DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.06.005

辐射场中金属接触非线性源的无源互调仿真方法

曹 智1,赵小龙1,周吴楠1,张可越1,陈 雄2,3,贺永宁1

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学部,西安 710049;2. 南方科技大学 电子与电气工程系,深圳 518055;3. 香港中文大学 电子工程学系,香港 999077)

摘 要:文章提出并验证了一种可以预测被天线接收的金属接触无源互调(passive intermodulation, PIM)幅值的仿真方法。把辐射场中的金属接触界面设置为非线性电流源离散端口,以该非线性电 流源作为激励源通过 CST 场仿真能够获取天线接收端口的 PIM 响应。通过少量 PIM 测试结果可 以仿真提取待测样(device under test, DUT)的非线性参数,进而仿真预测 DUT 在辐射场中任意位 置的 PIM 响应。针对铝合金金属接触 DUT,首先采用方同轴缝隙天线测试辐射场中某一位置的三 阶 PIM(third-order passive intermodulation, PIM3)幅值,其次基于场仿真提取了非线性电流源的三 阶非线性参数,最后利用确定的非线性电流源仿真预测辐射中不同位置处的 PIM3 响应,仿真评估 和实验测试结果一致。文章为辐射场复杂场景中金属接触 PIM 的评估及其非线性参数的提取提 供了一种可靠且方便的途径。

A simulation method of passive intermodulation for metallic contact in radiation field

CAO Zhi¹, ZHAO Xiaolong¹, ZHOU Haonan¹, ZHANG Keyue¹, CHEN Xiong^{2,3}, HE Yongning¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Xi' an Jiaotong University, Xi' an 710049, China;

School Electrical and Electronic Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;
 School of Electrical Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The paper proposes and verifies a simulation method that can predict the passive intermodulation (PIM) product for metallic contact received by an antenna. The metallic contact interface in the radiation field is set as a discrete port of a nonlinear current source, and the PIM response accepted by the receiving port of the antenna can be obtained by CST field simulation with the nonlinear current source as the excitation source. A small amount of PIM test results can be applied to simulate and extract the nonlinear parameters of the device under test (DUT), which enables us to simulate and predict the PIM level of DUT at any position in the radiation field. Firstly, we employ a slotted coaxial antenna to measure the third-order PIM (PIM3) amplitude for the DUT of aluminum metallic contact at a specific position in the radiation field. Then, based on the field simulation the third-order nonlinear coefficient of DUT can be extracted. Finally, by adopting the determined nonlinear current sources, we can simulate and predict the PIM3 levels at different positions in the radiation field. The simulation evaluation and experimental results are consistent. This research provides a reliable and convenient

收稿日期:2023-03-24; 修回日期:2023-04-03

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:62271240);国家重点实验室基金项目(编号:6142411122115)

引用格式:曹智,赵小龙,周昊楠,等. 辐射场中金属接触非线性源的无源互调仿真方法[J]. 空间电子技术,2023,20(6):30-35. CAO Z,ZHAO X L,ZHOU H N, et al. A simulation method of passive intermodulation for metallic contact in radiation field[J]. Space Electronic Technology, 2023,20(6):30-35.

approach to evaluating the PIM response of metallic contact and extracting the DUT's nonlinear parameter in complex radiation field scenarios.

Key words: passive intermodulation; metallic contact; radiation field; nonlinear current source; nonlinear coefficient

0 引言

两路或多路载波信号流经射频前端无源器件 中的弱非线性时所产生的非线性产物称为无源互 调(passive intermodulation, PIM)^[1]。当 PIM 产物落 入接收系统时,会提升误码率,恶化通信系统性能。 PIM 干扰是微波通信系统的亟待解决的关键可靠性 问题^[2-3]。

