

DOI: 10.11991/ykj.201701014

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20170504.0651.002.html>

一种 S 波段基于热致振动引起无源互调的初步机理分析

潘松松, 吴秉琪, 何瑜, 刘长军

四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064

摘 要:针对 S 波段通信系统中的无源互调 (PIM) 干扰问题, 提出了一种基于热致振动的无源互调新机理。在双频微波输入条件下, 从拍现象中温度波动出发, 通过热致振动中的阻抗变化关系, 建立了统一的传输线非线性方程, 然后以波导为对象进行了多物理场仿真分析和实验验证。设计并加工了 3 种不同窄边厚度的 BJ-22 型波导, 利用大功率无源互调测量系统, 在 47~53 dBm 功率范围内测试波导 9 阶 PIM 功率。结果表明, 相同大功率输入条件下, 波导壁越薄, 波导 PIM 越强, 显示热致振动会引起 PIM 并受振动程度的影响。

关键词:无源互调; 热致振动; 多物理场仿真; 波导; 拍现象; 非线性传输线方程; 电热耦合; 大功率

中图分类号: TN972

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2018)03-0019-04

A preliminary mechanical analysis on passive intermodulation based on thermal induced vibration at S-band

PAN Songsong, WU Bingqi, HE Yu, LIU Changjun

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: A new mechanism of passive intermodulation (PIM) based on thermally induced vibration is proposed to deal with the problem caused by PIM in communication systems at S-band. In the dual-frequency microwave signals input conditions, starting with the temperature fluctuation of beat phenomenon, a unified nonlinear equation of transmission line was established by using the impedance changing equation in thermally induced vibration, then waveguide was selected as the object to do multi-physics simulation analysis and experimental verification. Three BJ-22 microwave waveguides with different narrow wall thicknesses were designed and fabricated. The waveguides' 9th order PIM with power ranging from 47 dBm to 53 dBm was tested by using the high power PIM measurement system. The results show that the waveguide with thinner narrow wall produced higher PIM power compared to that with thicker narrow wall under the same conditions. It indicates that the thermal induced vibration of the transmission line will lead to PIM effects and it is affected by the degree of vibration.

Keywords: passive intermodulation; thermally induced vibration; multi-physics simulation; waveguide; beat phenomenon; nonlinear transmission line equation; electro-thermal coupling; high power

无源互调 (passive intermodulation, PIM) 是在卫星、雷达等通信系统中常见的一类干扰信号, 当复数个载波信号通过无源器件时, 由于器件固有的部分弱非线性特质, 其输出信号将包含各载波混频的产物, 并恶化接收系统的通信质量。随着通信系统的可利用频谱越来越窄, 功率容量日渐增大, PIM 效应也显著增强, 使得其成为了限制系统发展的主要瓶颈之一^[1-3]。引发 PIM 的根源

种类繁多, 大致可归类为两种: 接触非线性和材料非线性^[4]。接触非线性是指具有非线性电流和电压特性的电接触, 比如金属焊接和裂缝、金属-氧化物-金属连接等^[5]; 材料非线性是指具有固有非线性电特性的材料, 如铁磁体、等离子体、热敏电阻等。从多物理场的角度来说, 器件由于温度变化而出现的众多非线性效应也是产生 PIM 的潜在因素。文献[6]从电热耦合效应的角度研究了阻性器件的 PIM 问题, 文献[7]提出了基于热电子发射效应的波导结非线性无源互调模型。总的来说, 关于热效应致 PIM 的研究相对较少。这主要是因为大部分通信系统的工作频率都很高, 同时材料对于热的响应往往要慢于电响应^[4], 使得整

收稿日期: 2017-01-24. 网络出版日期: 2017-05-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61271074).

作者简介: 潘松松 (1993-), 男, 硕士研究生;
刘长军 (1973-), 男, 教授.

