

文章编号: 2095-4980(2023)07-0864-08

高效无源互调建模仿真中的统计方法

陈 雄^{1,2}, 贺永宁³, 于 明¹

(1. 南方科技大学 电子与电气工程系, 广东 深圳 518055; 2. 香港中文大学 电子工程系, 香港 沙田 999077;
3. 西安交通大学 电子信息学部微电子学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 在现代大功率通信干扰问题中, 无源器件的非线性杂散干扰机理最为复杂, 在现代大功率高密度的通信系统中越来越受到重视。面对无源器件的典型非线性效应之无源互调(PIM)问题, 本文从PIM产生机理、建模角度梳理了近年来国内外普遍的PIM建模方法及关键步骤。针对几种典型微观界面等效、PIM数值转换方法以及面向工况条件的微波部件建模问题, 总结了现有的可行方法。进一步提出了基于统计方法分析动态PIM区间预测分析方法的思路, 该方法同样基于微观统计方法, 对接触界面的不可具体量化的界面问题进行建模, 最终获得工况条件下接触PIM的统计分布区间及其产物概率, 为实际工况条件下微波部件PIM预测提供了一种大样本分析方法, 为进一步提高实际微波部件的PIM稳定性提供了参考。

关键词: 无源互调; 非线性; 微观界面分析; PIM统计预测

中图分类号: TN98

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022196

Statistics methodology in efficient modeling and simulation of Passive Intermodulation

CHEN Xiong^{1,2}, HE Yongning³, YU Ming¹

(1. Department of Electronic Electrical and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen Guangdong 518055, China; 2. Department of Electronic Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Shatin Hong Kong 999077, China; 3. School of Microelectronics, Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: In modern high power communication distortion problems, the nonlinear mixing distortion effect in passive devices is always the most difficult to investigate, and it has attracted great interests in the modern high power and high density wireless communication system. Facing the typical nonlinear effect on passive device, Passive Intermodulation(PIM), this work concludes the common modeling methods and the important steps in PIM mechanism researches in recent years. In particular, targeting to the typical microscopic contact equivalence, PIM numerical transformation, and PIM prediction method in the engineered cases, the available methods are concluded for present, while a statistics based PIM prediction method for engineered device with dynamic range is proposed for the first time. This method can model the specific contact sources by using statistic strategy. The PIM prediction can be expressed as a statistical interval with the probability of each PIM value. This method can provide a big sample data for the engineered PIM prediction, and can guide the optimization of the PIM stability by controlling the detailed parameters.

Keywords: Passive Intermodulation; nonlinearity; microscopic interface analysis; statistical PIM prediction

无源互调(PIM)是指当2个或多个大功率信号通过无源器件时, 无源器件自身非线性特性在载波激励下产生新的互调频谱成分, 一旦互调成分落入接收通带, 尤其以距离信号频点最近的三阶交调信号为主, 引起接收通

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2023-04-24

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(62271240); 国家重点实验室基金2021-JCJQ-LB-006资助项目(6142411122115)

道信号失真的一种现象^[1]。随着现代低轨道卫星互联网及星座、高集成度小型化的微波收发前端的蓬勃发展，现代微波器件的功率/体积比显著增大，导致功率密度显著提升；同时由于现代大量普及的无线接入设备导致的频谱资源的高密度复用，PIM 导致的干扰问题越发显著且复杂^[2-3]。作为频谱干扰的典型产物，PIM 干扰会导致接收机灵敏度大大降低，通信误码率增大，信噪比减小，造成通信系统性能严重降低^[4]，通信效率与质量急剧下降，是当前大功率高灵敏度收发机面临的巨大挑战。

PIM 的成因多种多样，其本质是射频信号经过非线性器件之后导致的混频干扰。目前无源非线性源的分类主要为接触非线性和材料非线性^[2]。材料非线性是由磁滞性材料，如铁、镍和铁氧体等引起的，这种非线性源可以通过更换材料避免。而接触非线性是由金属未可靠接触或接触不良等造成，同时接触型 PIM 还融合了机械界面变形等问题，因此其分析更复杂、更困难，也是迄今为止众多通信系统中无法避免且又分析难度极高的非线性源^[5]。由此，针对接触非线性进行分析是解决 PIM 问题的重要渠道和途径，也是迄今为止 PIM 研究领域的长期难点热点问题。PIM 研究问题的最重要、最关键和实用的一步是对 PIM 进行准确建模仿真，获得 PIM 理论分析工具。获取高效的 PIM 建模分析方法后，可通过理论模型将 PIM 与多关联参数进行量化，进而反向指导无源器件设计，达到从源头抑制 PIM 的效果。与此同时，以非线性理论模型为基础，结合微波器件的电磁特性分析，可获得具体干扰场景下的 PIM 行为的分析方法。

