

# 射频连接器与微带线组件焊接过渡段阻抗补偿研究

宋凯旋<sup>1</sup>,高锦春<sup>1</sup>,王紫任<sup>1</sup>,谢刚<sup>2</sup>,李晓明<sup>3</sup>,石国超<sup>3</sup>

(1. 北京邮电大学电子工程学院,北京 100876;2. 北京邮电大学信息与通信工程学院,北京 100876;  
3. 中国电子科技集团公司第五十四研究所,河北石家庄 050081)

**摘要:** 射频连接器与微带线组件常用于通信系统电路中,而组件焊接过渡段的阻抗不连续会使电路中的信号损耗增大. 针对该问题,本文对射频连接器与微带线组件焊接过渡段进行研究,基于传输线理论,建立焊接过渡段的等效电路模型. 讨论了焊接过渡段特征阻抗不连续的原因,同时提出了补偿优化方案. 此外,通过电磁场与电路的联合仿真,提取出补偿前后等效电路模型的电参数,从等效电路模型的角度分析了补偿方案对组件过渡段复杂电磁特性的影响. 有限元仿真分析与实验测试结果显示,补偿后组件的性能显著提高,证明了补偿方案有效可行.

**关键词:** 等效电路模型;焊接过渡段;阻抗不连续;补偿

**中图分类号:** TN41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)11-2241-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.11.001

## Study of the Impedance Compensation of the Welding Transition Section of the RF Connector and Micro Strip Line

SONG Kai-xuan<sup>1</sup>, GAO Jin-chun<sup>1</sup>, WANG Zi-ren<sup>1</sup>, XIE Gang<sup>2</sup>, LI Xiao-ming<sup>3</sup>, SHI Guo-chao<sup>3</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;  
2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;  
3. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

**Abstract:** The RF connectors and micro strip lines are commonly used in communication system circuits, and the characteristic impedance discontinuity caused by the welding transition section increases the signal loss in the circuit. In this paper, the welding transition section of the RF connector and micro strip line is studied. Based on the transmission line theory, the equivalent circuit model of the welding transition section is established. The reasons for the characteristic impedance discontinuity of the welding transition section are discussed, and the compensation schemes are proposed. In addition, the electrical parameters of the equivalent circuit model are extracted by the joint simulation of electromagnetic field and circuit. From the perspective of the equivalent circuit model, the influence of the compensation scheme on the complex electromagnetic characteristics of the solder transition section is analyzed. The finite element analysis and experimental results show that the matching and transmission performance of the compensated components is significantly improved, which proves that the compensation scheme is effective.

**Key words:** equivalent circuit model; welding transition section; impedance discontinuity; compensation

## 1 引言

射频电路传输的信号频率高、波长短,电路中的微小结构都将影响信号传输的性能. 射频连接器与微带线组件广泛应用于射频电路中,组件焊接过渡段的结构不连续会使传输线的特征阻抗发生突变,从而引起信号反射,使电路信号完整性下降.

目前,对焊接过渡段的研究多集中于振动、温度对

焊点可靠性的影响<sup>[1,2]</sup>. 而对于焊接过渡段对射频传输性能的影响以及补偿优化方案的研究还不够充分. Wang 等人<sup>[3]</sup>提出减小焊接部分信号线的宽度有效补偿特征阻抗突变. 贲蓉蓉等人<sup>[4]</sup>在 SMA 连接器与 PCB 过渡结构的信号完整性研究中,分析了焊盘大小与反焊盘大小对特征阻抗的影响. 高振斌等人<sup>[5]</sup>基于 CST 仿真,建立了封装与 PCB 的物理模型,提出了通过增大焊球半径、采用低介电常数基板材料,来提高互连结构的

收稿日期:2019-05-24;修回日期:2019-08-14;责任编辑:马兰英

基金项目:国家自然科学基金(No. 51877010);信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)开放基金(No. IPOC2018B005);北京邮电大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 2019PTB-014)

信号传输效率的方案. 余文志等人<sup>[6]</sup>对微带线阻抗不连续性的补偿问题进行了研究, 通过反焊盘结构对阻抗突变进行了补偿. 史凌峰等人<sup>[7]</sup>提出通过调整信号返回路径的宽度, 可以方便、有效地控制高速电路系统中信号传输线特征阻抗, 为解决高速电路板设计中的信号完整性问题提供了一个较好的理论指导依据和处理方法. 陈鹏等人<sup>[8]</sup>在对微带线特征阻抗不连续问题的补偿方法研究中, 通过对微带线进行削角或扫掠的方式直接补偿不连续性, 并且定量的分析不同尺寸削角和扫掠处理对不连续性补偿的效果. 刘昌青等人<sup>[9]</sup>提出一种新的同轴结构-微带线平滑转换结构, 用来解决过渡段特征阻抗不匹配的问题. 孙逊等人<sup>[10]</sup>通过引入空气同轴、线性微带渐变线两种补偿措施, 在 5 - 20GHz 以内改善了同轴结构到微带线转接模型的传输特性. 黄春跃等人<sup>[11]</sup>基于 HFSS 软件建立了球栅阵列焊点模型, 获取焊点表面电场分布和回波损耗, 分析了信号频率、焊点最大径向尺寸、焊盘直径和焊点高度对焊点回波损耗的影响. Putaala 等人<sup>[12]</sup>对热循环下球栅阵列(BGA)互连结构的高频性能进行了研究.

