

文章编号: 2095-4980(2023)03-0263-08

## 微带电路无源互调干扰问题综述

赵小龙<sup>1a,1b</sup>, 贺永宁<sup>1a,1b</sup>, 崔万照<sup>2</sup>

(1.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;  
2.中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室 陕西 西安 710100)

**摘要:** 无源互调(PIM)干扰是微波射频电路面临的主要可靠性问题之一, 随着微波射频电路小型集成化发展, 微带电路无源互调效应研究开始受到工业界和学术界广泛关注。研究微带电路无源互调机理、评估和抑制方法, 对于制备小型化、高可靠性微波射频电路具有重要价值。与腔体部件相比, 微带电路的非线性往往是分布的, 且与基材选择、制造工艺和器件结构等方面都有重要关系, 因此研究难度更大。近年来虽然关注微带电路互调的研究越来越多, 但依然难以直接指导微带电路的实际设计。基于此, 本文系统论述了近年来微带电路无源互调领域的研究情况, 包括非线性机理、仿真建模以及测试诊断等方面, 为未来更深入地研究微带电路无源互调效应提供参考。

**关键词:** 微带电路; 无源互调; 非线性; 电热耦合; 介电非线性

**中图分类号:** TN820

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2022192

## Review of Passive Intermodulation in microstrip circuits

ZHAO Xiaolong<sup>1a,1b</sup>, HE Yongning<sup>1a,1b</sup>, CUI Wanzhao<sup>2</sup>

(1a.Faculty of Electronic and Information Engineering; 1b.The Key Laboratory of Micro-Nano Electronics and System Integration of Xi'an City, School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;  
2.National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology, Xi'an Shaanxi 710100, China)

**Abstract:** Passive Intermodulation(PIM) is one of the key reliability problems of the microwave circuits. With the development of microwave system integration and miniaturization, the microstrip circuits are widely used in the industry and studied by the researchers. Therefore, it has great value to investigate the physical mechanisms, the evaluation methods, and the suppression technologies of the PIM interference in the microstrip circuits. The nonlinearities in the microstrip circuits are usually distributed, which are usually different from that of the cavity based microwave devices, and they are also associated with the substrate materials, the fabrication processes and the device structures. All these make it difficult to solve the PIM problems in the microstrip circuits. Though more and more PIM investigations for the microstrip circuits have been reported in recent years, the practical high-quality circuit-design still faces challenge. In this paper, we review the recent developments about the PIM phenomenon in the microstrip circuits including the nonlinearity mechanisms, the modeling and simulation methods, and the measurement technologies, which could provide comprehensive guidance for the future study of the PIM problems in the microstrip circuits.

**Keywords:** microstrip circuit; passive intermodulation; nonlinearity; electrothermal coupling; dielectric nonlinearity

由系统寄生的弱非线性特性引起的无源互调效应(PIM), 是限制大功率微波射频通信系统(如通信卫星、地面基站和舰船通信等)提升功率容量、改善通信质量和可靠性、降低制造和维护成本的主要因素之一。中国空间无线电研究所、华为技术有限公司和中兴通讯股份有限公司等长期投入 PIM 抑制方法研究; 欧空局举办的

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2023-01-02

MULCOPIM(Multipactor, Corona and Passive Intermodulation)国际会议长期以 PIM 作为主要讨论议题之一;国内西安交通大学主办的移动通信无源互调研讨会也定期开展关于无源互调干扰研究方面的探讨,可见无源互调干扰研究受到国内外广泛关注。低互调微波射频电路设计方法将是提升微波通信系统性能,获得产品竞争力的关键技术之一。随着通信系统体积小型化和分布密集化的发展,微带电路的应用越来越广泛。美国罗杰斯科技有限公司和我国泰州市博泰电子有限公司等均对其供应的微带基板提供了互调测试结果,供器件设计工程师参考,表明微带电路 PIM 效应已受到企业界广泛关注。近年来,学术界也加强了对微带电路 PIM 的研究,研究方向主要包括非线性机理、仿真建模方法和测试诊断方法等。本文系统论述以上方面的研究情况,为未来更深入地研究微带电路无源互调效应提供参考。

