

金属波导连接的无源互调非线性物理机制和计算方法

叶鸣¹, 贺永宁^{1,2}, 王新波², 崔万照²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 空间微波技术国防科技重点实验室, 710100, 西安)

摘要: 针对大功率条件下金属波导连接的无源互调(PIM)难以预测的问题,提出了一种金属波导结的 PIM 非线性物理机制和计算方法. 考虑到波导表面的粗糙度和薄介质层,将波导连接视为 MIM(Metal-Insulator-Metal)结构并确立其粗糙表面接触模型和等效电路模型,然后依据 MIM 结构的导电机理将量子隧穿电流和热发射电流视作引起 PIM 的非线性根源,最后运用傅里叶变换计算各阶 PIM 功率. 相比传统的幂级数方法,该方法能快速计算各阶 PIM 且无需进行参数拟合. 以双载波条件下工作于 TE_{10} 模式的铝质矩形波导为例进行仿真实验,结果表明:波导间接触压力越大,各阶 PIM 越小;PIM 阶数越高,载波功率之比对其影响越大;新方法预测的 5、7、9 阶 PIM 功率相对于载波功率的增长率约为 2,比传统幂级数展开法估计的结果更符合实际.

关键词: 无源互调;波导连接;量子隧穿电流

中图分类号: TN015 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)02-0082-05

Nonlinear Physical Mechanism and Calculation Method of Passive Intermodulation at Metal Waveguide Connection

YE Ming¹, HE Yongning^{1,2}, WANG Xinbo², CUI Wanzhao²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: A novel method considering nonlinear conduction mechanism is proposed to calculate the passive intermodulation (PIM) at waveguide connection and to deal with the prediction difficulty of PIM under high power condition. By taking the fact into account that the surface of the waveguide is always rough and that there is usually a dielectric thin film on it, the waveguide connection is regarded as a metal-insulator-metal structure, and the rough surface contact model and the equivalent circuit model are given. Then, the quantum tunneling current and the thermionic emission current are assumed to be the main nonlinear sources of PIM across the real waveguide connection, and the PIM power levels are obtained with the aid of the Fourier Transformation. Compared with the conventional power series method, the proposed method can compute any order of PIM rapidly without parameter fitting. Simulations on rectangular aluminum waveguide operating at TE_{10} mode are performed. The results show that the PIM power have a lower level under heavier contact pressure; higher order PIM power have more dependence on the power ratio of the input power; and the growth rates for 5-, 7-, 9- order PIMs power are all about 2, which is more realistic than the theoretical results from the classic power series method.

Keywords: passive intermodulation; waveguide connection; quantum tunneling current

近年来,随着微波部件集成度的不断提高、发射机功率的不断增大以及接收机灵敏度的不断提高,无源互调(passive intermodulation, PIM)问题越来越引起人们的重视。

无源互调产生的非线性机理可以归结为 2 类:接触非线性和材料非线性。其中,对材料非线性已经研究得比较透彻,但接触非线性目前仍不是很清楚^[1-2],这给准确预测 PIM 功率电平带来了困难。文献[3-4]以 MIM(Metal-Insulator-Metal)结构的量子隧穿效应作为产生机理对 PIM 问题进行了较为系统的研究,但均是基于幂级数展开法来对 PIM 进行定量计算,因而无法快速获取更高阶 PIM 的信息,也不能反映三阶非线性可能会随外界条件的变化而变化的现象。文献[5]在考虑量子隧穿效应的基础上采用傅里叶变换来获取任意阶的 PIM 功率电平,但是没有将热发射电流考虑在内,也没有在非线性导电特性的基础上对 MIM 结构的 PIM 特性进行详细的分析计算。

本文综合考虑了 MIM 结构的量子隧穿电流和热发射电流这 2 种非线性导电过程,对波导连接的 PIM 功率受接触压力、载波功率等因素的影响规律进行了系统的理论分析。