当前, 射频连接器与微带线过渡段阻抗突变的补偿方案与过渡段等效电路模型建立的相关研究较少. 本文基于传输线理论, 建立了射频连接器与微带线组件在焊接过渡段的等效电路模型. 讨论了过渡段特征阻抗不连续的原因, 从而进一步分析了过渡段的阻抗不连续对高频信号传输的影响机理并对其提出了补偿方案. 此外, 本文也通过电磁场和电路的联合仿真, 提取出补偿前后过渡段等效电路模型中的电参数, 从等效电路模型的角度定量地分析了补偿方案对组件过渡段复杂电磁特性的影响. 通过有限元分析与实测实验两种方法得到组件的  $S_{11}$ 、 $S_{21}$  参数, 分析对比补偿前后的参数变化. 结果显示, 补偿后组件的性能显著提升, 证明补偿方案的有效性.

## 2 射频连接器与微带线的模型

### 2.1 传输线理论

图 1 为传输线理论的经典分布参数模型, 由电报方程可得, 有耗传输线的特征阻抗满足:

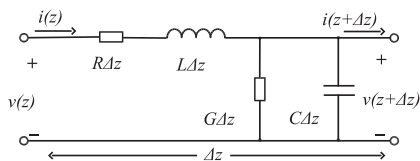


图 1 传输线分布参数等效电路

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1)$$

传输线的损耗主要包括介质、金属导体的热损耗与特征阻抗不匹配引起的回波损耗. 在研究特征阻抗不匹配的问题时, 可以适当忽略传输线上的电阻  $R$  与电导  $G$ , 此时等效为无耗传输线, 单位长度传输线的电路模型简化为一节  $LC$  电路.

均匀传输线特征阻抗只与本身结构、介质材料有关, 与传输线的长度无关. 像微带线这种均匀传输线可以通过经验公式来计算它们的特征阻抗. 微带线的特征阻抗经验公式为:

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{1.41 + \epsilon}} \ln\left(\frac{5.98H}{0.8w + t}\right) \quad (2)$$

其中  $w$  为微带线宽度,  $H$  为介质板厚度,  $t$  为微带线上层导体厚度,  $\epsilon$  为两导体间介质层的介电常数.

### 2.2 端口网络

工程中, 经常使用  $S$  参数来评估微波网络端口的匹配性能和传输损耗,  $S_{11}$  指在 2 端口匹配时, 1 端口反射波与入射波的比值, 其中  $S_{11}$  的值越小, 端口网络的匹配性能越好.  $S_{21}$  指在 1 端口匹配时, 2 端口反射波与 1 端口入射波的比值, 其中  $S_{21}$  的值越大, 端口网络的传输性能越好.

## 3 补偿原理与补偿方案

### 3.1 过渡段特征阻抗突变

如图 2 所示, 焊接过渡段通常包括焊盘与焊锡堆. 焊接过渡段为非连续结构, 不能像微带线等均匀传输线一样可以简单地等效成  $LC$  电路模型, 通过经验公式求出相关参数.

对于微带线而言,  $LC$  电路中的电容  $C$  由信号线、介质、接地板组成的电容结构产生, 电感  $L$  由信号线与接地板的总自感产生. 射频连接器与微带线组件的过渡段与微带线本身在结构上有一定的相似性, 因此可以使用分析微带线的方法对过渡段进行简单的定性分析. 如图 2 所示, 焊盘宽度大于信号线宽度, 当电磁波在两金属板之间传播, 焊盘与接地板的正对面积增加会导致局部电容  $C$  变大. 焊锡堆导致连接部分的信号线变厚, 导体横截面积增大, 集肤效应使电流扩散开, 最终导致局部电感  $L$  减小. 由公式 1 得电容  $C$  增大, 电感  $L$  减小, 特征阻抗减小. 特征阻抗小于  $50\Omega$  预计值会导致阻抗不匹配, 最终使信号回波损耗增加、信号质量下降.