## 1 微带电路无源互调效应简述

互调效应是指由 2 个或 2 个以上的发射载波在微波射频器件中相遇时,产生的载波信号的线性组合产物落入接收通带形成干扰的现象。互调可根据由有源器件还是无源器件产生,分为有源和无源互调。有源互调通常由二极管、三极管等半导体器件具有的非线性特性引起,如功放中晶体管的非线性使得功放在高功率输出下出现互调失真,可以通过预失真技术缓解<sup>[1-4]</sup>。无源互调通常起源于部件连接或者部件材料的寄生非线性特性。部件松动连接会产生互调且互调幅度随接触力而变化<sup>[5-9]</sup>,这类互调通常出现在腔体部件或者连接器中,其根本原因通常认为是来自于金属表面的氧化或沾污导致的类半导体效应<sup>[10-12]</sup>,通过采用保持表面清洁、增加接触压强、表面镀银和镀金、进行一体化设计减少接触界面以及避免使用 SMA 和 N 型等小尺寸连接器等方法,接触引起的互调可以在一定程度上得到抑制,目前该方面的研究热点主要聚焦在复杂微波部件量化方法研究。无源互调的另一个主要来源是由金属或介质材料的非线性引起的,即材料的电导率、磁导率和介电常数等属性具有随外加场强而变化的特性,使得微波部件中的电流密度-电场强度、电位移矢量-电场强度以及磁场强度-磁感应强度等关系表现为非线性特性。将这 3 类材料非线性分别称为电导率非线性、磁导率非线性和介电非线性。磁性材料引起的互调主要起源于磁导率的非线性,如 Ni 镀层引起的无源互调,可以通过增加 Ni 镀层上层的金属镀层厚度<sup>[13-14]</sup>或不使用 Ni 镀层来抑制。对于环形器中由于磁非线性特性引起的 PIM 效应机理和抑制方法还有待进一步研究<sup>[15-16]</sup>。非磁性材料的非线性通常较弱,因此在微波部件电性能设计阶段,通常可以假设材料具有线性特性而不影响器件的基本功能,只有当器件工作在大功率情况时,这种弱的非线性特性产生的干扰(包括无源互调和辐射杂散发射等)会提高接收机的噪声,降低接收机性能。材料的非线性特性也可以加以利用,如非线性光学领域<sup>[17]</sup>。

在微带电路中,由于微带基板的导体和介质材料的电导率、磁导率和介电常数等均可能是非线性特性的来源,因此普通的微带电路通常具有显著的互调。由于微带电路具有体积小、质量轻和易于阵列集成化等优点,在微波通信领域的应用越来越广泛<sup>[18-22]</sup>,并在 5G 通信阵列天线技术方面具有应用潜力,因此研究微带电路的 PIM 具有重要的应用价值。相比于腔体部件,微带器件的尺寸通常更小,因此在相同工作条件下,其功率密度更高,且微带电路的 PIM 通常由介质基板材料非线性产生,非线性存在于微带器件的各个部分,因此更容易出现互调效应。叶鸣等<sup>[23]</sup>测量了采用聚四氟乙烯玻璃布覆铜板制作的微带线的传输 PIM,在 2 路载波均为 42 dBm 的条件下 PIM 幅度可达 -65 dBm。

目前国内外微带器件的 PIM 研究主要集中在微带线结构,微带天线的 PIM 研究主要见于实验报道,其他微带结构器件的 PIM 研究较少。美国北卡罗来纳大学的 J R Wilkerson 等主要基于电热耦合效应分析了微带 PIM 规律<sup>[24-26]</sup>,并对微带天线 PIM 进行了初步分析<sup>[27]</sup>。芬兰赫尔辛基理工大学 S.Hienonen 等利用近场耦合探头测试了微带线上单个 PIM 点源特性<sup>[28-30]</sup>。英国贝尔法斯特女王大学的 A P Shitvov 等主要基于近场扫描实验方法对微带线的 PIM 规律进行研究,并基于传输线方程建立了 PIM 的传输模型<sup>[31-41]</sup>。国内西安空间天线技术研究所何望等基于电热耦合效应对微带线 PIM 进行了理论分析<sup>[42-43]</sup>;西安交通大学的叶鸣和万里鹏等基于电热耦合效应进行相关理论分析和实验验证<sup>[23,44-45]</sup>;国家电子电路基材工程技术研究中心的朱泳名等通过实验研究了结构设计参数对微带线 PIM 的影响规律<sup>[46]</sup>。

## 2 微带电路无源互调产生机理

通常微带电路通过在微带基板上加工图形制备,因此微带电路的互调与微带基板材料密切相关。微带基板材料的非线性的主要可能来源包括电导率、介电常数和磁导率非线性,以及由于工艺缺陷引起的局部非线性。在微带电路研究中,采用集总电路等效模型进行分析是一种常用的方法。图 1 所示的微带线的等效电路模型中,

单位长度的等效电阻  $R$  和等效电导  $G$  可能存在与导体和介质电导率有关的非线性，等效电感  $L$  可能存在与磁导率有关的非线性，等效电容  $C$  可能存在与介电常数有关的非线性。因此，针对特定的微带电路，需要分析这几种非线性特性。

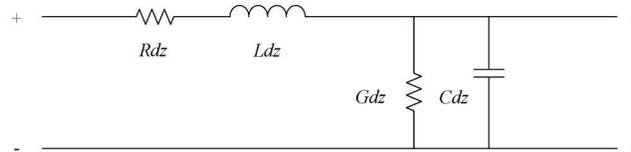


Fig.1 Lumped circuit equivalent model of a microstrip line with  $dz$  length  
图1 长度为  $dz$  的微带线集总电路等效模型