本文梳理了近年来无 PIM 建模仿真方法中的关键步骤，从非线性产生机理出发，对常见 PIM 的电接触模型进行总结，针对具体接触对象的 PIM 的量化方式以及非线性的数值量化建模方法进行分析，最后针对实际微波器件的分布非线性源进行说明。结合实际工况环境下的多参数分布及统计特征，创新性地提出一种基于概率统计方法的 PIM 建模仿真方法；尤其针对工况环境界面参数多变且不可量化问题，通过数值重构获得了接触界面数值化特征，提出了一种预测 PIM 产物分布值及其分布概率的新方法。该方法可为实际工况场景中及微观界面不可具体量化条件下的 PIM 点源及 PIM 激励场二维不均匀的情况提供理论和实践指导。

1 非线性模型

无源非线性是非线性 PIM 干扰的本质，准确高效提取出底层的非线性模型是分析 PIM 的关键步骤。目前通信系统种类繁多，其应用场景也各不相同，但接触非线性是绝大多数 PIM 分析场景的关键对象。本文针对 PIM 中的接触等效问题进行讨论，将几种典型的微观接触模型作为基础对象，分析总结几种微观等效模型的优缺点。

1.1 威布尔分布曲面模型

Wang X B 等利用威布尔分布曲面模型，针对接触非线性问题分析了粗糙圆波导法兰间的 PIM^[6]，并基于泰勒展开式建立了非线性模型，将接触曲面的压力、粗糙度以及层厚等参数与非线性分析结合，分析了外加压力、粗糙度以及层厚等因素对 PIM 产物水平的影响。模型中假定金属面的粗糙高度(z)呈现威布尔分布，并基于半球体与刚性面接触等效。如图 1 所示，假设威布尔零平面定义在一个表面凹凸不平的底部，其中 w 为干涉距离， d 为凸起顶部高度平均值与光滑面之间的距离， R 为凸起半径。对于威布尔模型，凸起高度的统计概率分布密度为：

$$\varphi_w(z) = \frac{\beta_w z^{\beta_w - 1}}{\eta_w^{\beta_w}} e^{-\left(\frac{z}{\eta_w}\right)^{\beta_w}}, z > 0 \quad (1)$$

式中： β_w 为威布尔分布的形状参数； η_w 为比例参数。

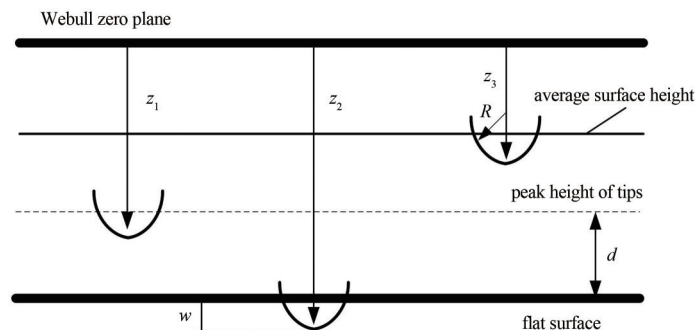


Fig.1 Surface model of Weibull distribution
图 1 威布尔分布的表面模型

凸起高度的标准差 σ_s 与 β_w 、 η_w 有关, 同时还与凸起的平均半径 R_a 有关:

$$\sigma_s = \left(\frac{\pi}{2}\right) R_a \quad (2)$$

基于上述假设, 为求解模型可以通过微观界面测量获得表面界面分布特性, 由此确定微观凸起的半径和高度分布, 进而决定分布的形状参数和比例参数。至此, 相应的微观力学模型提供了在机械载荷作用下的凸起变形特性, 可由此确定接触面面积和施加载荷的关系, 即不同压力下分布面的接触情况。这种模型假设条件为非对称曲面等效, 该种等效基于接触面简化处理, 并不能模拟实际接触界面双面突起情况, 由此导致一定的等效模拟误差, 且部分参数需要借助微观表征实现提取。