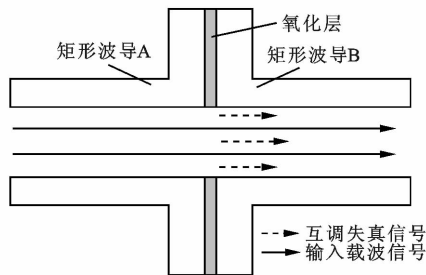
1 波导连接的电接触模型

1.1 粗糙表面的接触模型

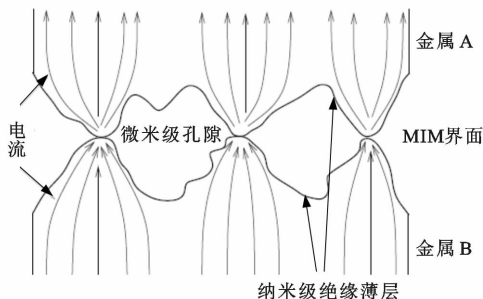
由于自然氧化、沾污等原因,金属波导表面通常覆盖有一层厚度在纳米级的氧化物介质薄层,因此宏观上金属波导连接如图 1a 所示。此外,由于机械加工等原因,金属波导表面还具有微米级的粗糙度,因此微观上金属波导连接如图 1b 所示。综合考虑上述金属波导表面的 2 个基本特征,可将其视为一种复杂的 MIM 结构。正是由于金属波导连接的这种结构特性,当载波信号进入矩形波导时,在波导内壁激发的表面电流将以某种非线性的方式流过介质层,最终导致矩形波导中出现互调信号,如图 1a 所示。

由于部件表面往往都是经过多道工序加工而成,实际形成的表面微观形貌具有随机性,因此对于粗糙表面的研究大都基于随机统计理论。在对单个粗糙表面进行建模分析时,常将表面微凸体近似为大小相同的半球体^[6]。如果微凸体高度分布是对称的,则采用简单的高斯分布模型,否则采用威布尔分布模型更为合理^[7-8]。在对 2 个粗糙表面的接触进行建模分析时,经典的 GW 模型^[6]将其等效为一个理

想光滑硬平面与一个具有等效参数的粗糙面的接触。为了确定实际波导连接的电学特性,需要根据粗糙表面的力学接触模型确立 MIM 界面的实际接触面积。实际接触面积随波导连接的接触压力发生变化,也就是微凸体的形变量影响实际接触面积。Kogut 等人^[9]给出了综合考虑微凸体的弹性形变、塑性形变以及弹塑性形变后的接触压力和实际接触面积的计算公式。实际的计算结果表明,在较高的接触压力下,采用高斯分布与采用威布尔分布得到的结果很相近。因此,本文后面给出的结果均是基于高斯分布计算得到的。



(a) 波导连接的宏观 MIM 结构示意图



(b) 波导连接的微观 MIM 结构示意图

图 1 波导连接的 MIM 结构示意图

1.2 波导 MIM 结构的电接触模型

根据图 1b 的结构给出波导连接的等效电路^[5],如图 2 所示。电路的线性参数包括收缩电阻 R_c 、接触区介质层电容 C_{ct} 和微孔隙区电容 C_{mh} ,电路的非线性参数包括接触区 MIM 结构的电阻 R_{nl} 。接触区 R_{nl} 主要来源于 MIM 结构薄介质层的量子隧穿、热发射等非线性过程。根据工程实际,可以认为波导连接的非线性极弱,所以在确定波导连接结上的压降时,忽略流经 R_{nl} 的非线性电流,即在等效电路中忽略 R_{nl} ,将其所在支路视作开路。等效电路参数的详细计算公式参见文献[5]。

波导连接结的总线性阻抗为

$$Z_j = \frac{(1/j\omega C_{ct} + R_c)(1/j\omega C_{mh})}{(1/j\omega C_{ct} + R_c) + (1/j\omega C_{mh})} \quad (1)$$

根据某一模式下波导内的场分布可以计算得到波导内壁上的表面电流密度,对该表面电流密度进行积分便可得到流过波导连接的电流 I . 因此,波导连接的压降 $V_j = I|Z_j|$.

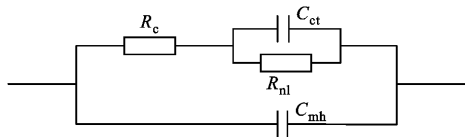
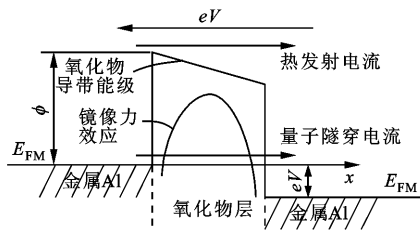


图2 波导连接的等效电路图

2 MIM结构的非线性导电机理

在不同的材料性质和外部条件下,MIM结构的导电机理有所不同. 影响MIM结构导电特性的主要因素有材料本身的性质(影响势垒形状、介电常数)和外部条件(影响电场强度、温度等).