电导率非线性的一个主要物理机制是电热耦合，即器件的损耗功率引起器件温度升高，进而改变材料电导率，使得电导率与器件工作时的内部场强有关，导致电流与电场强度产生非线性关系  $\mathbf{J} = \sigma_1 \mathbf{E} + \sigma_2 \mathbf{E}^2 + \sigma_3 \mathbf{E}^3 + \dots$ ，其中  $\mathbf{J}$  为电流密度， $\mathbf{E}$  为电场强度， $\sigma_i (i=2,3,\dots)$  为电导率非线性系数。J R Wilcox 等<sup>[47]</sup>在 1976 年的报道中就利用金属导体的电热耦合机制计算了同轴传输线的 PIM。该模型表明，互调与载波频率差近似成反比，即载波频率差增加一个数量级，互调增加约 10dB。当同轴线长度较短时，同轴线互调(传输互调)正比于同轴线长度的平方。在 30 W ( $f_1=270$  MHz,  $f_2=240$  MHz) 的载波输入功率下，计算得到同轴线的最大互调幅度约为 -130 dBm，这表明同轴传输线电热耦合产生的 PIM 幅度较小。需要注意的是，该模型未考虑介质损耗和导体表面粗糙度的影响。2006 年，J R Wilkerson 等<sup>[24]</sup>测量了均匀微带线的 PIM 随输入载波频率间隔的变化关系，获得了 PIM 随频率间隔变化斜率为 10 dB/decade 的实验规律，这与同轴传输线的电热耦合模型结果一致。J R Wilkerson 等进一步采用电热耦合理论对实验结果进行了分析<sup>[25-26]</sup>，采用电热耦合模型解释了微带线互调随载波频率间隔的变化关系；为求解导体壁上的温度，在模型中引入比例系数，该系数需要通过 PIM 实验结果确定，且模型中未考虑介质损耗的影响。事实上，通过确定热传导方程的边界连续性条件和能量守恒，可以定量求解温度场分布，避免采用假设比例系数，并可以进一步考虑介质损耗的影响。国内西安交通大学叶鸣<sup>[44]</sup>和西安空间天线技术研究所何望等<sup>[42]</sup>基于电热耦合效应进一步理论分析了介质板热学参数对均匀微带线的 PIM 影响。结果表明，导热性好的介质材料和温度系数小的金属材料有助于实现低 PIM 指标。

在一些文献中<sup>[31-32]</sup>，介电常数非线性作为互调的一种可能来源已被提出，但还没有深入的针对性研究。根据电介质物理理论，介质中的电位移矢量和电场强度存在非线性关系<sup>[48]</sup>： $\mathbf{D} = \epsilon_1 \mathbf{E} + \epsilon_2 \mathbf{E}^2 + \epsilon_3 \mathbf{E}^3 + \dots$ ，其中  $\mathbf{D}$  为电位移矢量， $\epsilon_i (i=2,3,\dots)$  为介电常数非线性系数。在光频领域这种非线性特性已经发展成为一门独立学科：非线性光学<sup>[17]</sup>。在非线性光学领域，利用二阶非线性系数  $\epsilon_2$  可以产生光波的二次谐波、和频和差频等效应；利用三阶非线性系数  $\epsilon_3$  还可以产生三次谐波。因此推广至射频微波领域，这种非线性效应将使得器件产生谐波和互调信号。微带电路可选用的介质基板多采用复合材料并且种类繁多，包括玻璃纤维增强聚四氟乙烯树脂系列、陶瓷粉填充聚四氟乙烯树脂系列和陶瓷粉填充热固性树脂系列等<sup>[49]</sup>，评估不同材料的非线性大小，将有助于设计低 PIM 电路。2020 年，作者通过对比空气微带线和介质微带线的 PIM 结果，判断介电非线性是微带线 PIM 的一种可能的来源，并提取了非线性参数<sup>[50]</sup>。

低互调电路设计中，通常会尽量避免使用磁性材料，但在特殊器件中，如环形器，磁性材料往往不可避免。另外在微带电路的加工过程中，由于制备工艺引入的缺陷，也可能导致 PIM 的产生。在微带电路方面关于这两类的 PIM 的研究较少，结论尚不明确，本文不做展开讨论。