1.2 高斯分布模型

针对威布尔分布的近似简化过程, 高斯分布在接触对象的应用中改进了等效误差问题。高斯分布是自然世界中典型的自然分布规律, 对于绝大多数自然条件下的金属界面(排除机械加工对表面处理后的周期性纹路后), 微观接触界面基本呈现高斯正态分布突起, 尤其适合使用高斯分布进行分析。Zhao X L 等对金属-绝缘体-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)接触非线性产生的 PIM 产物进行了解析建模和实验验证^[7]。利用高斯分布接触模型, 解析出 MIM 接触面积随接触压力变化的规律, 同时导出了 MIM 接触的压力相关非线性电流-电压(Current-Voltage, $I-U$) 方程。在该等效中, 接触阻抗假定由接触电阻决定, 进一步利用非线性 $I-U$ 方程以及接触电阻解析公式, Zhao X 等提出了一种基于金属接触非线性的 PIM 产物点源模型, 并通过对矩形波导 PIM 产物的计算分析验证了该模型, 实验与理论结果吻合良好。

进一步, 基于高斯类似分布规律演变出 GW(Greenwood-Williamson)模型^[8], 其基本定义是基于两粗糙金属面接触被等效为一个粗糙平面和一个光滑平面接触。同样对于等效的粗糙平面, 其凸起高度服从高斯分布:

$$\varphi = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式中 σ 为高斯分布的标准差, 可通过微观界面扫描获得。

在压力导致界面形变条件下, 如图 2 所示, 其中 x_c 为金属氧化物(绝缘体)的厚度, ω 为两接触面相对移动距离, 金属面的接触情况会发生改变, 对应非线性程度也不同。同样, 这种模型依然需要具体的凸起参数, 如数量、凸起半径等, 参数繁多且在某些接触复杂情况下难以直接获得。

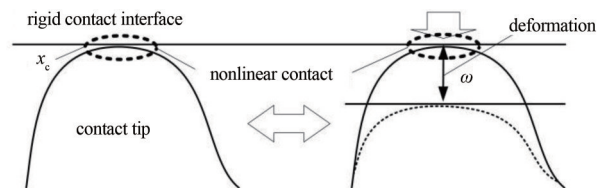


Fig.2 Metal-insulator-metal contact model
图2 金属-绝缘体-金属接触模型

1.3 WM 模型

针对上述 2 种源于接触界面实际条件的等效模型, 描述接触界面的 WM(Weierstrass-Mandelbrot)模型则基于分形几何学提出。该模型假设所识别的分形接触的粗糙度与表面尺度没有强相关关系, 仅需单个尺度的粗糙参数就可以预测推广至整个分形范围内的形貌特征。Zhang K 等针对微波连接器非线性接触的无源互调问题^[9], 提出一种基于 WM 模型且可有效提高 PIM 计算精确度的有效方法。该方法利用三维粗糙表面的 WM 模型, 得到了 WM 模型粗糙表面的包含多个参数的函数表达式, 并重构绘制了三维图像; 之后采用有限元方法对粗糙表面进行建模, 分析接触面上的接触应力分布关系, 并进一步计算了不同加载条件下的接触应力和实际接触面积; 然后根据电接触理论和金属-金属微接触的物理效应, 推导了非线性接触结电参数, 得到了等效电路模型; 最后建立了非线性 $I-U$ 关系, 并以解析形式揭示了由接触非线性导致的三阶 PIM 功率电平。

上述 3 种微观接触模型是较为经典的等效方法, 其中威布尔曲面模型的建模输入参数为施加的压力、粗糙度、层厚度等, 模型输入条件完全依赖于接触界面的实际测量。相对应地, 高斯分布模型适合于分析微观接触界面存在高斯正态分布突起的情况, 模型输入参数为接触面形貌、凸起数量、凸起半径、表面粗糙度、接触金属硬度等。WM 模型基于分形几何学, 模型输入参数为样本长度、粗糙表面单向波纹数、几何间隔频率、表面

粗糙度等。这几种方法常被用于接触界面建模以及接触 PIM 建模中。这些模型基于电接触理论，并进一步分析接触界面参数，但还需借助非线性产物的数值建模方法，才能得到 PIM 产物。微观界面的直接测量以及量化过程一直是 PIM 产物分析的基础，微观界面参数提取的准确性与否也会直接影响后续 PIM 数值的预测结果。结合实际微波器件的接触界面往往存在接触不可逆变化，如金属界面对压之前与之后往往发生变化，如何分析接触界面的演变行为成为未来 PIM 分析的关键问题。

2 PIM 数值建模方法

对微观接触界面等效分析之后，还需将微观界面发生的非线性行为转换为 PIM 产物，由此 PIM 建模的数值转换方法成为建立从非线性底层机理到 PIM 产物之间的重要桥梁。传统的 PIM 数值建模方法是从非线性数学表达式入手将 PIM 进行量化，关于非线性特性的数值转换方法有很多，并由此演变出多种关于非线性特性的等效模型，如最常见的多项式模型、双指数模型及幂级数模型等。