### 3.2 补偿方案

焊接过渡段位于微带线上, 根据补偿的结构部位不同可分为三种: 对顶层焊点的尺寸优化、对中间介质层的结构优化、对底层接地板的结构优化. 其中焊点的补偿方案是通过减小焊点尺寸使焊接过渡段尽可能平滑. 但是为保证有效的电气连接与机械连接, 焊点的尺寸减小有一定的限度. 由式(2)可知, 增加微带线介质层的厚度  $H$  可以增大特征阻抗值. 因此理论上可以采

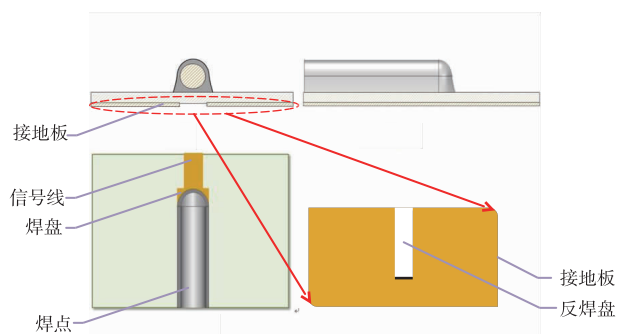


图2 过渡段三视图

用过渡段介质层厚度稍高于非过渡段介质层厚度的补偿方案. 对于接地板结构的优化, 其中反焊盘结构将减小接地板与焊盘的正对面积, 可以有效地降低微带线单位长度的电容值  $C$ , 从而达到增大特征阻抗的目的. 综合考虑信号的能量损耗与制作难度, 接地板的结构优化更适合特征阻抗的补偿.

如图2所示, 对焊盘正对的接地板开槽(增加反焊盘), 模型中焊盘为矩形, 反焊盘的形状可以为矩形、椭圆形、梯形等, 理论上只要可以有效减小接地板与焊盘的正对面积, 就可以增大特征阻抗值. 补偿方案中, 首先对比不同反焊盘形状下组件的  $S$  参数, 确定最佳的反焊盘形状; 再对特定反焊盘形状下的参数进行优化仿真, 讨论组件的传输与匹配性能随参数变化的规律, 确定最佳设计尺寸.

## 4 基于有限元分析的组件模型

### 4.1 模型建立及参数设置

如图3所示, 根据射频连接器与微带线组件的实际尺寸和材料参数, 对其进行建模和有限元分析.

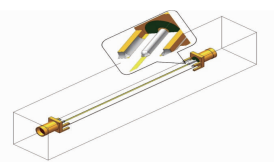


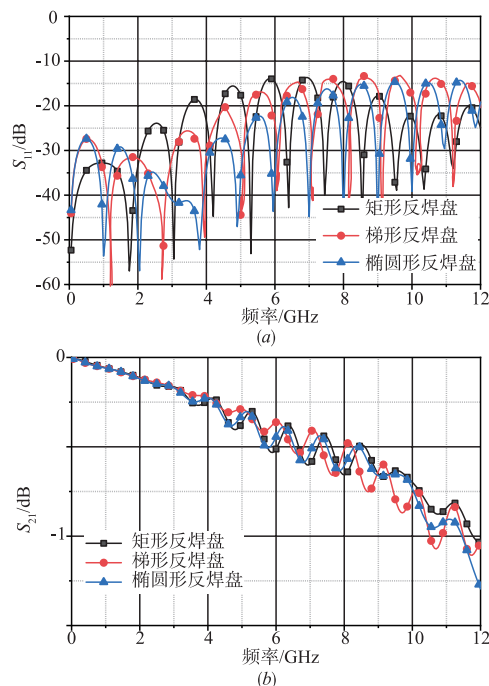
图3 组件3D模型示意图

组件中射频连接器为 SMA, 微带线的介质层材料为 Rogers4350B, 厚度为 0.254mm, 相对介电常数为 3.48, 信号线宽度为 0.58mm. 微带线上的导电通孔将射频连接器的外导体与微带线接地板相连, 焊点将射频连接器的内导体与微带线的信号线相连. 模型的边界条件设置为辐射边界条件. 频率扫描范围设置成 0 ~ 12GHz, 求解频率为 6GHz. 剖分网格为自适应网格.

### 4.2 不同反焊盘形状的对比与分析

保证组件模型尺寸、材料参数不变, 根据反焊盘形状的不同将组件分为三种, 分别为: 矩形反焊盘组件、梯形反焊盘组件、椭圆形反焊盘组件. 仿真分析中, 对三种类

型反焊盘优化尺寸后比较绘图. 如图4所示, 整体上, 三种类型组件表现出的传输与匹配性能相近, 但考虑到加工难度与参数的复杂程度, 在接下来的仿真与实验中选用矩形反焊盘, 同时进一步讨论组件的传输与匹配性能随矩形反焊盘参数变化的规律, 确定最佳设计尺寸.