通信作者: 刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

个多物理场的耦合过程极为复杂, 加大了研究难度。在工程实践中, 热效应广泛存在, 目前已观察到许多 PIM 随温度变化而变化的现象。如果系统设计合理, 各接触部件连接良好, 热效应导致的 PIM 将取代其他类型的 PIM 成为系统主要的干扰源^[8], 因而急需对相关热致 PIM 机理进行更加深入的研究。

当系统中存在 2 个频率间隔较小的输入信号时, 介质材料的周期性吸热放热将使器件发生热致振动, 并在系统中引入 PIM。本文在提出这种新机理的基础上, 用多物理场仿真软件对相关推导场景进行仿真验证, 最后根据理论设计并完成了波导传输线实验, 证实了此类 PIM 的存在。

1 热致振动引起的无源互调

拍现象^[9](或差拍现象)是振动合成过程中的一种特有现象, 它在光学、声学、电磁学领域都有重要的应用。在微波频段, 当 2 个频率相近的微波信号在有耗介质中传输时, 由拍现象理论可知, 其总电场幅度会随 2 个信号的包络变化, 其变化周期与 2 个信号的差频相关。假设 2 个信号分别为

$$\begin{cases} u_1(t) = V_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) \\ u_2(t) = V_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2) \end{cases}$$

式中: V_1 、 V_2 分别是 2 个信号的振幅, ω_1 、 ω_2 为角频率, θ_1 、 θ_2 为初始相位。

那么总电场为

$$\begin{aligned} u &= u_1(t) + u_2(t) = V_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) + V_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2) = \\ &= \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + 2V_1 V_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \theta_1 - \theta_2]} \times \\ &= \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + \varphi\right) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\varphi = \arctan\left[\frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2} \tan\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right)\right]$ 。

由式 (1) 可知, 合成电场的幅度变化具有周期性, 其周期等于差频的倒数, 同样的, 介质中由电损耗带来的热功率的变化规律也如此。

热功率的变化将使介质温度发生波动, 热功率和温度之间的函数关系可以表示为

$$T(\mathbf{r}, t) = f(P_{\text{Loss}}, \omega_{\text{IM}}t)$$

式中: $T(\mathbf{r}, t)$ 是介质的温度, \mathbf{r} 代表温度点到源点的距离矢量, t 是时间, P_{Loss} 是介质中与电损耗相关的热功率, ω_{IM} 是两个微波信号的差频。建立电和热的多物理场耦合方程可知, 当热传导达到稳态的时候, 温度会呈现出与差频相关的周期性波动。整个过程中温度 T 的变化为

$$T = T_0 + at + b \sin(\omega_{\text{IM}}t) \quad (2)$$

式中: T_0 是介质初始温度; at 是温度线性项; b 是温度的周期振幅量, 与输入信号和材料特性相关。当达到热平衡后, 温度的线性项变为常数。

对于绝大多数材料而言, 温度的波动将引发

热胀冷缩, 如果温度场的梯度急剧变化, 甚至会引发热致振动^[10]。例如周期性飞过日照区和阴影区的在轨卫星, 很容易因温度变化产生热致振动。根据热力学相关理论^[11], 器件温度波动的振幅越大, 即温差越大, 热膨胀(收缩)的幅度也就越大。对于微波传输线而言, 热致振动将在微观层面改变器件的尺寸, 导致器件特征阻抗发生变化。因此其特征阻抗 $Z_0(\omega_{\text{IM}})$ 可以表示为

$$Z_0(\omega_{\text{IM}}) = Z_0 \cdot g(P_{\text{Loss}}, \alpha, \omega_{\text{IM}}t)$$

式中: α 是材料热膨胀系数, Z_0 是传输线初始特征阻抗。

特征阻抗的变化将进一步改变线上的电压和电流, 并在输入阻抗 $Z_{\text{in}}(\omega_{\text{IM}})$ 中引入周期性变化:

$$Z_{\text{in}}(\omega_{\text{IM}}) = Z_0(\omega_{\text{IM}}) \frac{Z_L + Z_0(\omega_{\text{IM}}) \tan(\beta l)}{Z_0(\omega_{\text{IM}}) + Z_L \tan(\beta l)}$$