诱发 PIM 的物理根源一般分为材料非线 性^[4-5]和金属接触非线性^[6-7]。射频前端中的多数 无源器件内都会存在金属接触非线性,比如射频同 轴连接器^[8-9]、波导法兰连接^[4-5]、网状天线中的金 属丝搭接^[10-11]、移相器中的螺栓连接等。当基站天 线的辐射场中存在具有金属接触的无源器件时,载 波信号会激励金属接触非线性生成 PIM 产物,若 PIM 产物频率与接收信号的频率相近,PIM 会落入接 收系统从而降低天线的灵敏度,减少通信系统的容 量。因此,辐射场中金属非线性引起的 PIM 干扰已成 为大功率微波工程技术的重要研究课题之一^[12-13]。

针对辐射场中的接触 PIM 问题,我们已经对波 导缝隙天线辐射场中的金属接触 PIM 进行了理论 及实验研究^[14]。WU D W 等^[15]通过仿真建立了网 状天线反射面的 PIM 模型,并给出了具有相同结构 和工作条件的网状反射面天线的 PIM 预测。基于 电连接诱发 PIM 的物理根源,ZHAO X L 等^[16]建立 了金属接触 PIM 与接触电阻、接触压力、载波功率 之间的关系,提出了一种波导法兰连接界面处金属接 触 PIM 的计算方法。由于多系统、多频段的通信技术 使辐射场中的 PIM 干扰问题日益凸显,关于辐射场中 金属接触 PIM 可靠的仿真预估亟需进一步的研究。

开展辐射场中金属接触 PIM 的仿真评估和实验规律研究具有重要的工程意义。文章通过方同轴缝隙天线提供的辐射场景,提出并实验验证了一种预估天线端口接收金属接触 PIM 幅值的仿真方法。实测结果与仿真结果一致,验证了仿真方法能够预估辐射场中金属接触的 PIM 响应。

1 金属接触非线性电流建模

根据固体物理的理论,可能导致金属接触界面 产生 PIM 产物的非线性物理机制有量子隧穿电 流^[17]、热电子发射。虽然不同的非线性物理机制对 应的非线性方程各不相同,但非线性方程都可被展 开成幂级数的形式,如式(1)所列:

$$I_{nl} = \sum_{i=0}^{\infty} a_i V^i = a_0 + a_1 V^1 + a_2 V^2 + a_3 V^3 + \cdots$$
(1)

式(1)中,*I*_{nl}是金属接触产生的非线性电流的 总和,包含各个频率分量。*a*_i为各个频率分量的非 线性参数。V是大功率电磁波经过接触结时在接触 界面产生的压降。当有两路载波信号馈入测试系 统时,该压降的表达式如式(2)所列:

 $V = (Z) \left[I_{1l} \cos(2\pi f_1 t) + I_{2l} \cos(2\pi f_2 t) \right]$ (2)

式(2)中,(*Z*)为接触界面的接触阻抗。 I_{11} , I_{21} 为通过接触界面的载波信号电流幅值。本文采用的两路载波信号功率幅值相同,即 $I_{11} = I_{21} = I_1 \circ f_1, f_2$ 分别为两路载波信号的频率。

将式(1)展开,提取出与三阶无源互调(third-order passive intermodulation, PIM_3)相关的三阶非线 性电流,如式(3)所列:

$$I_{3nl} = \frac{3}{4} a_3 |Z|^3 I_l^3$$
 (3)

根据赵小龙博士提出的点源模型,该非线性电流源可以看成一个短偶极子^[15]向外辐射功率。当 非线性电流源在天线辐射场中时,一部分非线性源 的辐射功率会被天线端口所接收,落入天线端口的 三阶非线性源的辐射功率即为 PIM₃。记三阶非线 性参数 $A_3 = a_3 |Z|^3$ 。

综上所述,建立如式(4)所列的电连接非线性 电流源仿真模型。流经金属接触界面的载波信号 电流 *I*₁ 可以通过 CST 仿真获取。三阶非线性参数 *A*₃ 由待测样品某一位置的 PIM₃ 测试结果提取。

$$I_{3nl} = \frac{3}{4} A_3 I_l^3$$
 (4)

2 同轴缝隙天线辐射场中接触 PIM 仿真

文章采用如图1所示的外腔开缝隙的方同轴缝隙天线提供辐射场景^[18],待测样(device under test, DUT)置于缝隙天线的辐射场中。同轴缝隙的宽度