图4 不同形状反焊盘下组件  $S$  参数 (a)  $S_{11}$  参数; (b)  $S_{21}$  参数

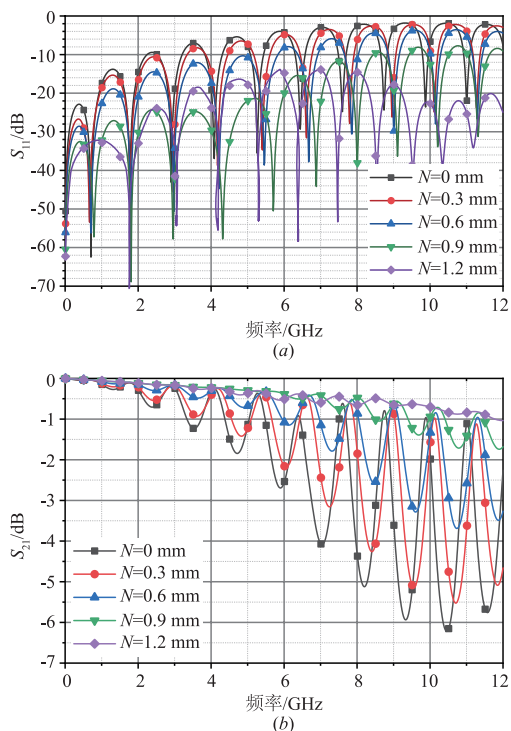
### 4.3 矩形反焊盘仿真结果分析

补偿优化方案中矩形反焊盘长度与焊盘长度相同, 宽度设置为补偿优化变量  $N$ . 如图5所示, 随着补偿优化变量  $N$  逐渐增加, 组件的  $S_{11}$  参数值不断下降,  $S_{21}$  参数值不断上升, 表明组件的匹配与传输性能越来越好. 当补偿优化变量  $N = 1.2\text{mm}$  时, 组件性能提升最明显, 其  $S_{11}$  参数值小于  $-14\text{dB}$ ,  $S_{21}$  参数值大于  $-1.2\text{dB}$ . 相对于不补偿的组件,  $S_{11}$  参数整体提高 11dB 左右,  $S_{21}$  参数最大提高了 5dB 左右. 有限元分析证明了补偿优化方案的有效性.

## 5 组件过渡段等效电路模型

### 5.1 等效电路模型建立

补偿后的组件过渡段包括焊点、焊盘与反焊盘三部分, 为一个二端口网络. 第三章使用有限元模型分析了组件的传输特性, 但是有限元法计算复杂, 且耗时较长. 本节从等效电路模型的角度进行分析, 将原来分析过渡段电场、磁场变化的复杂过程简化成分析等效电路模型中几个电参数变化的过程, 将组件物理结构的变化与等效电路模型的电参数变化建立紧密的联系. 如图6所示, 过渡段等效成一种  $\pi$  型电路模型. 此外,

图5 不同 $N$ 值下组件的 $S$ 参数(a)  $S_{11}$ 参数;(b)  $S_{21}$ 参数

由于焊盘宽度要大于电路板中信号线宽度,同时接地板反焊盘的存在改变了信号返回路径的宽度,这种入射信号传输路径的宽度变化与反射信号传输路径的宽

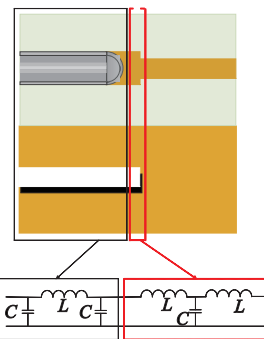


图6 过渡段等效电路模型示意图

度变化可以等效成一种  $T$  型电路模型。

综上,过渡段的等效电路模型为  $\pi$  型电路与  $T$  型电路的级联。为了简化运算,将  $\pi$  型电路模型中的两个电容设为  $C_1$ ,电感设为  $L_1$ ;  $T$  型电路模型中的两个电感设为  $L_2$ ,电容设为  $C_2$ 。如图 7 所示,为避免射频连接器和微带线引起的误差,准确提取焊接过渡段的电路参数,组件等效电路中 S2P1、S2P2、S2P3 模块的参数值均通过有限元分析获得。故组件在有限元模型和等效电路模型中唯一不同的部分即为焊接过渡段,其中有限元模型是根据焊接过渡段的尺寸和材料参数建立了 3D 结构,而电路模型则是将该 3D 结构等效为  $\pi$  型电路和  $T$  型电路的级联,因此可以更准确的得到等效电路模型中参数与有限元模型中反焊盘尺寸的变化关系。