### 3 理论建模和仿真方法

对于二端口微波器件，可以测量其输入端的互调，称为反射互调，也可以测量输出端的互调，称为传输互调。实验已表明，微带线传输互调通常要大于反射互调，D Zelenchuk 和 A G Schuchinsky 报道的微带线传输互调比反射互调高约 10 dB<sup>[36,51]</sup>，对不同衬底微带传输线互调的测试结果均表明传输互调要高于反射互调<sup>[52]</sup>。A P Shitvov 等<sup>[37]</sup>报道的 914 mm 长的微带线的传输互调比反射互调高 30 dB。这种现象主要是由于微带线材料非线性特性分布于微带线的不同位置，即微带线中的 PIM 非线性源沿着载波传播方向是分布式的，各部分产生的互调相互叠加，由于每部分产生的传输互调和反射互调的相位不同，因此叠加后导致总的反射互调和传输互调不同。D Zelenchuk<sup>[38]</sup>通过假设材料非线性模型，然后代入传输线方程中通过求解非线性微分方程获得了微带线 PIM，结果验证了通常情况下微带线的传输互调要高于反射互调，并且传输 PIM 随着微带线长度先增加后减小，反射

互调随着微带线长度波动变化<sup>[36,53]</sup>。图 2 为一种基于电热耦合机制计算的传输互调与反射互调的差异随微带线长度变化的典型趋势。另外实验表明微带线的互调与导体宽度相关,通常导体越宽,互调越小<sup>[40,54]</sup>。在文献[31]中, D Zelenchuk 对比了 2 种不同的介质基板:一种介质基板表现出随导体宽度的增加, PIM 减小;另一种基板表现出随导体宽度的增加, PIM 增加。D Zelenchuk 推测由导体非线性引起的 PIM 会使得 PIM 随着导体宽度的增加而减小,而由介质非线性引起的 PIM 会使得 PIM 随着导体宽度的增加而增加。这表明对于微带电路 PIM 分析需要将非线性机理和信号传输结合起来。D Zelenchuk 求解非线性传输线方程,获得了部分微带线 PIM 规律,但由于非线性微积分方程求解复杂,难以获得解析解,只能采取数值计算。这种方法令多因素(如载波频率、介质损耗、失配等)PIM 影响规律的分析以及更复杂结构器件(如滤波器、耦合器和天线等)的求解变得更加困难。

考虑到 PIM 是在载波遇到非线性结构时,激励出 PIM 信号,这些被激励出的 PIM 信号在系统中传播最终在端口被接收,因此可以将 PIM 的求解分为 2 个过程: a) 求解载波激励下的等效 PIM 源; b) 求解系统在等效 PIM 源激励下的响应。多个非线性同时存在时,系统总的互调可看作是每个 PIM 源单独作用时的互调的矢量叠加,对于具有分布非线性的微带线结构,矢量叠加转化为积分。这种叠加的处理方法在同轴连接器级联和波导法兰连接的 PIM 分析中已被采用<sup>[55-57]</sup>。J R Wilkerson 等在对微带天线互调的初步分析中也采用了叠加的处理方法<sup>[27]</sup>。2020 年,作者基于这种方法,推导了基于介电非线性的微带线 PIM 解析模型,并以此提取了微带介质板的介电非线性参数<sup>[50]</sup>。首先结合非线性机制求解载波作用下的等效 PIM 激励源,然后再求解系统在等效 PIM 激励源激励下的响应,获得系统的 PIM 幅度。这种处理方法将非线性的处理放在了等效 PIM 激励源的求解过程中,而系统在 PIM 激励源下的响应问题的求解完全为线性问题,因此这种处理方法避免了非线性微积分方程的求解,使该方法可以获得微带线 PIM 的解析表达式。解析解相比于数值解可以更清楚地展现 PIM 的各个影响因素的影响规律,并且结合实验可以用来提取材料非线性参数,为复杂结构 PIM 评估提供基础。在均匀微带线 PIM 解析模型的基础上,对非均匀微带线结构,如尺寸跳变、截断、间隙和弯折等,可以通过考虑非均匀结构等效电路模型进行求解。在微带阶跃阻抗滤波器的设计中,利用级联矩阵的方法可以快速获得较为准确的 S 参数<sup>[58]</sup>。因此基于该方法有望实现复杂结构微带电路的 PIM 分析。

由于等效电路模型方法难以处理辐射场的分析,另外对于 3D 结构器件<sup>[59-63]</sup>,等效电路模型分析方法具有局限性。全波仿真方法计算微带天线 PIM 有望解决辐射场中的微带电路 PIM 计算问题。目前在 PIM 研究领域,通常采用等效电路模型结合数值计算进行 PIM 分析,而采用全波仿真分析方法的研究刚刚开始,关于微带 PIM 的全波仿真研究目前未见报道。2018 年,国内东南大学游检卫和张剑锋等<sup>[64]</sup>提出采用时域有限积分法对波导法兰连接的互调进行计算,通过在 Yee 网格中引入非线性集总元件模拟波导连接的寄生非线性特性,最终通过时域计算结果进行 FFT 变换提取 PIM 信号。该方法直接将非线性模型引入数值计算,因此载波和 PIM 信号在时域上叠加在一起,由于 PIM 信号幅度通常比载波信号幅度低 10 个数量级以上,因此从时域上难以区分载波和 PIM 信号,需要采用对消的方法抵消载波信号后,经过 FFT 变化才能够提取 PIM<sup>[64]</sup>,因此计算精确度受到限制。如果采用载波和 PIM 信号分离计算的方法,即先采用全波仿真求解等效 PIM 激励源,然后直接求解在该激励源下的系统的 PIM 响应信号,或许可以大幅度提高数值计算精确度。