微波波导连接有2种实际情况:①波导连接上的压降不大,因而介质层中的电场强度不大;②金属表面的介质层厚度通常为纳米级,因此波导连接所形成的薄势垒MIM结构的非线性导电机理主要为量子隧穿过程以及热电子发射过程,它们也正是波导连接产生PIM的非线性根源所在. MIM结构的能带图及相应的导电机理如图3所示.



ϕ 为势垒高度; E_{FM} 为费米能级; V 为外加偏压; e 为电子电荷

图3 MIM结构的能带图及其导电机理

3 基于非线性导电机理的PIM分析

3.1 计算原理

考虑到双载波情况,互调的频率 f_{IM} 可以表示为: $f_{IM} = mf_1 \pm nf_2$, 其中 f_1, f_2 为输入载波频率, m, n 为非零整数. 互调的阶数定义为 $N = |m| + |n|$. 本文中,以 $P_{IM,k}$ 表示 k 阶PIM功率. 对于双载波情况,假设波导连接上的压降分别为 V_1, V_2 , 于是波导连接上的总压降可表示为如下的时谐形式

$$V(t) = V_1 \sin(\omega_1 t) + V_2 \sin(\omega_2 t) \quad (2)$$

至此,便可根据前述MIM结构的非线性导电机理对流过MIM结构的非线性电流进行计算. 假

设非线性 J - V 关系可表示为 $J(t) = f[V(t)]$, 那么计算互调电流密度 J_{IM} 的过程如图4所示: 首先根据波导结总压降 $V(t)$ 计算流过波导结的总电流密度 $J(t)$, 然后对总电流密度进行傅里叶变换即可得到任意阶互调电流密度 J_{IM} .

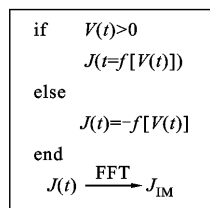


图4 基于非线性机理和傅里叶变换的PIM计算过程

实际上,图4中得到的 J_{IM} 是具有互调频率的体电流密度(具体的频率值取决于傅里叶变换的参数设置),也可称之为电流密度形式的PIM. 为了得到PIM功率,还需进行如下处理.

(1) 将体电流密度转化为表面电流密度

$$j_{IM} = J_{IM} \delta A^* \quad (3)$$

式中: δ 为趋肤深度; A^* 为归一化的实际接触面积^[9]. 式(3)仅适用于矩形波导结构,如果对其他结构进行分析,则需做相应调整,以圆波导结构为例: $j_{IM} = J_{IM} \delta A^* (1 + \delta/2R)$ (R 为圆波导半径).

(2) 依据工作在 TE_{10} 模式的矩形波导的传输信号的功率与表面电流密度之间的关系得到互调信号的功率

$$P_{IM} = \frac{(2\omega_2 - \omega_1) \mu a^3 b}{4\pi^2 \beta} \left(\frac{j_{IM} \pi}{a} \right)^2 \quad (4)$$

式中: $\omega_1 = 2\pi f_1$; $\omega_2 = 2\pi f_2$; μ 为真空磁导率; a 为波层横截面矩形的宽; b 为矩形的高; $\beta = (2\omega_2 - \omega_1)(\mu \epsilon)^{1/2}$; ϵ 为真空中的介电常数.

本文约定以 1 mW 为参照,将PIM功率表示为如下形式

$$P_{IM}(\text{dB}) = 10 \lg(P_{IM}/10^{-3}) \quad (5)$$

当分析矩形波导的其他模式或者其他波导结构时,式(4)需做相应改动.

3.2 PIM计算结果及其分析

本节计算中使用的默认参数值如下. ①载波参数:输入载波频率 $f_1 = 9.75$ GHz, $f_2 = 10.0$ GHz, 功率均为 100 W. ②粗糙表面参数:微凸体的面密度 $\eta = 94 \times 10^{10} \text{ m}^{-2}$, 半径 $R = 10 \text{ } \mu\text{m}$, 表面高度的标准差 $\sigma = 0.5 \text{ } \mu\text{m}$. ③结构参数:矩形波导尺寸 $a = 22.86$ mm, $b = 11.43$ mm; 波导材料为铝, 介质层厚度 $s = 4$ nm, 介质层相对介电常数 $\epsilon_r = 4$.

采用本文模型可以仅通过一次计算即得到任意阶的 PIM 功率电平. 图 5 给出了双载波条件下的 PIM 输出频谱, 可以看到, 随着 PIM 阶数的增加, PIM 功率逐渐递减, 在载波频率处, 由于 MIM 结构的存在而产生的载波频率信号相比于载波信号约低 110 dB, 因而对载波信号的影响可忽略.