远小于缝隙长度,此时可以忽略远场的辐射功率, 大部分的载波功率在同轴内部传输。因此,利用该 方同轴缝隙天线可以实现近场内金属接触 PIM 的 研究,并忽略远场中,即测试系统所处环境中其他 金属接触非线性源对测试结果的影响。

在 DUT 的接触界面设置端口 port3,方同轴的 输入、输出端口分别设置波端口 port1 和 port2。



图1 同轴缝隙天线仿真模型

Fig. 1 The simulation model of the slotted coaxial antenna

由式(4)可得,通过线性电流幅值 *I*₁ 及非线性 参数 *A*₃ 可以建立金属接触界面的非线性电流模型。 在接触界面 port3 设置幅值为该非线性电流源的离 散端口(端口类型设置为 current),通过 CST 可以仿 真获取到当端口 port3 以非线性电流源为激励时,端 口 port1 接收到的功率值,即金属接触的 PIM 响应。 综上,基于非线性系数 *A*₃ 及流经 DUT 接触界面载 波信号的电流幅值 *I*₁ 可以预估辐射场中 DUT 在不 同位置处的 PIM 幅值。辐射场中金属接触 PIM₃ 的 仿真流程图如图 2 所示。





Fig. 2 Flow chart of PIM₃ simulation induced by metallic contact in the radiation field

2.1 线性电流 I_1 仿真

如图 1 所示, DUT 置于方同轴缝隙天线辐射场中。当载波信号在方同轴内传输时, 一部分载波信号会通过缝隙向外辐射功率, 因此在 DUT 的接触界面会流经由载波信号诱发的线性电流 *I*₁。

在接触界面设置离散端口 port3(端口类型设置

为 S-parameter)。从端口 port1 馈入激励信号,通过 CST 仿真能够获取流过端口 port3 载波信号的电流 幅值,即 I_l 。

2.2 非线性参数 A₃ 提取方法

通过 DUT 在某个位置处的 PIM 测试结果可以 提取该 DUT 接触结的非线性参数。如图 1 所示,如 果已知在 port1 获取的 PIM₃ 响应,基于该 PIM₃ 功率 通过仿真可以反推接触界面 port3 端口处非线性电 流激励源 *I₃*的幅值,最后由式(4)计算得到 DUT 接 触界面的非线性参数 *A*₃。DUT 非线性参数 *A*₃ 的提 取流程如图 3 所示。



Fig. 3 Flow chart for the extraction of DUT nonlinear parameter A_3

3 实验验证

DUT 的 PIM₃ 测试平台如图 4 所示,其中,图 4 (b)为所加工的外腔开缝的方同轴缝隙工装。基于 该工装可以实现对置于缝隙天线附近的待测样 PIM 的测试。



将射频前端天线辐射场中的电连接抽象为两 段铝合金圆柱相连接的接触件,如图5所示。在接 触界面的两端装有介质螺钉,通过力矩扳手可以给 接触界面施加不同的压力,从而改变接触界面的接 触状态。



(b) DUT连接状态实物图

图 5 DUT 实物图 Fig. 5 Physical diagram of the DUT

将 DUT 的接触结水平置于缝隙波导上方。由 于待测接触结 DUT 与缝隙在水平方向上的夹角会 改变流经接触界面的线性电流 *I*₁ 幅值,因此在实验 及仿真中对 DUT 与缝隙的夹角设置应保持相同。 文章中待测接触结与缝隙垂直。首先,如图 6 所示, 在位置 P1 测试 DUT 不同压力下的 PIM 响应。将缝 隙的中心记为原点,位置 P1 位于原点处。由图 3 所 示,通过 DUT 在 P1 的 PIM 测试结果及 DUT 在位置 P1 的线性电流 *I*₁-P1 提取不同压力下接触界面的非 线性参数 *A*₃。其次,基于提取的非线性参数 *A*₃及 DUT 在 P2 的线性电流 *I*₁-P2,可以仿真评估 DUT 在 P2 处不同压力下的 PIM 响应。P2 位于沿 *x* 轴向右 平移 13 mm,沿 *y* 轴向上平移 5 mm 的位置,如图 6 (a)所示。