式中: β 是相位常数, l 是输入端到负载的距离, Z_L 是负载阻抗。最终, 微带线上非线性的电压和电流将导致无源互调的产生。

2 仿真建模分析

下面利用多物理场仿真软件 COMSOL 进行波导仿真, 以 BJ-22 型波导为原型建模, 传输微波频率分别为 $f_1=2.4$ GHz 和 $f_2=2.5$ GHz, 仿真计算波导窄边壁上中心点 A 处在双频微波输入下的温度和电场变化, 模型二维简化图如图 1 所示。

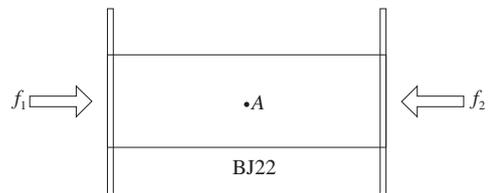


图1 模型二维简化

A 点的电场变化如图 2 所示, 电场的包络随 2 个信号差频变化; A 点温度变化如图 3 所示, 温度变化以差频 (100 MHz) 的倒数 (10 ns) 为周期波动上升, 与式 (2) 符合良好。由此可以看出, 在双频微波输入下, 波导因损耗导致的温升包含一个周期波动项, 从而使波导壁产生热致振动。

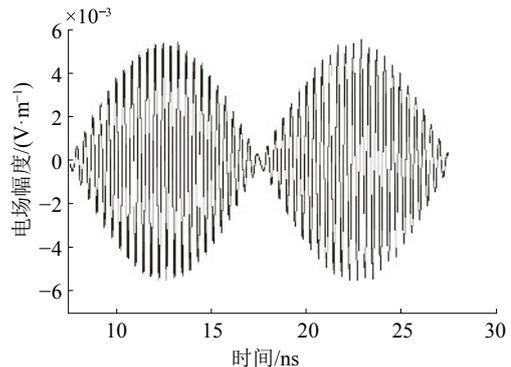


图2 A点电场变化

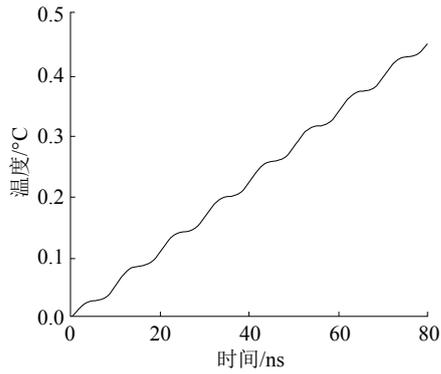


图3 A点温度变化

波导壁的膨胀和收缩将导致波导宽边尺寸 a 发生改变,进而在传输线特征阻抗 Z_w 中引入非线性,并有如下关系:

$$\frac{\Delta Z_w}{Z_w} = -\frac{\lambda^2}{4a^2 - \lambda^2} \frac{\Delta a}{a}$$

式中: λ 是工作波长, ΔZ_w 是特征阻抗变化量, Δa 是宽边热振动幅度,与温度振幅量 b 、热膨胀系数 α 等有关。 ΔZ_w 与 Δa 成正比关系,说明热振动越剧烈,波导阻抗非线性越强,PIM 功率也就越大。为了模拟波导壁的非线性振动,我们设置模型中宽边尺寸 a 为变量,并让其包含一个以差频为角频率的波动项,调整输入功率并适当放大 a 中的非线性系数,继续仿真 A 点的电场变化。

A 点电场变化如图4所示。

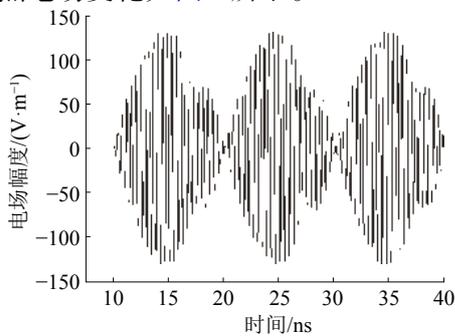


图4 引入非线性后的A点电场变化

可见电场包络仍随差频周期变化,将电场做快速傅里叶变换 (fast Fourier transformation, FFT) 后得到频域结果如图5所示。在频谱上除了基频分量,也出现了3阶、5阶等互调频率分量,说明特性阻抗的非线性变化会引入 PIM。