2.1 多项式及分段多项式模型

目前应用最多的 PIM 数值建模方法为多项式拟合，该方法采用非线性拟合方式，对多种影响参数非线性特性直接进行拟合；还可以结合优化设计实验方法，排除非主要因素并获取显著条件下的主要非线性输入输出变量，由此建立非线性参数与非线性特性的关联模型。该类关联模型基于经验参数方法，可获得界面参数直接关联非线性模型，并可以结合实验校验调整模型精确度。

Zhang L 等提出了一种分段多项式模型，用以精确计算高阶 PIM 产物的功率^[10]。通过将双载波信号代入奇数阶幂多项式，并应用奇数阶 PIM 产物频率条件，推导出 PIM 产物的多项式模型。该模型充分考虑了不同 PIM 产生机制对载波功率的依赖性，并通过微带传输线的实测数据与计算结果，验证了该模型的有效性。与多项式模型相比，分段模型采用的阶数更低，且所需的测量数据量也更少。此外，通过此模型，还可通过低阶 PIM 产物的实测结果预测高阶 PIM，从而节约直接测试高阶 PIM 产物所需的成本。

2.2 双指数模型

Jiang J H 提出了采用双指数模型分析无源元件的非线性特性^[11]，并利用贝塞尔公式分别推导出不同情况下预测高阶 PIM 功率电平的一般表达式。该模型采用遗传算法拟合函数的非线性系数过程，并根据三阶 PIM 的测量数据进行数值计算，校正模型参数系数，并由此预测了五阶 PIM 功率电平。通过将计算结果与实验数据进行比较，验证了算法的有效性和正确性。该研究证明了遗传算法在 PIM 失真功率预测中的优越性，可显著提高模型拟合效率，同时双指数模型也被证明可较高还原非线性传输过程。

2.3 幂级数扩展模型

幂级数法是拟合非线性曲线的基本方法，广泛用于分析非线性传输特性问题^[12-13]。使用中只需要将输出进行幂级数展开，进一步基于实验测试数据得到非线性拟合关系^[13]。但拟合方法和数据有效性也直接决定了数值模型的准确性，拟合阶数的截断也决定了拟合的精确度，并进一步决定了 PIM 预测的准确性。

张凯等给出了基于幂级数多项式展开模型的扩展模型^[14]，扩展的高阶幂级数模型描述的三次谐波功率与输入功率不再呈现理想线性增长关系。最后通过确定模型参数，对不同功率的输入信号产生的三次谐波功率值进行了预测。

上述 3 种典型数值模型方法都需要结合实验数据确定待定系数值，同时幂级数模型参数的计算也可以通过实测少量数据进行逆推获得。一个拟合参数的获取需要通过一次测量试验，测试值越多，模型精确度越高，与此同时，模型的复杂度也越高。最后测试结果表明，如果得到 m 套 PIM 测试数据，则可以确定 $n(n \leq m)$ 个模型参数值。

3 全链路的 PIM 建模预测方法

实际的 PIM 产物特性不仅依赖于器件特性，还需要考虑实际信号传播路径中激励信号与 PIM 信号的传播与演化。相比于传统 PIM 产物的传导问题，辐射场景是非常典型的 PIM 产物研究场景，绝大多数 PIM 干扰都发生在辐射场景中。在辐射场景下，PIM 研究的重点不仅是 PIM 如何产生，线性信号和 PIM 产物传播效应也尤为重要。在辐射场中，无源器件(如天线等)既是 PIM 信号的接收机，又是 PIM 信号的发射器。这种情况下，空间辐射效应会导致 PIM 收发信号重叠，PIM 分析复杂。随着当前空间频谱资源的混杂，相比传导封闭通道中的恒定电磁场

场景，辐射场带来的耦合衰减效应更为复杂。

针对实际微波部件中的 PIM 问题，典型微波器件 PIM 产物往往来源于多个非线性点源的叠加。而待分析对象自身和所处环境的电磁特征会影响信号的传播过程。研究中需结合机理模型，完成从非线性效应分析到最后获得典型场景的 PIM 产物评估的全链路分析过程。该过程既要解决线性信号的传播问题，也要解决非线性信号的产生与传播过程。由此全链路的 PIM 产生、传播及合成问题已是 PIM 研究中必须解决的问题，也是标准化 PIM 建模仿真中的关键步骤。

