

# 一种热效应引起传输线无源互调的新机理初步研究

潘松松, 吴秉琪, 何瑜, 刘长军, 陈翔, 崔万照

四川大学电子信息学院, 成都市 610064

中国空间技术研究院西安分院, 西安市 710100

E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

**摘要** 当两个频率相近的微波信号在有耗传输线中传输时, 传输线损耗的功率随两个微波信号的包络变化, 其损耗功率引起的温度变化则随两信号的差频周期性波动。传输线在热胀冷缩效应下产生周期性的热致振动, 使传输线特征阻抗随差频周期性变化, 从而引起无源互调(PIM)。通过多物理场仿真给出了该无源互调的机理, 并采用波导传输线进行了实验验证。实验使用厚度不同的不锈钢金属片, 引起热致振动强度不同。两路输入信号功率都是 43dBm, 频率间隔从 20MHz 变到 50MHz, 测试其 3 阶 PIM 功率。结果表明: 金属片越薄产生的 PIM 功率越大, 显示热致振动会引起 PIM 且互调强弱受振动程度的影响。

**关键词** 无源互调; 热效应; 无线通信;

## A preliminary study on the new mechanism of passive intermodulation of transmission line caused by thermal effect

PAN Songsong, WU Bingqi, HE Yu, LIU Changjun, CHEN Xiang, CUI Wanzhao

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

China Academy of Space Technology, Xi'an, 710100, China

**Abstract:** When two microwave signals with close frequencies are transmitted simultaneously, the power loss varies with the envelope of the two signals. The loss causes a periodical temperature variation at the beat frequency of the two signals. The transmission line vibrates due to the thermal expansion, which makes the characteristic impedance varies accordingly at the beat frequency, and the passive intermodulation (PIM) is induced. In this paper, we studied the above mechanism by using multiphysics simulation and verified it with microwave waveguides. Three stainless steel samples with different thicknesses were used in the experiment. The input power of both signals is 43 dBm, we tested the 3th order PIM power with signal frequency spacing sweeping from 20MHz to 50MHz. The results show that the thinner the sheet metal is, the higher PIM power it produces. It indicates that the thermal induced vibration of the transmission line will lead to PIM effects.

**Keywords:** passive intermodulation ; thermal effect; radio communication;

### 1 引言

无源互调 (Passive Intermodulation, PIM) 是指当多载波信号通过具有非线性响应的无源器件时, 产生的混频现象, 其产物是载波信号频率的线性组合并会对接收系统造成干扰。随着通信系统的频谱资源日益紧张, 系统的发射功率越变越大, PIM 给系统带来的干扰问题也越来越受到通信界的广泛重视<sup>[1-5]</sup>。

无源互调的机理可以归纳为两大类: 接触非线性和材料非线性。接触非线性是指具有非线性电流和电压特性的电接触; 材料非线性是指具有固有非线性电特性的材料<sup>[6-8]</sup>。

当多载波的微波作用于材料时, 材料损耗

的微波功率随两信号差频周期性变化, 导致材料温度出现周期性波动。大部分的材料遵循热胀冷缩规律, 当温度周期波动的时候, 材料也会随之产生周期性的机械振动, 即热致振动<sup>[9-10]</sup>。实际中射频电流的频率很高, 材料对于热的响应往往要慢于电响应, 所以差频越小, 电热耦合效果越好, 热致振动也就越明显。热致振动会导致微波器件的特性变化, 引起传输线特征阻抗变化, 线上将存在非线性的电压和电流, 这就是热致振动引起 PIM 的基本机理。

本文提出在输入两个频率相近的微波信号时, 由材料温度的周期性波动引起器件热致振动而产生 PIM 的一种新机理, 利用多物理场仿

真软件进行仿真验证,同时设计并完成微波波导传输线实验,证实了该类机理 PIM 的存在。

## 2 热致振动引起的无源互调

当两个频率相近的微波信号在有耗介质中传输时,介质中的电场幅度随两个信号的包络变化,幅值按信号差频周期性变化,叫做差拍效应<sup>[11]</sup>。假设两个输入电信号为:

$$u_1(t) = V_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1), u_2(t) = V_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2) \quad (1)$$

其中  $V_1$ 、 $V_2$  分别是两个信号的振幅,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  是角频率,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  是初始相位。介质中合成信号为:

$$\begin{aligned} u &= u_1(t) + u_2(t) = V_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) + V_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2) \\ &= \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + 2V_1V_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \theta_1 - \theta_2]} \\ &\quad \times \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + \varphi\right) \end{aligned} \quad (2)$$