#### 4 测试诊断方法

由于微带线 PIM 机理研究,以及非线性参数提取,都有赖于 PIM 测试方法,开发新型的测试诊断方法用以解决以上问题也是微带电路 PIM 研究中极为重要的部分。目前这方面的研究相对较少。

通用的传输和反射互调测试方法<sup>[65]</sup>是基于微波器件的测试,即待测样为器件整体。对于微带电路,由于非线性可能来源于金属导体或介质材料,也可能来源于微带器件与 PIM 测试系统的连接,通用的测试方法难以对这些非线性的来源区分。为了获得 PIM 的影响规律,通常期望能够控制单一变量进行试验研究,而整体器件设计时由于需要与系统匹配,往往设计参量之间存在耦合,难以分离。高凡等<sup>[66]</sup>采用缝隙波导利用近场耦合原理

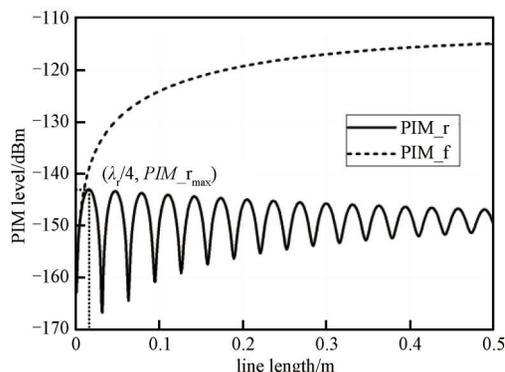


Fig.2 Forward and reverse PIM level of microstrip line as the function of the length

图2 微带线传输和反射互调随微带线长度的变化关系

测量了接触结构待测件的PIM。该方法实现了待测结构与测试系统的分离，可以方便地改变待测样结构和接触状态。场扫描探测方法常被用来进行互调定位<sup>[67,28-30]</sup>，英国贝尔法斯特女王大学的A P Shitvov,D E Zelenchuk等采用近场扫描实验方法确定了微带线中的非线性源是分布的<sup>[34,37]</sup>。这些研究报道对于进一步揭示微带电路PIM规律以及分析非线性产生机理提供了参考。未来专门针对微带电路PIM问题研究的新型测试诊断方法还有待更多深入研究。

## 5 结论及展望

本文主要从非线性机理、仿真建模以及测试诊断等方面对近年来微带电路PIM研究进展进行了系统的归纳总结。从研究现状看，目前比较明确的是微带电路的非线性往往是分布的，这一点通过微带线的传输PIM和反射PIM存在显著差异可以判断。通过假设非线性源是均匀分布的，目前已经有比较明确的PIM计算方法可以用来分析微带线尺寸对PIM的影响规律。关于非线性的起源，虽然基于电热耦合的文献报道较多，但基于常规覆铜板加工的微带线的PIM机理是否是电热耦合，目前尚无定论。由于不同板材制备的微带线的PIM存在差异，因此介电非线性也需要考虑。另外由于加工工艺引起的边缘缺陷，也可能导致显著的PIM，但由于工艺缺陷存在随机性，研究难度较大，目前报道较少。为了验证微带电路PIM机理，能够对单一影响因素进行验证的新型测试诊断方法也有待进一步研究。应用中微带结构多种多样，涉及谐振结构、天线结构、负载不匹配等问题，这些因素对PIM效应的影响也亟待研究。

### 参考文献：

- [1] 毛云祥,张正言,雷磊,等. 基于IPLS的记忆功放数字预失真技术[J]. 电子信息对抗技术, 2015,30(2):30-34. (MAO Yunxiang, ZHANG Zhengyan, LEI Lei, et al. Digital predistortion technique for power amplifier with memory effects based on IPLS algorithm[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2015,30(2):30-34.)
- [2] 金绍春. 射频功放数字预失真技术研究及实现[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (JIN Shaochun. Study and implementation of digital pre-distortion method for RF power amplifier[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [3] 张素敏. 中频数字预失真法改善功率放大器的非线性[J]. 无线电工程, 2005,35(8):59-61. (ZHANG Sumin. An IF digital pre-distortion method to improve the HPA linearity[J]. Radio Engineering of China, 2005,35(8):59-61.)
- [4] 沈英杰,刘郁林,胡中豫. 自适应数字预失真方法在功放线性化中的应用[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2005,17(6):687-690. (SHEN Yingjie, LIU Yulin, HU Zhongyu. Application of an adaptive digital predistortion technique to HPA linearization[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science), 2005,17(6):687-690.)
- [5] VICENTE C, HARTNAGEL H L. Passive-intermodulation analysis between rough rectangular waveguide flanges[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2005,53(8):2515-2525.
- [6] 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 & Techniques, 2007,55(5):1018-1028.
- [7] ZHAO X, HE Y, 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.
- [8] JIN Q, GAO J, 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] YANG H, WEN H, QI Y, et al. An equivalent circuit model to analyze passive intermodulation of loose contact coaxial connectors[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018,60(5):1180-1189.
- [10] HIGA W H. Spurious signals generated by electron tunneling on large reflector antennas[J]. Proceedings of the IEEE, 1975,63(2):306-313.
- [11] 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.
- [12] 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. (YE Ming, HE Yongning, SUN Qinfen, et al. Review of passive intermodulation interference problem under high power signals[J]. Space Electronic Technology, 2013,10(1):75-83.)