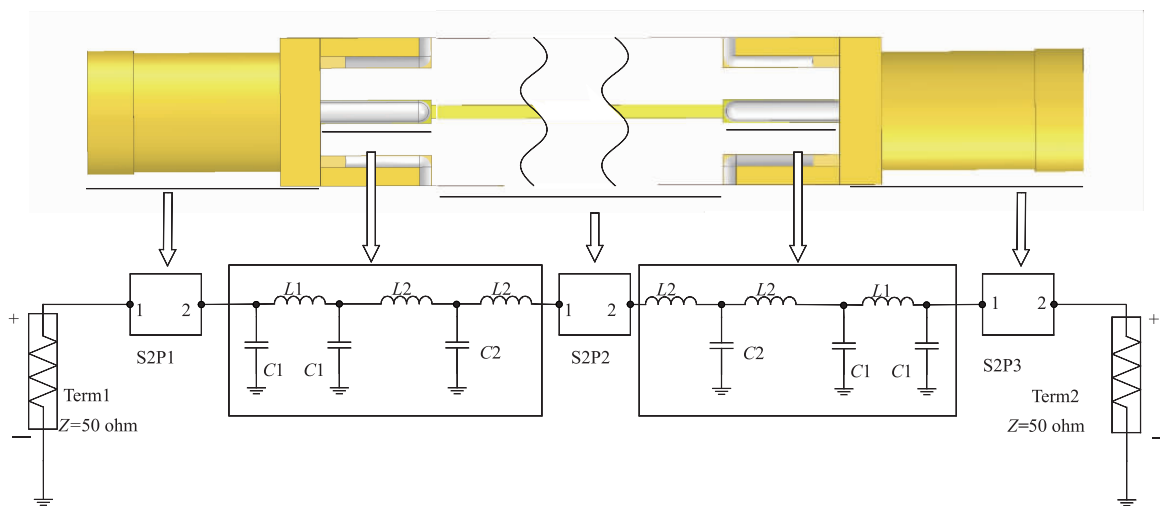


图7 等效电路模型示意图

## 5.2 模型参数提取与分析

分别采用等效电路模型分析与有限元模型分析得到两组  $S_{11}$ 、 $S_{21}$  参数,拟合两组参数可以有效的提取出等效电路模型中的电参数值。公式 3 中  $S'_{11}$  与  $S'_{21}$  是基于等效电路模型得到的, $S_{11}$  与  $S_{21}$  是基于有限元模型得到的。频率  $f$  的范围为 0.01 到 12GHz,步长为 0.01GHz。参数  $D$  越小表示拟合的程度越好。

$$D = \sum_{f=0.01}^{12} \left[ \left( \frac{S_{11} - S'_{11}}{S_{11\max}} \right)^2 + \left( \frac{S_{21} - S'_{21}}{S_{21\max}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

调整过渡段等效电路模型中的电参数值,使由等效电路模型得到的  $S$  参数不断地逼近由有限元模型所得到的  $S$  参数以确定参数  $D$  的极小值。拟合中,取补偿优化变量  $N = 0.1\text{mm}$ 、 $0.3\text{mm}$ 、 $0.5\text{mm}$ 、 $0.7\text{mm}$ 、 $0.9\text{mm}$  等效电路模型与有限元模型得到的  $S_{11}$ 、 $S_{21}$  参数。

由图 8、图 9、图 10、图 11、图 12 可知,  $N$  取不同值时, 由等效电路法得到的  $S$  参数很好的拟合上由有限元法得到的  $S$  参数, 因此可以准确的得到等效电路模型中电参数:  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  与有限元模型中反焊盘尺寸即  $N$  值的变化关系. 为更好的分析等效电路模型中电参数的变化趋势, 将  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  参数绘制成散点图. 如图 13 所示, 随着  $N$  值的增大, 电感  $L_1$  与  $L_2$  增大, 电容  $C_1$  减小, 电容  $C_2$  先增大后减小, 整体上呈减小趋势, 由公式 1 可知, 过渡段的特征阻抗有效降低, 与第四章有限元模型的分析结果相符, 即  $N$  值越大补偿效果越好. 结果验证了等效电路模型的准确性.