针对实际微波部件的多分布非线性源问题，Jin Q Y 提出了一种多个非线性源和无损传输的改进 PIM 模型^[15]，以评估串联情况下反射的 PIM 产物。该工作中，假设所有非线性源串联且每个非线性源具有相同的 PIM 特性，对多个非线性源的反向 PIM 总电压幅值以及 PIM 功率进行计算建模，提出了非线性源间距和连接数对 PIM 行为影响的等效电路仿真模型，并使用该模型进行了谐波平衡仿真分析。通过实验测量与理论计算结果对比，验证了模型的有效性，且结果拟合较好，平均差在 0.5 dB 内。针对相同的多源合成问题，Zhang S Q 基于泰勒多项式方法建立了多分布 PIM 源的电路模型^[16]。通过假设 PIM 源串联在信号回路中，计算推导了反向 PIM 功率和正向 PIM 功率的表达式，对多个 PIM 源进行叠加，得到了反向传输非线性总电压与正向传输总电压的表达式。上述 2 种方法都成功对 PIM 源呈现一维分布情况下进行了解析。但大多数情况下，非线性源呈现二维甚至三维分布，这需要综合考虑多分布非线性源的不均匀分布、PIM 产物的不均匀传播与合成问题等。

B Rupakula 和 G Rebeiz 基于分布的相控阵场合理论对处在三维空间中的分布非线性源导致的 PIM 问题进行了理论分析^[17]，同时基于 28 GHz 5G 相控阵进行了模型详细验证。如图 3 所示，该分析将相控阵若干分布阵元等效为非线性元，模拟 PIM 的二维排布，并通过对空间信号的接收，模拟 PIM 信号的合成过程。此模型只需输入各二维点源的幅值与各阵列间距，就可以得到不同方向上的合成源。基于该模型，可将不均匀非线性源分布到不同阵元中，并进一步模拟不同非线性强度条件下的 PIM 合成问题，可以启发实际微波部件中不均匀非线性源分布条件下 PIM 求解问题。

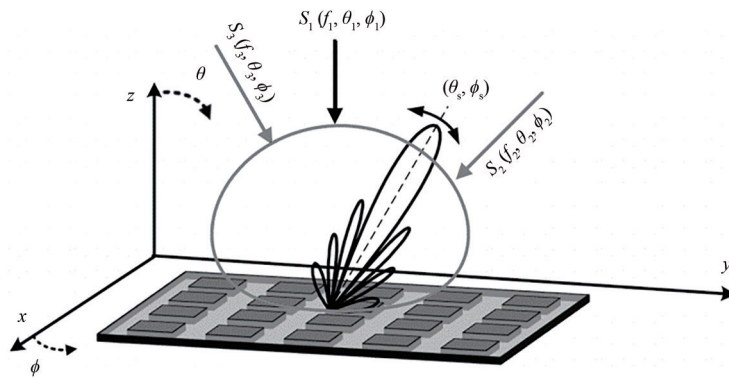


Fig.3 Phased array with multiple signals
图3 多个入射信号激励下的相控阵

4 面向工况条件的基于统计概率的无源互调建模仿真方法

基于上述分析，不均匀场与不均匀非线性源分布是目前实际场景(工况场景)PIM 分析的关键难点问题。已有的器件级 PIM 建模方法出于简化分析需求，对激励场的等效较为理想化，未考虑不同 PIM 点源特性在不同激励条件下的 PIM 问题，尤其不适合实际工况场景下器件所处的复杂以及参数多变环境下的 PIM 分析。与此同时，实际的工况环境导致非线性源存在点源特性不同且激励条件也不同，加之从生产制造到装配使用过程带来的微观界面不确定性，工况环境下的 PIM 问题一直难以高效解决。基于非线性源与激励条件的双重不均匀问题，本文提出了一种可以模拟工况偏差条件的 PIM 产物波动的统计建模仿真方法。该方法考虑了辐射场景下信号传播与演化过程，针对金属接触 PIM，结合场路分析方法，实现了全链路的 PIM 仿真预测。

传统非线性接触凸起在接触表面施加载荷时，凸起会发生变形，接触情况也会随之发生变化。可采用通用的多项式数值拟合方法，将此 PIM 点源用泰勒级数表示，即

$$J_{\text{MIM}} = \sum_{i=0}^{\infty} c_i U^i = c_0 + c_1 U^1 + c_2 U^2 + c_3 U^3 + c_4 U^4 + \dots \quad (4)$$