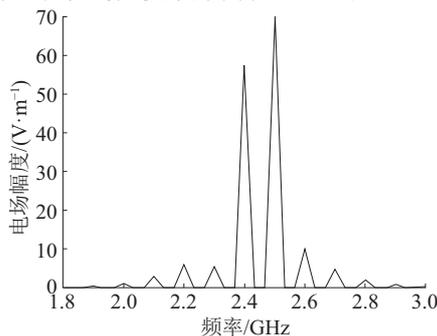


图5 A点电场 FFT 变换频域结果

3 实验验证

在射频和微波频段,电流由于趋肤效应主要集中在导电材料表面,材料损耗产生的热量将引发温度变化,同时趋肤层的微小热源会热胀冷缩,迫使整个部件作强迫振动。在相同的输入功率下,对于不同窄边壁厚的 BJ-22 型波导来说,损耗产生的热能是相等的,根据相关矩形厚板振动计算模型分析^[12],波导壁越厚,热致振动效应越弱,相应产生的 PIM 功率也更小。

因此实验中的待测 BJ-22 型波导仅壁厚不一致,通过测量不同器件的 PIM 相对强弱就可验证热振动致 PIM 效应。具体实验系统如图6所示。

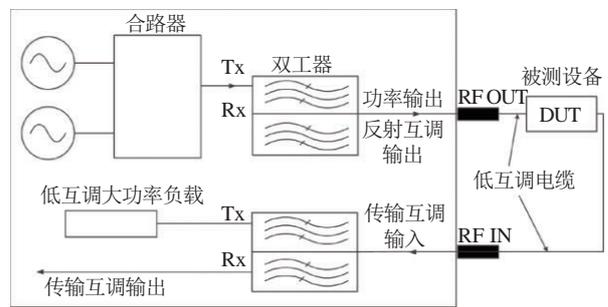


图6 PIM 测试系统

所用波导材质为不锈钢,波导和法兰使用一体式加工,中间未焊接,避免因焊接而在接触面引入其他形式的 PIM,同时在波导和波同转换两器件接触面加入聚酰亚胺薄膜,削弱该处的接触 PIM。图7为实际测量所用波导和波导同轴转换。窄边壁厚分别为 0.5、1 和 2 mm,宽边厚度皆为 2 mm。输入微波频率分别为 2 161 MHz 和 2 174 MHz,测试的 9 阶 PIM 频率为 2 109 MHz。实验中每一路微波输入功率同时从 47 dBm 变化到 53 dBm,每隔 1 dBm 测量一次波导 PIM 功率,并在同轴直连的情况下对系统噪声功率进行测量。

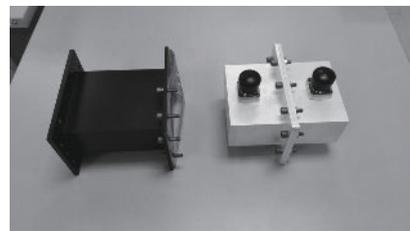


图7 实际测量所用波导和波导同轴转换

4 实验结果

实验测量结果如图8所示,当输入功率不大于 49 dBm 的时候,3 个波导的互调功率缓慢提升,但互相之间差异并不明显,同时波导 PIM 功率和系统噪声功率相差在 1.8 dB 以内,说明此时波导热振动不明显,相应 PIM 较弱。

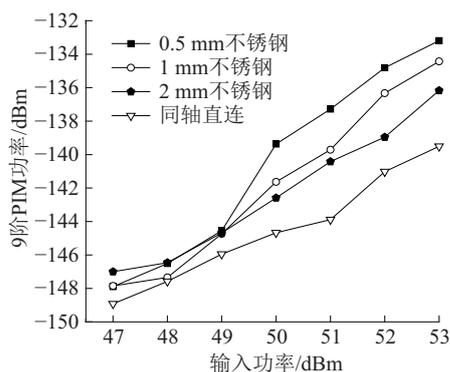


图8 9阶传输 PIM 功率测量结果

当输入功率大于 49 dBm 的时候, 3 个波导的 PIM 功率开始随输入功率的增大而显著提升, 功率上升曲线斜率不小于 2.13, 波导 PIM 功率比系统噪声功率至少大 2 dB, 说明此时测量到的功率信号是由波导自身互调产生的。