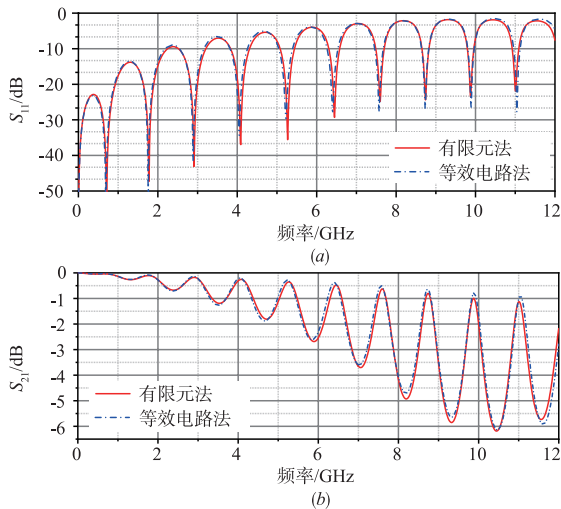


图8  $N=0.1$ 时 $S$ 参数最佳拟合示意图 (a)  $S_{11}$ 参数;(b)  $S_{21}$ 参数

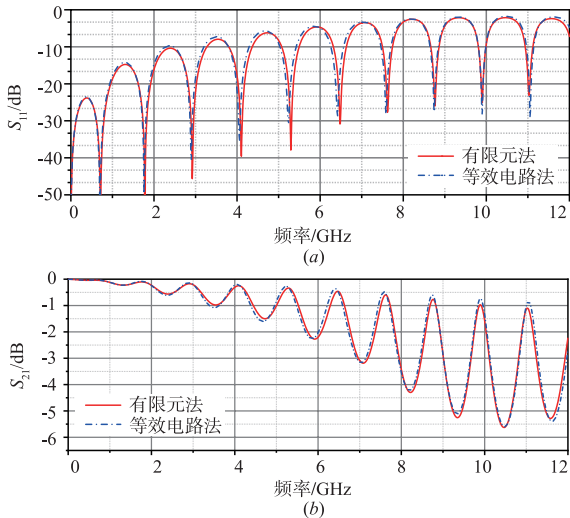


图9  $N=0.3$ 时 $S$ 参数最佳拟合示意图 (a)  $S_{11}$ 参数;(b)  $S_{21}$ 参数

## 6 组件的实测验证

### 6.1 实验准备与相关设置

完成 PCB 板绘制, 其中 PCB 板的厚度为 0.254mm, 介质材料为 Rogers 4350B, 介质材料的介电常数为

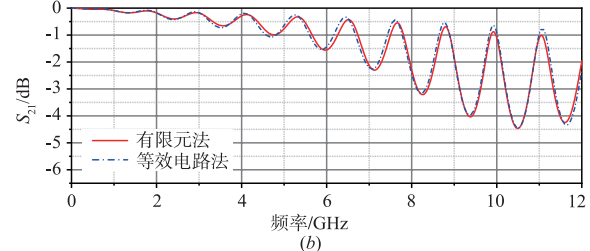
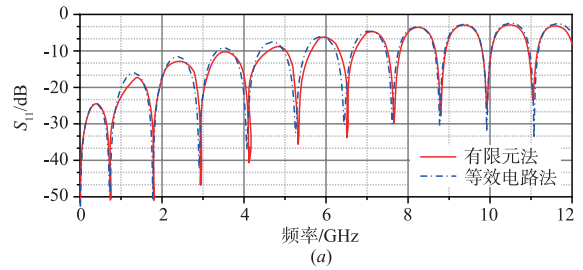


图10  $N=0.5$ 时 $S$ 参数最佳拟合示意图 (a)  $S_{11}$ 参数;(b)  $S_{21}$ 参数

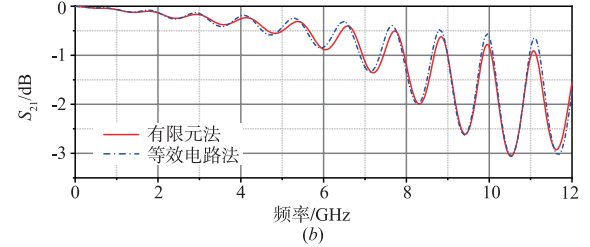
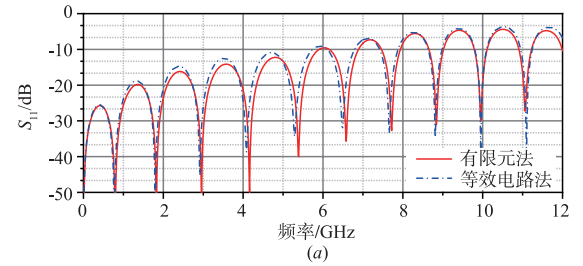


图11  $N=0.7$ 时 $S$ 参数最佳拟合示意图 (a)  $S_{11}$ 参数;(b)  $S_{21}$ 参数

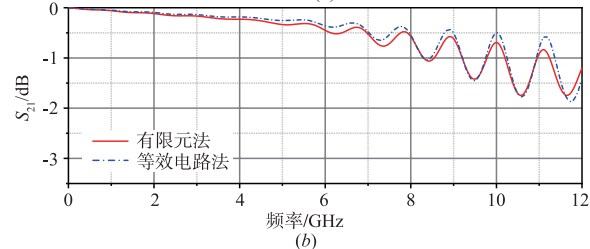
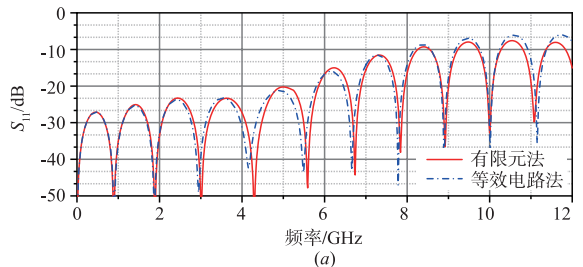