- [13] HENRIE J, CHRISTIANSON A, CHAPPELL W J. Prediction of passive intermodulation from coaxial connectors in microwave networks[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2008, 56(1):209–216.
- [14] HENRIE J, CHRISTIANSON A, CHAPPELL W J. Engineered passive nonlinearities for broadband passive intermodulation distortion mitigation[J]. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, 2009, 19(10):614–616.
- [15] LYNCH D J, PIERCE B. Third order intermodulation performance of above resonance circulators[C]// *IEEE Colloquium on Advances in Passive Microwave Components*. London, UK: IET, 1997:4.
- [16] CHRISTIANSON A J, HENRIE J J, CHAPPELL W J. Higher order intermodulation product measurement of passive components[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(7):1729–1736.
- [17] 石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 等. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012. (SHI Shunxiang, CHEN Guofu, ZHAO Wei, et al. *Nonlinear optics*[M]. Xi'an, China: Publishing House of Xidian University, 2012.)
- [18] 李亚靖, 孙浩, 杨雪霞, 等. 带有软表面的 V 波段微带阵列天线[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(10):81–85. (LI Yajing, SUN Hao, YANG Xuexia, et al. V band microstrip array antenna with soft-surface[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(10):81–85.)
- [19] 任高飞, 徐勤. 基于人工磁导体的低 RCS 微带天线设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2022, 20(9):959–964. (REN Gaofei, XU Qin. Design of low RCS microstrip antenna based on artificial conductor[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2022, 20(9):959–964.)
- [20] 杨波, 孟庆东. 基于 CRLH 的小型化三频 LTE 微带天线设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2021, 19(6):1037–1040. (YANG Bo, MENG Qingdong. Miniaturized tri-band LTE microstrip antenna based on CRLH[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2021, 19(6):1037–1040.)
- [21] 刘高见, 李军, 徐辉, 等. 一种 220 GHz 波导-悬置微带线过渡电路设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2017, 15(1):11–14. (LIU Gaojian, LI Jun, XU Hui, et al. A design of waveguide to suspended substrate microstrip line transition at 220 GHz[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2017, 15(1):11–14.)
- [22] LI B, YANG S, HUANG M, et al. A compact and dual-polarized microstrip array antenna for mini base station applications[C]// *International Workshop on Microwave & Millimeter Wave Circuits & System Technology*. Chengdu, China: IEEE, 2012.
- [23] 叶鸣, 肖怡, 陶长英, 等. 微带传输线的无源互调效应实验研究[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(3):471–475. (YE Ming, XIAO Yi, TAO Changying, et al. Experimental research on passive intermodulation effect of microstrip lines[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(3):471–475.)
- [24] WILKERSON J R, GARD K G, STEER M B. Electro-thermal Passive Intermodulation distortion in microwave attenuators[C]// *Microwave Conference, 2006 36th European*. Manchester, UK: IEEE, 2006.
- [25] WILKERSON J R, GARD K G, SCHUCHINSKY A G, et al. Electro-Thermal theory of intermodulation distortion in lossy microwave components[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(12 part 1):2717–2725.
- [26] WILKERSON J R, LAM P G, GARD K G, et al. Distributed Passive Intermodulation distortion on transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, 59(5):1190–1205.
- [27] 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.
- [28] HIENONEN S, GOLIKOV V, MOTTONEN V S, et al. Near-field amplitude measurement of passive intermodulation in antennas[C]// *European Microwave Conference*. London, UK: IEEE, 2001.
- [29] HIENONEN S, RAISANEN A V. Passive intermodulation near-field measurements on microstrip lines[C]// *2004 34th European Microwave Conference*. Amsterdam, Netherlands: IEEE, 2004.
- [30] HIENONEN S, VAINIKAINEN P, RAISANEN A V. Sensitivity measurements of a passive intermodulation near-field scanner[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2003, 45(4):124–129.
- [31] ZELENCHUK D E, SHITVOV A P, SCHUCHINSKY A G, et al. Discrimination of passive intermodulation sources on microstrip lines[C]// *International Workshop in Multipactor, Corona and Passive Intermodulation*. Valencia, Spain: [s.n.], 2008.
- [32] SHITVOV A P, KOZLOV D S, SCHUCHINSKY A G. Nonlinear characterization for microstrip circuits with low passive intermodulation[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2018, 66(2):865–874.
- [33] SHITVOV A, OLSSON T, ZELENCHUK D, et al. Characterisation of passive intermodulation in printed lines[C]// *Antennas & Propagation Conference*. Loughborough, UK: IEEE, 2008.
- [34] SHITVOV A P, OLSSON T, EL BANNA B, et al. Effects of geometrical discontinuities on distributed passive intermodulation in printed lines[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(2):356–362.