在波导的 PIM 功率曲线的后半段, 存在很明显趋势, 即相同输入功率下, 0.5 m 不锈钢波导 PIM 最强, 1 mm 不锈钢波导 PIM 次之, 2 mm 不锈钢波导 PIM 最弱。结合前面的分析, 充分说明了热振动 PIM 是存在的, 其非线性来源于不锈钢波导壁的热致振动, 且壁越薄, 热振动越强, 相应的 PIM 功率越大。

5 结论

本文提出了一种基于热致振动产生无源互调的新机理, 初步分析了此无源互调与温度波动的关系, 然后利用多物理场仿真软件对相关物理过程进行仿真探究, 最后利用波导传输线在 S 波段进行了实验验证, 结果表明:

1) 该 PIM 效应在大功率条件下表现显著。当实验系统的输入微波功率较低时, 3 种窄边厚度不同的波导互调功率无显著差异, 说明此时热致振动 PIM 不占主导地位。而当微波功率提高时, 在其他参数相同的条件下, 随着波导发热量的增加, 热致振动变强, 开始与其他类型的 PIM 区分开。

2) 该 PIM 效应确实存在, 其强弱和热振动振幅有正相关关系。理论上波导壁越薄, 越容易产生振动, 进而传输线阻抗非线性增强, 其 PIM 功

率就越大, 随后的波导实验的中也观察到了此类现象, 这也定性验证了该 PIM 机理的正确性。

本文仅对比分析了不同条件下此类 PIM 的强弱关系, 缺乏相应的定量分析。今后研究的方向可以从理论角度给出更多的定量结果, 结合实验验证, 并提出相应的 PIM 抑制手段。

参考文献:

- [1] LIU P L. Passive intermodulation interference in communication systems[J]. Electronics & communication engineering journal, 1990, 2(3): 109-118.
- [2] SHASTRY S V K, HARIHARAN V K, WARAT, et al. Passive intermodulation in microwave space systems[J]. IETE technical review, 2001, 18(6): 455-474.
- [3] 张世全, 傅德民, 葛德彪. 无源互调干扰对通信系统抗噪性能的影响[J]. 电波科学学报, 2002, 17(2): 138-142.
- [4] 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.
- [5] 江伟健, 赵洪, 李家林, 等. 波导法兰盘连接结 MIM 结构的研究[C]//2013 年全国微波毫米波会议论文集. 重庆, 中国, 2013.
- [6] SHITVOV A, SCHUCHINSKY A G, STEER M B, et al. Characterisation of nonlinear distortion and intermodulation in passive devices and antennas[C]//Proceedings of the 8th European Conference on Antennas and Propagation. Hague, Netherlands, 2014: 1454-1458.
- [7] 叶鸣, 贺永宁, 孙勤奋, 等. 基于热电子发射非线性的波导结无源互调机理研究[J]. 空间电子技术, 2012, 9(3): 55-57, 70.
- [8] 王斌. 微波频段无源互调干扰研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [9] 贺小龙, 张立民, 邱飞力, 等. 内燃动车组辅助机组拍振现象分析[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(1): 83-87, 105.
- [10] SHEN Zhenxing, HU Gengkai. Thermally induced vibrations of solar panel and their coupling with satellite[J]. International journal of applied mechanics, 2013, 5(3): 1350031.
- [11] 李林, 李映辉, 袁继禹. 基于有限元方法的空气预热器转子热位移分析[J]. 重庆理工大学学报, 2016, 30(10): 49-54.
- [12] 张羽飞, 杜敬涛, 杨铁军, 等. 任意边界条件三维弹性矩形厚板结构振动分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(11): 1448-1453, 1531.

本文引用格式:

潘松松, 吴秉琪, 何瑜, 等. 一种 S 波段基于热致振动引起无源互调的初步机理分析[J]. 应用科技, 2018, 45(3): 19-22.

PAN Songsong, WU Bingqi, HE Yu, et al. A preliminary mechanical analysis on passive intermodulation based on thermal induced vibration at S-band[J]. Applied science and technology, 2018, 45(3): 19-22.