图12  $N=0.9$ 时 $S$ 参数最佳拟合示意图 (a)  $S_{11}$ 参数;(b)  $S_{21}$ 参数

3.48, 微带线宽度为 0.58mm. 使用矢量网络分析仪对 SMA 与微带线组件进行  $S$  参数测量. 组件的测试频率

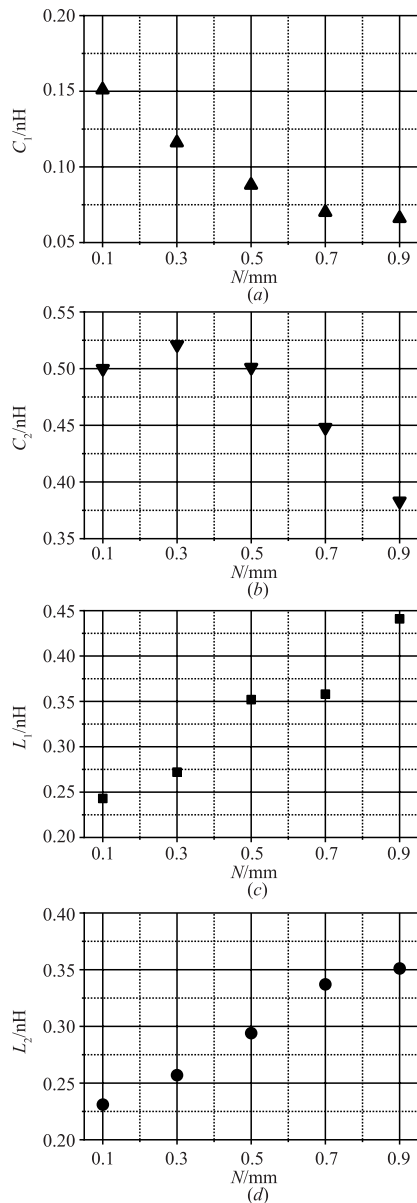


图13 等效电路电参数变化曲线 (a) $C_1$ ;(b) $C_2$ ;(c) $L_1$ ;(d) $L_2$

范围为 10MHz - 12GHz, 采样点数为 200.

## 6.2 实验结果分析

实验测试 5 种类型的 PCB 板, 它们分别为反焊盘宽度  $N = 0\text{mm}$ 、 $0.3\text{mm}$ 、 $0.6\text{mm}$ 、 $0.9\text{mm}$ 、 $1.2\text{mm}$ . 结果如图 14 所示.

对比  $S_{11}$ 、 $S_{21}$  的仿真值和实测值可知, 当频率在 0 ~ 12GHz 变化时,  $S_{11}$  参数的实测结果与仿真结果拟合的很好, 拟合中存在的细微不同是焊点存在差异造成的. 实测结果  $S_{21}$  参数比仿真结果稍差, 这种差异是仿真时忽略了组件材料的损耗造成的.

实测结果表明, 随着反焊盘宽度增大, 组件的  $S_{11}$  参数不断下降,  $S_{21}$  参数不断上升, 组件的匹配与传输性能不断提高. 当反焊盘宽度  $N = 1.2\text{mm}$  时, 组件的  $S_{11}$ 、 $S_{21}$

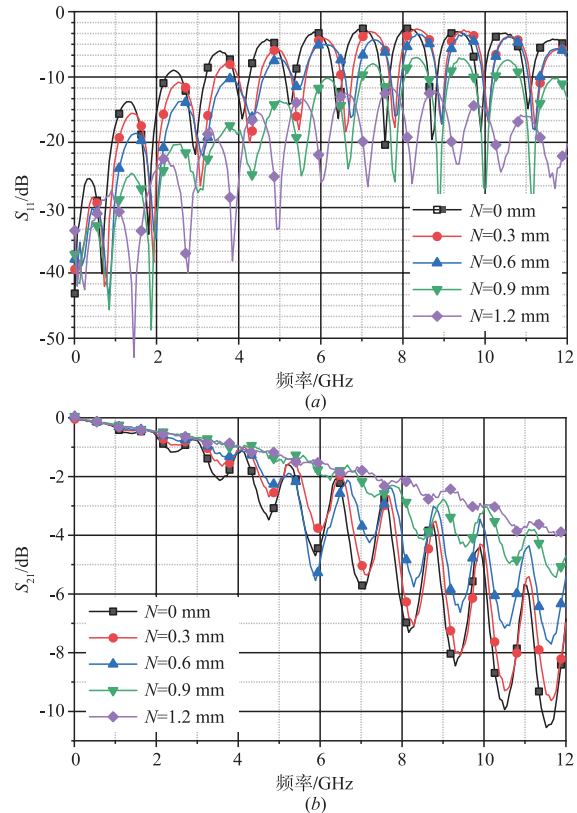


图14 SMA-微带线组件实测S参数 (a)  $S_{11}$  参数;(b)  $S_{21}$  参数

参数最佳, 其中  $S_{11}$  参数值均小于  $-13\text{dB}$ ,  $S_{21}$  参数值均大于  $-4\text{dB}$ . 相对于不补偿的组件,  $S_{11}$  参数整体提高了 10dB 左右.  $S_{21}$  参数最大提高了 6dB 左右. 实测结果验证了补偿方案可以用于解决特征阻抗不匹配导致损耗增加的问题.