- [35] SHITVOV A P,ZELENCHUK D E,SCHUCHINSKY A G,et al. Studies on passive intermodulation phenomena in printed and layered transmission lines[C]// High Frequency Postgraduate Student Colloquium,2005. Leeds,UK:IEEE, 2005.
- [36] ZELENCHUK D,SHITVOV A P,SCHUCHINSKY A G,et al. Passive intermodulation on microstrip lines[C]// European Microwave Conference. Munich,Germany:IEEE, 2007.
- [37] SHITVOV A P,ZELENCHUK D E,SCHUCHINSKY A G. Experimental observations of distributed nonlinearity in printed transmission lines[R]. Queen's University Research Portal, 2007.
- [38] ZELENCHUK D E,SHITVOV A P,SCHUCHINSKY A G,et al. Passive Intermodulation in finite lengths of printed microstrip lines[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2008,56(11):2426–2434.
- [39] SHITVOV A P, SCHUCHINSKY A G. Distributed passive intermodulation generation in coplanar waveguide transmission lines[C]// Microwave Symposium Digest. Montreal,QC,Canada:IEEE, 2012.
- [40] SHITVOV A P,ZELENCHUK D E,SCHUCHINSKY A G,et al. Passive intermodulation in printed lines:effects of trace dimensions and substrate[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2009,3(2):260–268.
- [41] KOZLOV D S,SHITVOV A P,SCHUCHINSKY A G,et al. Passive intermodulation of analog and digital signals on transmission lines with distributed nonlinearities:modelling and characterization[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016,64(5):1383–1395.
- [42] 何鋈,王琪,胡天存,等. 微带线热致无源互调产物计算模型[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2017,44(3):120–126. (HE Yun,WANG Qi,HU Tiancun,et al. Calculation model for thermal–caused passive intermodulation product of microstrip lines[J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2017,44(3):120–126.)
- [43] 何鋈,李军,崔万照,等. 分布式无源互调研究综述[J]. 空间电子技术, 2016,13(4):1–6. (HE Yun,LI Jun,CUI Wanzhao,et al. Review of research on distributed passive intermodulation[J]. Space Electronic Technology, 2016,13(4):1–6.)
- [44] 叶鸣,贺永宁,崔万照. 基于电热耦合效应的微带线无源互调机理研究[J]. 电波科学学报, 2013,28(2):220–225. (YE Ming,HE Yongning,CUI Wanzhao. Passive intermodulation mechanism of microstrip lines based on the electro–thermal coupling effect[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013,28(2):220–225.)
- [45] 万里鹏,赵小龙,曹智,等. 电热耦合引起的微带传输线无源互调计算与验证[J]. 西安交通大学学报, 2018,52(2):58–62. (WAN Lipeng,ZHAO Xiaolong,CAO Zhi,et al. Calculation and verification of passive intermodulation caused by electrothermal coupling on microstrip transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018,52(2):58–62.)
- [46] 朱泳名,葛鹰,栾翼. 不同传输线设计对无源互调的影响分析[J]. 印制电路信息, 2017,25(8):26–29. (ZHU Yongming,GE Ying,LUAN Yi. The impact of different micro strip antenna design to passive intermodulation[J]. Printed Circuit Information, 2017,25(8):26–29.)
- [47] WILCOX J Z,MOLMUD P. Thermal heating contribution to intermodulation fields in coaxial waveguides[J]. IEEE Transactions on Communications, 1976,24(2):238–243.
- [48] 方俊鑫,殷之文. 电介质物理学[M]. 北京:科学出版社, 1989. (FANG Junxin,YIN Zhiwen. Dielectric physics[M]. Beijing:Science Press, 1989.)
- [49] 杨维生,彭延辉. 微波介质基板材料及选用[J]. 覆铜板资讯, 2015(5):13–18. (YANG Weisheng,PENG Yanhui. Selection of microwave composite dielectric substrate[J]. CCL Information, 2015(5):13–18.)
- [50] 赵小龙,叶鸣,张松昌,等. 基于介电非线性机制的微带电路无源互调效应研究[J]. 电子学报, 2020,48(12):13–18. (ZHAO Xiaolong,YE Ming,ZHANG Songchang,et al. Passive intermodulation in microstrip circuits due to dielectric nonlinearity[J]. Acta Electronica Sinica, 2020,48(12):13–18.)
- [51] SCHUCHINSKY A G,FRANCEY J,FUSCO V F. Distributed sources of passive intermodulation on printed lines[C]// Antennas & Propagation Society International Symposium. Washington,DC,USA:IEEE, 2005.
- [52] ZELENCHUK D,SHITVOV A P,SCHUCHINSKY A G,et al. Effect of laminate properties on passive intermodulation generation[C]// Antennas & Propagation Conference. Loughborough:IEEE, 2007.
- [53] KOZLOV D S,SHITVOV A P,SCHUCHINSKY A G. Passive intermodulation in distributed circuits with cascaded discrete nonlinearities[C]// European Conference on Antennas and Propagation. Lisbon,Portugal:IEEE, 2015.
- [54] KUGA N,TAKAO T. Passive intermodulation evaluation of printed circuit board by using 50  $\Omega$  microstrip line[C]// Proceeding of APMC 2004. New Delhi,India:[s.n.], 2004.