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

由式(2)知,合成电压的幅值以恒定频率变化,周期是两输入信号差频的倒数,同理,介质因损耗产生的功率也随差频周期变化。

微波损耗产生的焦耳热会导致温度变化,微波损耗功率和温度变化之间的关系可以用下式表示:

$$T(\vec{r}, t) = f(P_{\text{Loss}}, \omega_M t) \quad (3)$$

其中  $T(\vec{r}, t)$  是介质的温度,  $\vec{r}$  代表温度点到源点的距离矢量,  $t$  是时间,  $P_{\text{Loss}}$  是介质由损耗而吸收的微波功率,  $\omega_M$  是两个微波信号的差频。结合电磁场和热传导的多物理场耦合方程,整个微波传输过程中温度  $T$  的变化为:

$$T = T_0 + at + b \sin(\omega_M t) \quad (4)$$

$T_0$  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。对于微波传输线而言,热致振动会使器件的尺寸发生微小的变化,从而改变其特征阻抗。通常特征阻抗可以描述如下:

$$Z_0(\omega_M) = Z_0 \cdot g(P_{\text{Loss}}, \alpha, \omega_M t) \quad (5)$$

$\alpha$  是材料热膨胀系数,  $Z_0$  是传输线初始阻抗。特征阻抗的变化会引起电压和电流的变化,进

而引入了输入阻抗  $Z_{\text{IN}}(\omega_M)$  的周期性变化:

$$Z_{\text{IN}}(\omega_M) = Z_0(\omega_M) \frac{Z_L + Z_0(\omega_M) \tan \beta l}{Z_0(\omega_M) + Z_L \tan \beta l} \quad (6)$$

$\beta$  是相位常数,  $l$  是输入端到负载的距离,  $Z_L$  是负载阻抗。

## 2 仿真建模分析

利用 COMSOL 仿真软件,对波导传输线建模并仿真计算波导法兰接触面上一点 A 的温度和电场变化。

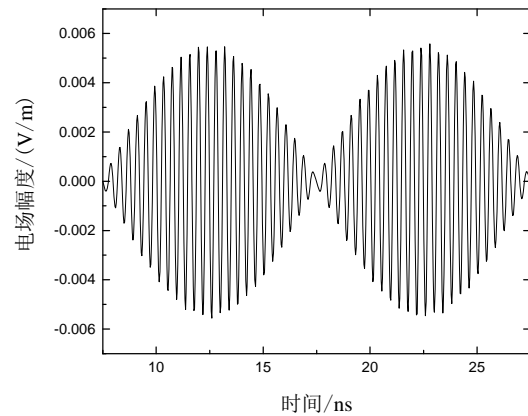


图 1 A 点电场变化

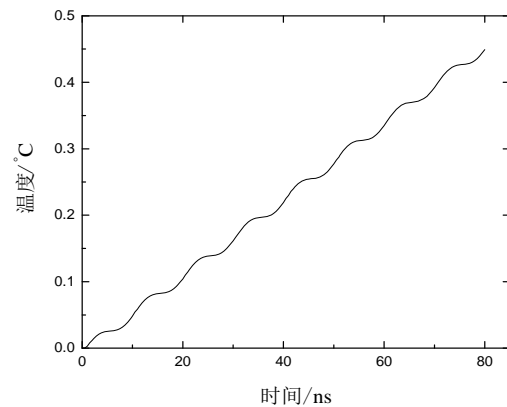


图 2 A 点温度变化

A 点电场幅值随差频周期变化,而温度以差频倒数为周期波动上升,与公式(4)符合良好,同前面的分析相一致。

## 3 实验验证

实验中将不锈钢金属片垫在泡沫上,然后平放于铝波导中作为待测件,金属片不与波导壁接触,通过测量 PIM 的变化来验证热致振动引起的无源互调。实验系统如下:

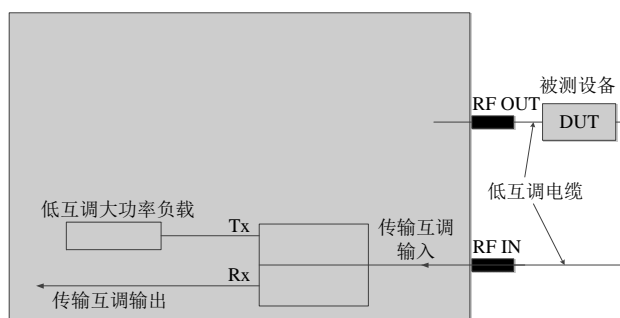


图 3 PIM 测试系统

实验采用铝波导，波导和法兰为一体加工形式，中间未焊接，避免焊接接触引入 PIM。不锈钢金属片壁厚分别为 0.1mm、0.2mm 和 0.5mm，面积为 10cm\*10cm。波导和波导同轴转换之间加聚酰亚胺薄膜，避免由于不同材料接触引入 PIM。两路输入微波功率都为 43dBm，信号基频为 2160MHz，差频从 20MHz 变化到 50MHz。

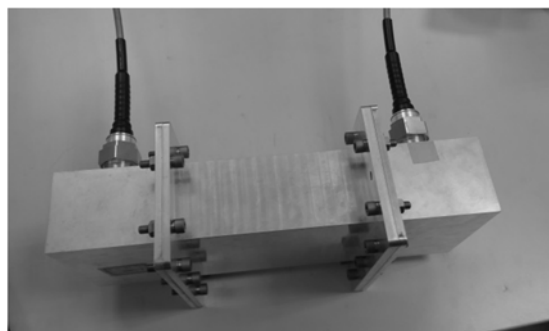


图 4 不锈钢波导实际测试图

## 4 实验结果

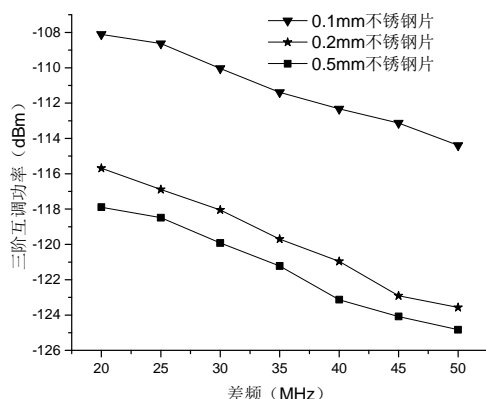


图 5 三阶传输 PIM 功率测量结果

由图可知，互调功率和金属片厚度的关系有： $PIM_{0.5mm} < PIM_{0.2mm} < PIM_{0.1mm}$ ，同时，差频越小，测量到的 PIM 越大。实际测试中，我们发现，0.5mm 不锈钢片的测量结果几乎等同于系统波导内只加泡沫，不加金属片的 PIM 测量值。

## 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，并且利用波导传输线在 S 波段进行了实验验证。在其他参数相同的条件下，金属片越薄，热致振动越强，传输线阻抗变化越剧烈，进而 PIM 值越大。而差频越小，电热耦合程度强，导致系统 PIM 增强。以上实验定性验证了热致振动 PIM 机理的存在，由于基于热致振动引起的 PIM 幅度低测试非常困难，今后需要进行更深入研究以获得定量关系。

## 参考文献：

- [1] PL Lui. Passive Intermodulation Interference in communication systems[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1990: 109-118.
- [2] 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.
- [3] DS Kozlov, AP Shitvov, AG Schuchinsky, etc. Passive Intermodulation of Analog and Digital Signals on Transmission Lines With Distributed Nonlinearities: Modelling and Characterization[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2016, 64(5): 1383-1395.
- [4] A Al-Mudhafar, H Hartnagel. Bit Error Probability in the Presence of Passive Intermodulation[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(8): 1145 – 1148.
- [5] SVK Shastri, VK Hariharan, Tosicul Wara, etc. Passive Intermodulation in Microwave Space Systems[J]. IETE Technical Review, 2001, 18(6): 455-474.
- [6] 丁亚宁, 徐云东, 张玉山. 卫星无源互调及测量方法研究[J]. 上海航天, 2015, 32(2): 54-58.
- [7] YR Mao, Y Liu, YJ Xie, etc. Numerical Analysis of Passive Intermodulation Due to Metallic Contact Nonlinearity[J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 43(6): 1174-1178.
- [8] 叶鸣, 贺永宁, 王新波等. 金属波导连接的无源互调非线性物理机制和计算方法[J]. 西安交通大学学报, 2011, 25(2): 82-86.
- [9] 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): 220-223.
- [10] Z Shen, G Hu. Thermally induced vibrations of solar panel and their coupling with satellite[J]. International Journal of Applied Mechanics. 2013, 5(3): 1350031.
- [11] 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