## 7 结论

本文分析了射频连接器与微带线组件的焊接过渡段引起电路信号完整性下降的原因. 基于传输线理论, 分析得出焊接过渡段的局部电容  $C$  增大与局部电感  $L$  减小, 导致其特征阻抗小于  $50\Omega$ , 进而增加信号的传输损耗. 在此基础上, 提出了一种增加反焊盘的补偿优化方案. 补偿方案可以有效的减小过渡段的局部电容值, 从而提高过渡段的特征阻抗值. 组件有限元模型的分析结果以及组件实验板的测试结果相互验证, 均表明补偿方案的有效性. 其中当补偿方案中反焊盘宽度  $N = 1.2\text{mm}$  时, 特征阻抗的补偿效果最好. 此外, 针对补偿后焊接过渡段提出了一种  $\pi$  型电路与  $T$  型电路级联的等效电路模型. 通过拟合有限元模型与等效电路模型的仿真结果, 准确提取出等效电路模型的电参数, 完成对焊接过渡段的等效电路模型电参数的定量分析. 等效电路模型的建立与电参数的提取对传输线不连续结构的分析研究提供了另一种方法.

## 参考文献

- [1] 汤巍,等. 温度与振动耦合条件下的电路板级焊点失效模式与疲劳寿命分析[J]. 电子学报,2017,45(7):1613-1619.  
TANG Wei, et al. Analysis of failure modes and life of solder joints under coupling of vibration and thermal loads [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(7): 1613 - 1619. (in Chinese)
- [2] 黄春跃,等. 基于正交试验设计的塑封球栅阵列器件焊点工艺参数与可靠性关系研究[J]. 电子学报,2005,33(5):788-792.  
HUANG Chun-yue, et al. Study on the relationships between solder joint process parameters and reliability of plastic ball grid array component [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(5): 788 - 792. (in Chinese)
- [3] Wang Z R, et al. Impedance compensation of the welding area of the RF connector and microstrip line [A]. The 10<sup>th</sup> International Conference on communications, Circuits and Systems [C]. Chengdu: Institute of Electrical and Electronics Engineering Inc, 2018. 190 - 194.
- [4] 贲蓉蓉,等. 高速 SMA 连接器到 PCB 过渡结构的信号完整性研究 [A]. 第十届全国信号和智能信息处理与应用学术会议专刊 [C]. 襄阳: 中国高科技产业化研究会, 2016. 26 - 31.  
Ben Rong-rong, et al. Study of signal integrity of transient structure from SMA connector to PCB [A]. Special Issue of the 10th National Symposium on Signal and Intelligent Information Processing and Application [C]. Xiangyang: China High-tech Industrialization Association, 2016. 26 - 31. (in Chinese)
- [5] 高振斌,李雅菲. 封装与 PCB 复杂互连结构的传输特性研究[J]. 电子元件与材料,2016,35(08):81-85.  
Gao zhenbing, Li Yafei. Analysis of package-PCB interconnect structure transmission performance [J]. Electronic Component and Material, 2016, 35(08): 81 - 85. (in Chinese)
- [6] 余文志,等. 微带线阻抗不连续性的补偿研究[J]. 仪表技术与传感器,2015(08):88-91.  
Yu Wenzhi, et al. Study of impedance compensation of micro strip line [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015 (08): 88 - 91. (in Chinese)
- [7] 史凌峰,等. 基于信号返回路径宽度的阻抗匹配技术研究[J]. 电波科学学报,2010,25(6):1181-1186.  
Shi Lingfeng, et al. Research of impedance matching based on signal return path width [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(6): 1181 - 1186. (in Chinese)
- [8] 陈鹏,曹沐昀. 微带线不连续性补偿方法仿真研究[J]. 电子科技,2013,26(3):119-121.  
Chen Pen, Cao Muyun. Simulation research on discontinuity compensation method of micro strip line [J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(3): 119 - 121. (in Chinese)
- [9] 刘昌青,等. 同轴-微带转换器的准静态 CAD 方法[J]. 微波学报,2000(03):310-312.  
Liu Changqing, et al. Quasi-Static CAD technique for coaxial to microstrip line transition [J]. Journal of Microwaves, 2000 (03): 310 - 312. (in Chinese)
- [10] 孙逊,等. 同轴微带转接模型的电磁特征提取及传输特性优化[J]. 雷达与对抗,2017,37(03):47-51.  
Sun Xun, et al. Electromagnetic feature extraction and transmission characteristic optimization of coaxial-to-microstrip transition model [J]. Radar&Ecm, 2017, 37(03): 47 - 51. (in Chinese)
- [11] 黄春跃,等. 基于 HFSS 的高速互连 BGA 焊点信号完整性仿真分析[J]. 系统仿真学报,2014,26(12):2985-2990.  
Huang Chunyue, et al. Analysis of signal integrity of the high-speed interconnects BGA solder joint based on HFSS [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(12): 2985 - 2990. (in Chinese)
- [12] Putaala J, et al. Detection of thermal cycling-induced failures in RF/microwave BGA assemblies [J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2008, 31(3): 240 - 247.

## 作者简介



宋凯旋 男,1996 年出生,河北迁安人,北京邮电大学电子工程学院电子科学与技术专业硕士研究生,主要研究方向为高频电接触及电子器件可靠性.  
E-mail: songkaixuan@bupt.edu.cn



高锦春(通信作者) 女,1962 年出生,北京人,北京邮电大学电子工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为电接触可靠性及电子器件可靠性.  
E-mail: gjc@bupt.edu.cn