- [55] HENRIE J, CHRISTIANSON A, CHAPPELL W J. Cancellation of passive intermodulation distortion in microwave networks[C]// 2008 38th European Microwave Conference. Amsterdam, Netherland: IEEE, 2008.
- [56] HENRIE J, CHRISTIANSON A, CHAPPELL W J. Prediction of passive intermodulation from coaxial connectors in microwave networks[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2008, 56(1): 209–216.
- [57] ZHAO X, HE Y, 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.
- [58] WONG J S, LANCASTER M J. Microstrip filters for RF/microwave applications[J]. IEEE Microwave Magazine, 2002, 3(3): 62–65.
- [59] 周杰, 刘少云, 薛玉洁, 等. 5G 宏蜂窝移动通信三维圆柱 MIMO 多天线系统性能[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(5): 780–785. (ZHOU Jie, LIU Shaoyun, XUE Yujie, et al. Performance of MIMO multi-antenna system with 3D cylinder for 5G macro-cellular mobile communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(5): 780–785.)
- [60] 陈琦, 何晓阳, 杨阳, 等. 基于 FDTD 的太赫兹光导天线三维辐射特性计算方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011, 9(3): 330–335. (CHEN Qi, HE Xiaoyang, YANG Yang, et al. 3D radiation characteristics calculation for terahertz photoconductive antenna using FDTD method[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(3): 330–335.)
- [61] 韦生文, 吴文煜, 孙国清. 多层微带天线复合成型工艺技术研究[J]. 电子工艺技术, 2009, 30(5): 295–297. (WEI Shengwen, WU Wenyu, SUN Guoqing. Multilayer micro-strip antenna composite molding[J]. Electronics Process Technology, 2009, 30(5): 295–297.)
- [62] 余文革, 钟先信, 巫正中, 等. 三维层叠微带天线的 FDTD 模拟[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(3): 266–269. (YU Wenge, ZHONG Xianxin, WU Zhengzhong, et al. Three-dimensional FDTD simulation of stacked microstrip patch antenna[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33(3): 266–269.)
- [63] 梁建, 洪伟. 多层微带贴片天线的三维全波分析[J]. 电波科学学报, 1999(1): 7–12. (LIANG Jian, HONG Wei. A generalized algorithm for the analysis of multilayered patch antennas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999(1): 7–12.)
- [64] YOU J W, ZHANG J F, GU W H, et al. Numerical analysis of passive intermodulation arisen from nonlinear contacts in HPMW devices[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5): 1470–1480.
- [65] 陈翔, 崔万照, 李军, 等. 空间大功率微波部件无源互调检测与定位技术[J]. 空间电子技术, 2015, 12(6): 1–7. (CHEN Xiang, CUI Wanzhao, LI Jun, et al. Measurement and localization of passive intermodulation distortion of high power microwave component for space application[J]. Space Electronic Technology, 2015, 12(6): 1–7.)
- [66] 高凡, 赵小龙, 叶鸣, 等. 一种基于偶极子近场耦合法测量无源互调的方法[J]. 空间电子技术, 2018, 15(3): 12–18. (GAO Fan, ZHAO Xiaolong, YE Ming, et al. A passive intermodulation measuring method based on the coupling of dipole near-field[J]. Space Electronic Technology, 2018, 15(3): 12–18.)
- [67] BELL T E, LARKSPUR C O. Passive intermodulation probe: US, 2018/0088161[P]. 2018–03–29.

#### 作者简介:

赵小龙(1989–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为微波元器件及其非线性干扰问题. email: zhaoxiaolong@xjtu.edu.cn.

贺永宁(1971–), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微波毫米波新结构器件及其探测系统应用.

崔万照(1975–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间大功率微波技术.