Fig. 6 Schematic diagram of DUT position

建立图 4(a) 所示的测试平台,采用澳华测控 PIM 分析仪对方同轴缝隙天线辐射场中待测铝合金 接触不同接触压力下的反射 PIM₃ 展开实验研究。 两路载波信号的输入功率均为 43 dBm,频率分别为 2. 62 GHz、2. 69 GHz。待测的 PIM₃ 信号频率为 2. 55 GHz。测试过程中,PIM 测试系统的本底噪声 小于 - 125 dBm@ 2 × 43 dBm。

采用力矩扳手对 DUT 接触界面两端施加 0.1~ 1.1 N·m 的力矩, DUT 在 P1 位置处的三次 PIM, 测 试结果如图 7 所示。





Fig. 7 PIM₃ test results for the DUT at P1

因为相同力矩下,DUT 每次连接的微观接触状态会存在差异,从而导致 DUT 在相同力矩下多次实验的 PIM,实测结果在一定范围内波动,如图 7 所示。且该波动范围随着外加力矩的增大呈下降的趋势。本文通过三次重复性的实验来获取 PIM,的波动范围。

馈入测试系统的载波功率为 43 dBm,则由 CST 场仿真得到在 P1 处流过接触结的基波信号电流幅 值 *I*₁-P1 为 99 mA。根据 DUT 在 P1 处的测试结果 PIM₃ 及 *I*₁-P1 提取 DUT 在不同接触状态下的非线 性参数 *A*₃,如图 8 所示。



由图 8 可得, DUT 的非线性参数 A₃ 的均值随着 外加力矩的增大呈下降的趋势。在微观物理机制 下,接触界面的非线性参数 A₃ 与单位接触面积内金 属 - 绝缘层 - 金属(metal-insulator-metal, MIM)的占 比,接触界面氧化膜的厚度及介电常数,接触界面 的势垒高度等参数相关^[19]。因为,每次连接状态 下,金属接触界面的 MIM 占比会存在差异,就会导 致多次实验条件下铝合金接触件 DUT 的 A₃ 呈现一 定的波动范围。

基于图 6 所示的仿真模型,可以获取在 P2 处流 经 DUT 接触界面的基波信号电流幅值 *I*₁-P2 为 34.2 mA。由式(4)所示,通过在 P1 处提取的非线 性参数 *A*₃ 及 *I*₁-P2 可以获取在 P2 处 DUT 接触界面 产生的非线性电流 *I*₃,利用 *I*₃,进而可以仿真预估 DUT 在 P2 处不同接触压力下的 PIM₃ 幅值。DUT 在 P2 处的 PIM₃ 仿真预估及实测结果如图 9 所示。



图 9 P2 处 DUT 的 PIM₃ 仿真预估及实验结果 Fig. 9 Predicted and experimental results for PIM₃ amplitude of DUT at P2

由图9可得,当外加力矩等于 0.35 N · m 时, DUT 的 PIM₃ 波动范围最大。当外加力矩大于 0.35 N · m 时, DUT 的 PIM₃ 幅值及 PIM₃ 波动范围 趋于稳定。且在 0.3 N · m ~ 1.1 N · m 外加力矩的 测试范围内, DUT 的 PIM₃ 测试结果的变化范围在 预测结果的变化范围内,预测结果与实测结果均值 相差在 3 dB 以内。

综上所述,文章提出的仿真方法可以评估金属 接触样在不同天线辐射场中的 PIM 响应。

4 结论

文章提出并实验验证了一种评估天线辐射场 中金属接触结构 PIM 的仿真方法。首先,基于 DUT 在天线辐射场中某一位置的 PIM 测试结果及流经 接触界面的线性电流仿真结果能够提取 DUT 接触 界面的非线性参数,其次,利用该非线性参数建立 DUT 接触界面的非线性电流源,最后,以该非线性 电流源为激励,通过 CST 场仿真能够仿真预估 DUT 在辐射场中任意位置的 PIM 响应。采用方同轴缝 隙天线及铝合金接触件对该仿真方法进行了实验 验证,实测结果均值与仿真评估结果相差在 3 dB 以 内。表明文章提出的仿真方法能够预估辐射场中 金属接触的 PIM 水平,为评估天线的 PIM 环境提供 了一种仿真计算方法。

