTA test chamber. *Saf EMC* 2017;16:59–62.
- [72] Bolli P, Selleri S, Pelosi G. Passive intermodulation on large reflector antennas. *IEEE Antennas Propag Mag* 2002;44(5):13–20.
- [73] Smacchia D, Soto P, Boria VE, Guglielmi M, Carceller C, Ruiz Garnica J, et al. Advanced compact setups for passive intermodulation measurements of satellite hardware. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2018;66(2):700–10.