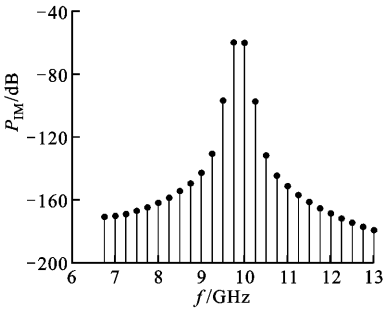


图 5 双载波条件下的 PIM 输出频谱

图 6 为 PIM 功率随法兰间接触压力的变化情况. 从图 6 可以很明显地看出, 随着接触压力的增加, P_{IM} 急剧减小, 但是减小的幅度随着接触压力的增加而逐步减缓. 这是因为: 接触压力的增加导致实际接触面积的增加, 使得波导结的总阻抗减小, 波导连接上的压降也就随之减小, 最终导致 P_{IM} 减小; 同时, 随着接触压力的增加, 波导连接上的压降随接触压力的增加渐趋平缓, 所以 P_{IM} 的变化也就趋于平缓. 文献[10]中的实验结果证实了这一理论预测在一定程度上的合理性.

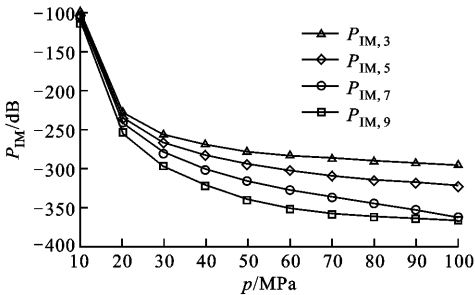


图 6 PIM 功率随法兰间接触压力的变化情况

图 7 为在等幅载波条件下 PIM 功率随输入载波功率的变化情况. 从图 7 可以看出, P_{IM} 随输入载波功率的增加而增加, 这是因为载波的输入功率增加, 导致流过波导结的电流增加, 从而增大了结上的压降, 导致 P_{IM} 增加. 与基于幂级数方法的结论^[4]相比, 本文结果在一定程度上更符合实际.

表 1 比较了 PIM 功率增长量的传统幂级数方法^[4,11]、本文方法预测值及一组实测值. 实测结果来自 Summitek 公司对镀镍连接器的 PIM 增长斜

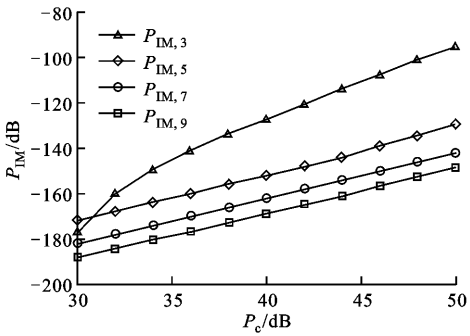


图 7 PIM 功率随输入载波功率的变化情况

率的测量, 测量时载波功率从 30 dB 逐渐增加至 43 dB^[11]. 本文研究结果还表明, 在相当大的功率范围内, 3 阶 PIM 的功率都要远大于高阶 PIM 的功率, 这正是 $P_{IM,3}$ 广为通信业界及学术界所关注的原因.

表 1 PIM 增长量的理论预测与实测结果对比

方法	P_{IM} 增长量/dB		
	3 阶	5 阶	7 阶
幂级数方法	3.0	5.0	7.0
本文方法	3.0	2.0	2.0
实际测量	2.3	2.7	1.5

在保持载波功率之和一定的情况下, 用载波功率之比 $P_r = P_1/P_2$ (其中 P_1 和 P_2 分别为 2 个输入载波的功率) 表述 2 个载波对 PIM 功率的影响. 基于传统幂级数方法的理论分析表明, $P_{IM,(2k+1)}$ 的最大值将出现在 $P_r = k/(k+1)$ 处. 图 8 为本文计算方法所得的 P_r 对 PIM 功率的影响规律, 可以看出, 本文方法得到的 P_{IM} 最大值时的 P_r , 比传统的幂级数