式中： J_{MIM} 为通过接触点的电流密度； U 为接触单元 2 个凸起之间的电压降。假定通过各个 PIM 点源的电流可看

作是独立的，则 U 可以看作被载波信号激发的电流在凸起两端引起的电压降。设双载波频率分别为 f_1 、 f_2 ，在接触点处，其对应激发的电流引起的压降分别为 U_1 、 U_2 。大多数情况下，接近载波频带的三阶互调是造成通信质量下降的主要互调干扰，忽略高阶贡献，在各点源处，三阶互调产物 ($2f_1 - f_2$) 可表示为：

$$J_{\text{MIM3}} = \frac{3}{4} c_3 U_1^2 U_2 \quad (5)$$

式(5)中，系数 c_3 可以通过测量不同压力下金属接触点的直流非线性 $I-U$ 特性计算得出。通过与 $I-U$ 非线性曲线进行拟合，可以得到接触点电流关于压力、凸起间电压的函数 $I=f(F, U)$ 。将函数关于电压进行泰勒级数展开，最终得到 c_3 。式(5)中 U_1 、 U_2 的大小与接触半径、凸起顶端半径及凸起因受力而产生的形变量有关^[18]。在考虑实际工况下的不同点源 PIM 特性时，具体测量每个微观接触单元上的凸面高度、压力和电阻是不可实现的。鉴于蒙特卡洛模拟接触点压力分布具有适合重构随机接触的可能，可以利用蒙特卡洛模拟计算这些接触单元参数的随机分布。结合接触界面扫描分析得到的整体接触凸起的分布参数(凸起高度均值、方差等)，可以重构出接触面上各个点处的接触情况及受力情况，从而模拟出各点的 PIM 情况。

假设接触界面的凸起高度呈正态分布，即

$$\phi(z) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (6)$$

式中： z 为凸起高度； $\phi(z)$ 为高度值对应的分布概率； μ_z 和 σ_z 分别为测量得到的界面凸起高度的均值和方差。通过此分布表达式，可对凸起高度进行分布重构，即

$$\mathbf{z} = \begin{pmatrix} \mu_h \\ \mu_h \\ \vdots \\ \mu_h \end{pmatrix}_{N \times 1} + \sigma_z \times \text{rand}N \quad (7)$$

式中： \mathbf{z} 为由不同接触点处的突起高度组成的列向量； $\text{rand}N$ 为由标准正态分布随机序列组成的 N 维列向量； N 为界面凸起个数。得到高度分布情况后，可进一步重构出接触压力大小。假设接触界面原始接触凸起高度与对压后突起表面压力大小成正比：

$$F = 2\pi\beta H(z - d) \quad (8)$$

式中： β 为微小凸起顶端球面半径； H 为金属硬度； d 为两接触面间的缝隙距离(可通过仿真计算获得)。通过接触压力与接触高度的正比关系，进而可将微观接触压力的分布效果，即压力标准差表示为接触凸起的高度标准差的函数，即

$$\sigma_F = 2\pi\beta H\sigma_z \quad (9)$$

结合整体接触面总接触压力和接触突起宏观数量，可得到微观压力均值；再由微观接触面粗糙情况得到压力分布情况(均值与标准差)后，便可实现对接触压力重构，即利用计算机重建满足接触点压力均值和标准差的随机压力分布序列。将重构出的接触压力样本逐个代入微观点接触非线性模型中，最后将各个接触突起点的 PIM 进行相加，从而获得整体的 PIM 产物幅值。其中单点非线性的产生和传播过程可使用全波仿真获得载波至单点非线性的传播系数，也可以通过全波仿真获得单点非线性源 PIM 产物至测试端口的传播系数，进而获得整个闭环的全链路 PIM 仿真，整个建模仿真过程如图 4 所示。在整个预测过程中，每次重构将会得到一个最终的器件级 PIM 值，多次重构后，所有 PIM 值会呈现为一个分布特性，由此每个 PIM 值都将具有一定的概率。通过此方法得到的最终预测并非单一的数值，而是针对同一种工艺、同一批加工的产品 PIM 波动统计概率区间。

为验证本文提出的统计预测 PIM 方法，设计了如图 5 所示的待测器件(Device Under Test, DUT)及验证测试装置。该 DUT 由 2 块金属对压形成接触面，对压结构上使用介质螺钉控制扭矩，实现接触压力控制。采用低 PIM 天线(2 560~2 690 MHz)在辐射环境中对该 DUT 进行 PIM 测试，当输入载波频率为 2 620 MHz 及 2 676 MHz，载波功率为 43 dBm 时，测得天线与 DUT 距离为 2 cm 下的 DUT PIM 值为 -98 dBm。使用本文提出的概率预测方法对该辐射场景下的 DUT 的 PIM 进行计算，共进行 1 000 次统计重构，最终 PIM 概率分布结果如表 1 所示。从表 1 可知，预测的 PIM 范围为 -105~-93 dBm，其中概率最高的 PIM 值为 -99 dBm，对应概率为 22.6%。实测 PIM 值恰好落入该预测区间，且靠近预测概率最大值附近，对应概率为 21.3%。