参考文献:

- [1] SHAYEGANI A. Multicarrier PIM behavior and testing in Communications Satellites [C]//Proceedings of the 32nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 2014; AIAA2014-4249.
- [2] 叶鸣,贺永宁,孙勤奋,等.大功率条件下的无源互调 干扰问题综述[J].空间电子技术,2013,10(1):75-83.
- [3] 王小丽,陈翔,崔万照.空间大功率微波器件无源互调 最新研究进展[J].空间电子技术,2020,17(5):1-10.
- [4] WU Y, KU W H, ERICKSON J E. A study of nonlinearities and intermodulation characteristics of 3-port distributed circulators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1976, 24(2):69-77.
- [5] CHEN X, HE Y N. Reconfigurable passive intermodulation behavior on nickel-coated cell array[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59 (4): 1027-1034.
- [6] VICENTE C, HARTNAGEL H L. Passive-intermodulation analysis between rough rectangular waveguide flanges [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(8):2515-2525.
- [7] VICENTE C, WOLK D, HARTNAGEL H L, et al. Experimental analysis of passive intermodulation at waveguide flange bolted connections [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55 (5): 1018-1028.
- [8] JIN Q Y, GAO J C, FLOWERS G T, et al. Modeling of passive intermodulation with electrical contacts in coaxial connectors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(9):4007-4016.
- [9] CHEN X, HE Y N, YANG S, et al. Analytic passive intermodulation behavior on the coaxial connector using Monte Carlo approximation [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5):1207-1214.
- [10] BAI H, CUI W Z. Simulation of PIM generated on the mesh reflector [C]//2015 European Microwave Conference (EuMC), 2015;602-605.

- [11] WU D W, XIE Y J, KUANG Y, et al. Prediction of passive intermodulation on mesh reflector antenna using collaborative simulation: Multiscale equivalent method and nonlinear model[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018,66(3):1516-1521.
- [12] WILKERSON J R, KILGORE I M, GARD K G, et al. Passive intermodulation distortion in antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(2): 474-482.
- [13] BOLLI P, SELLERI S, PELOSI G. Passive intermodulation on large reflector antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2002, 44(5):13-20.
- [14] 曹智,高凡,赵小龙,等. 辐射场中金属接触无源互调 干扰研究[J]. 电波科学学报,2020,35(3):338-343.
- [15] WU D W, XIE Y J, KUANG Y, et al. Prediction of passive intermodulation on mesh reflector antenna using collaborative simulation: Multiscale equivalent method and nonlinear model[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propa-

gation, 2018, 66(3): 1516-1521.

- [16] ZHAO X L, HE Y N, YE M, 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.
- [17] BOND C D, GUENZER C S, CAROSELLA C A. Intermodulation generation by electron tunneling through aluminum-oxide films [J]. Proceedings of the IEEE, 1979, 67 (12):1643-1652.
- [18] 高凡,赵小龙,张松昌,等. 基于方同轴结构的近场耦 合无源互调测试装置: CN107302404A [P]. 2017-10-27.
- [19] ZHANG S C, ZHAO X L, YE M, et al. Theoretical and experimental study on electrical contact resistance of metal bolt joints [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9 (7): 1301-1309.
- 作者简介:曹智(1993—),男,陕西人,西安交通大学电子与信息工程学院博士研究生,主要研究方向为微波无源器件的无源互 调问题及互调测试。E-mail: chzsky@163.com
- 通讯作者:贺永宁(1971—),女,陕西人,西安交通大学电子与信息工程学院教授,主要研究方向为微波无源器件、低维半导体 纳米结构和器件。E-mail:yongning@mail.xjtu.edu.cn