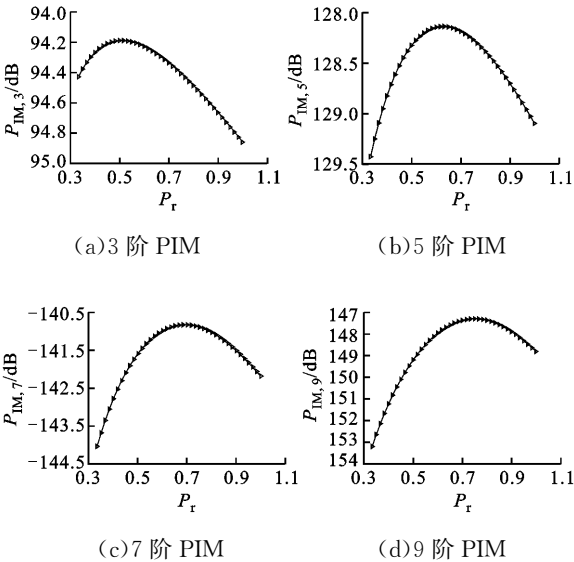


图 8 不同阶数的 PIM 功率随载波功率之比的变化

方法的结果要略小。此外,还可以观察到随着 PIM 阶数的增加, P_{IM} 受 P_r 的影响也逐渐增加, $P_{\text{IM},3}$ 的变化不到 1 dB, $P_{\text{IM},5}$ 的变化则超过 1 dB, $P_{\text{IM},9}$ 的变化则可达 6 dB。这一分析结果表明,在进行 P_{IM} 测量时,如果载波功率不稳定,则可能导致测量结果 P_{IM} 有一定的误差。

4 结 论

本文基于 MIM 结构的非线性导电特性,对微波波导连接产生的 PIM 功率进行了详细的计算分析。结果表明:PIM 的阶数越高,PIM 功率越低;法兰间的接触压力越大,PIM 功率越小;载波功率之比对 PIM 功率的影响随着 PIM 阶数的增加而增加;高阶 PIM 随输入功率的增加而增加的速度小于传统幂级数方法的预测值,但本文结果在一定程度上更符合实测结果,从而证明了本文模型的合理性及优越性。

参考文献:

- [1] 张世全. 微波与射频频段无源互调干扰研究[D]. 西安: 西安电子科技大学理学院, 2004.
- [2] WILKERSON J R, GARD K G, SCHUCHINSKY A G, et al. Electro-thermal theory of intermodulation distortion in lossy microwave components[J]. IEEE Trans on MTT, 2008, 56(12): 2717-2725.
- [3] 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.
- [4] VLADIMIRESCU M, KWIATKOWSKI R, ENGEL K. Tunnel conduction consequences in high frequency microcontacts: passive intermodulation effect [C] // Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electric Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 152-159.
- [5] VICENTE C, HARTNAGEL H L. Passive intermodulation analysis between rough rectangular waveguide flanges [J]. IEEE Trans on MTT, 2005, 53(8): 2515-2525.
- [6] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J P B. Contact of

nominally flat surfaces [J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A Mathematical and Physical Sciences, 1966, 295(1442): 300-319.

- [7] YU Ning, POLYCARPOU A A. Contact of rough surfaces with asymmetric distribution of asperity heights [J]. ASME Journal of Tribology, 2003, 124(2): 367-376.
- [8] 叶鸣, 贺永宁, 王新波, 等. 基于粗糙表面模型的微波波导连接的无源互调研究[J]. 微波学报, 2010, 26(4): 65-69.
- YE Ming, He Yingning, Wang Xinbo, et al. Study of passive intermodulation of microwave waveguide connection based on rough surface model [J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(4): 65-69.
- [9] KOGUT L, ETSION I. An finite element based elastic-plastic model for the contact of rough surfaces [J]. Tribology Transactions, 2003, 46(3): 383-390.
- [10] VICENTE C, WOLK D, HARTNAGEL H L, et al. Experimental analysis of passive intermodulation at waveguide flange bolted connections [J]. IEEE Trans on MTT, 2007, 55(5): 1018-1028.
- [11] Summitek Instruments Inc. Investigation of passive IM level vs power [EB/OL]. (2008-05-21) [2010-05-21]. http://www.summitekinstruments.com/passive/docs/2008/IM%20Power%20vs%20Carrier%20Power%20IEC%20Austria%205_00%20Rev%20FINAL.pdf.

[本刊相关文献链接]

- 金属涂敷层对圆波导传输特性的影响分析. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 76-80.
- 分析表面粗糙有耗波导传输特性的频域有限差分方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 85-88.
- 一种降低交替方向隐式时域有限差分数值色散的方法. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 209-212.
- 过模高功率太赫兹表面波振荡器优化设计. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1531-1536.
- 大功率太赫兹返波管的数值模拟研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(12): 1446-1450.
- 波导与开口腔体瞬态特性研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(10): 1179-1183.

(编辑 刘杨)