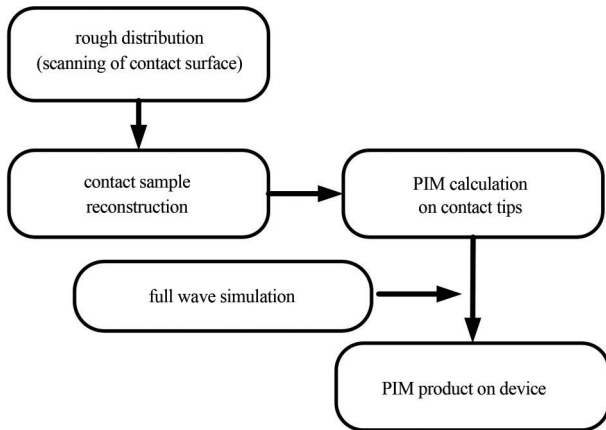


Fig.4 PIM simulation process based on probability and statistics
图4 基于概率统计的PIM仿真过程(单次仿真获得单一值)

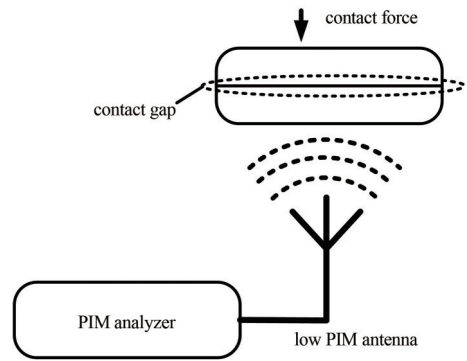


Fig.5 PIM measurement for DUT with low-PIM antenna
图5 采用低PIM天线的DUT PIM测量

表1 PIM 预测结果

Table1 Prediction results of PIM

PIM product/dBm	-105	-104	-103	-102	-101	-100	-99	-98	-97	-96	-95	-94	-93
PIM probability/%	0.3	0.7	2.2	4.8	9.5	16.0	22.6	21.3	12.1	6.7	2.7	1.0	0.1

基于界面统计特性的PIM计算方法，引进蒙特卡洛原理对界面凸起进行重构。大样本下随着重构次数不同，出现不同分布的PIM产物频数，并可进一步成为PIM概率，对应了实际工况下的微观界面不确定性及PIM的波动性。不同于目前大多预测方法的单一预测结果，上述预测方法获得的合成器件级PIM处于区间范围内且每个PIM值都可以对应不同概率。在实际微波部件的生产制造及使用过程中，结合PIM波动概率的特定参数条件的控制，可实现PIM产物的稳定性增强，由此可指导实际工况环境中的PIM产物稳定性优化。该项方法对统计预测器件PIM产物潜在在区间、指导器件低PIM设计、降低产品波动性具有重要的实际指导意义。

上述方法主要针对微观界面的统计特性以及实际工况产品PIM产物波动特性提出，基本原理是从微观界面的统计特性出发，结合界面特性分析完成PIM产物传播的全链路分析过程。本方法所获得PIM产物可以以概率形式呈现。相比于传统的PIM仿真方法，主要区别是引入了界面微观特性的统计特性分析，由此通过统计特性重构了不可具体测试量化的接触样本，实现了由微观样本特性推导出PIM产物分布特性及概率。本方法尤其适用于接触界面不稳定状态下的PIM评估，可获得具有一定分布概率的PIM分布特性，尤其针对大样本以及不同样品偏差情况的PIM预测有效性显著提升，进而指导测试过程中以及样本本身的PIM不稳定性分析过程。与此同时，相比较传统的单一值PIM建模预测方法，本方法针对批量化的样品预测更为合理，也更贴近实际PIM产物测试验证过程中PIM测试结果带有统计分布特性的现实情况，在大样本PIM分析中将更有效性。

5 结论

本文从PIM理论建模分析的关键步骤之接触非线性模型、非线性数值拟合模型及典型场景的PIM预测的3个要素出发，总结了当前PIM数值建模仿真中存在的 key 问题与挑战、当前PIM建模研究的新技术趋势和热点问题，尤其针对实际工程环境中微波部件的实际微观界面接触样本庞大且无法准确测量量化导致的PIM分析难点问题，提出了基于微观界面统计重构方法，用于接触非线性导致的PIM产物的数值分布与其概率分布分析。该方法可将在过往PIM数学建模研究中亟需的界面微观实测与分析转换为基于统计方法重构获得接触界面的实际样本状态，获得PIM产物幅值分布及其概率分布。该方法可基于不可具体微观直接量化的接触界面的微观统计随机性，获得实际微波部件在加工制造、装配与使用中出现的不稳定PIM行为，尤其可获得针对工况条件下微波器件的PIM的统计区间，为实际微波部件PIM产物预测提供大样本统计分析方法，进一步为通过工艺控制提高实际微波部件的PIM稳定性提供参考。

参考文献：

[1] LUI P. Passive intermodulation interference in communication systems[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1990,2(3):109-118.
[2] 崔万照,李军,魏焕,等. 航天器微波部件无源互调机理分析与检测技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2020. (CUI

- Wanzhao, LI Jun, WEI Huan, et al. Passive intermodulation mechanism analysis and detection technology for microwave components of spacecraft[M]. Beijing:Beijing University of Technology Press, 2020.)
- [3] GOLIKOV V, HIENONEN S, VAINIKAINEN P. Passive intermodulation distortion measurements in mobile communication antennas[C]// IEEE the 54th Vehicular Technology Conference. Atlantic City,NJ:IEEE, 2001:2623–2625.
- [4] BOYHAN J W, HENZING H F, KODURU C. Satellite passive intermodulation: systems considerations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996,32(3):1058–1064.
- [5] CAO Zhi, GAO Fan, ZHAO Xiaolong, et al. Passive intermodulation of metallic contact in radiation field[C]// 2019 IEEE the 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEMC). Nanjing, Jiangsu, China: IEEE, 2019:1–4.
- [6] WANG X B, ZHANG N, HU T C, et al. Passive intermodulation analysis between rough circular waveguide flanges using Weibull distribution[C]// 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Beijing, China: IEEE, 2010: 1442–1445.
- [7] ZHAO Xiaolong, HE Yongning, YE Ming, et al. Analytic passive intermodulation model for flange connection based on metallic contact nonlinearity approximation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017,65(7):2279–2287.
- [8] GREENWOOD J, WILLIAMSON J. Contact of nominally flat surfaces[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1966,295 (1442):300–319.
- [9] ZHANG Kai, LI Tuanjie, JIANG Jie. Passive intermodulation of contact nonlinearity on microwave connectors[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018,60(2):513–519.
- [10] ZHANG Lei, WANG Hongguang, HE Shaoting, et al. A segmented polynomial model to evaluate passive intermodulation products from low-order PIM measurements[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letter, 2019,29(1):14–16.
- [11] JIANG Jianghu, ZHANG Shiquan, WU Shaozhou, et al. Prediction of passive intermodulation power level based on double exponential function model and genetic algorithm[C]// Proceedings of 2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference. Harbin, Heilongjiang, China: IEEE, 2011:307–310.
- [12] 梁建刚, 王积勤, 姜义武. 一种预测高阶PIM电平的数学模型[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2008,9(2):64–67. (LIANG Jiangang, WANG Jiqin, JIANG Yiwu. A mathematic model for high-order PIM level prediction[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2008,9(2):64–67.)
- [13] 梁建刚, 王积勤, 费劲峰. 幂级数法预测高阶PIM电平[C]// 2001年全国微波毫米波会议. 四川成都:[s.n.], 2001:556–558. (LIANG Jiangang, WANG Jiqin, FEI Jinfeng. Power series method for predicting higher-order PIM levels[C]// 2001 National Microwave and Millimeter Wave Conference. Chengdu, Sichuan, China:[s.n.], 2001:556–558.)
- [14] 张凯. 微波连接器接触非线性的无源互调研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018. (ZHANG Kai. Research on passive intermodulation of microwave connector contact nonlinearity[D]. Xi'an, Shaanxi, China: Xidian University, 2018.)
- [15] JIN Qiuyan, GAO Jinchun, WU Yongle, et al. Behavior modeling of passive intermodulation distortion with multiple nonlinear sources[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2018,60(9):2182–2185.
- [16] ZHANG Shiquan. Analysis of passive intermodulation based on Taylor polynomial[C]// 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Inner Mongolia, China: IEEE, 2011:3869–3871.
- [17] RUPAKULA B, REBEIZ G. Third-order intermodulation effects and system sensitivity degradation in receive-mode 5G phased arrays in the presence of multiple interferers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018,66(12):5780–5895.)

作者简介:

陈 雄(1990–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大功率微波电路与器件, email: shawn.cc@foxmail.com.

贺永宁(1971–), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽禁带半导体器件、纳米电子器件和微波无源器件等.

于 明(1961–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为大功率微波无源电路与器件.