

# 微带线不连续性补偿方法的 HFSS 仿真分析

陈 慰<sup>1</sup>, 赵 娜<sup>1</sup>, 陶学敏<sup>2</sup>

(1. 航天恒星空间技术应用有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

**摘 要:**微带电路元件都包含有不连续性,从等效电路上相当于引入了电抗元件,必然对电路产生影响。为了研究微带线转弯对其电性能的影响,采用 Ansoft HFSS 软件仿真的方法,定量地分析微带线不同类型不连续性补偿方法的优缺点。通过仿真发现,  $\alpha = 1.6w$  削角弯头的回波损耗和插入损耗最优,可以用于小尺寸的转弯;  $R = 3w$  圆形扫掠弯头的回波损耗和插入损耗也比较良好,可以用于大尺寸的转弯。

**关键词:**微带线; 不连续性补偿; 削角弯头; 扫掠弯头

**中图分类号:** TN817-34

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-373X(2011)13-0092-03

## HFSS Simulation and Analysis of Microstrip Discontinuity Compensation Method

CHEN Wei<sup>1</sup>, ZHAO Na<sup>1</sup>, TAO Xue-min<sup>2</sup>

(1. Space Star Aerospace Technology Applications Co. Ltd., Xi'an 710077, China;

2. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The components of microstrip circuit are discontinuous, the reactance components introduced in the equivalent circuit have an effect on microstrip circuit. To research the electrical property of microstrip bend, making use of Ansoft HFSS software and analyzing the advantages and disadvantages of discontinuity compensation methods of different microstrip bend. From the simulation result, a conclusion show that return loss and insertion loss of mitered bend are the best when  $\alpha = 1.6w$  and it can be used for small size turning, the return loss and insertion loss of Swept bend are satisfactory for large size turning when  $R = 3w$ .

**Keywords:** microstrip; discontinuity compensation; mitered bend; swept bend

## 0 引言

在微波电路中,各分布参数元件之间,各集总参数元件之间,以及分布参数和集总参数元件相互之间都存在着不均匀性,也叫做不连续性<sup>[1]</sup>。微带电路同样会遇到微带线不连续性的问题,例如微带滤波器、微带阻抗变换器的不同特性阻抗微带段的连接处是尺寸跳变;平行耦合微带线带通滤波器的半波谐振线的两端是微带截断;微带分支电桥和微带功分器则包含分支 T 接头;在一块紧凑的微带电路板上,为使结构紧凑以适应走线方向的要求,时常必须是微带转弯等<sup>[2]</sup>。微带电路尺寸可与工作波长相比拟,其不连续性必然对电路产生影响。从等效电路上看,它相当于并联或者串联一些电抗元件,从而引起相位和振幅误差、输入与输出失配以及可能的寄生耦合。在设计微带电路,特别是精确设计时,必须考虑到不连续性所引起的影响,否则将引起大的误差。消除微带线不连续性效应的一种方法是,将其等效参数计入电路参考量中,并通过调节其他电路参量,如线的长度和特征阻抗,或用可调谐短截线来补偿该效应。另一种方法是经常采用对导带削角或者斜拼

接来直接补偿不连续性,以使其不连续性效应最小<sup>[3]</sup>。

文献[2-3]等已经对微带线直角转弯的不连续性效应进行了研究,但并未对不同类型不连续性做定量研究,也没有对各类补偿方法做定量的比较分析。本文在此基础上对微带线直角转弯不连续性的不同补偿方法进行了定量分析,主要通过 Ansoft HFSS 电磁仿真软件对不同微带线转弯的电性能参数进行了建模仿真和对比,得出对微带线转弯的最优补偿方法。

## 1 微带线直角转弯不连续性补偿理论

微带线直角转弯的电流示意图如 1(a)所示,在转弯区域如同有一个并联的电容,路径的加长如同两段短传输线或两个电感,因此它的等效电路如图 1(b)所示。把微带线拐角折合成连续平板线拐角,应用对偶定理变换为对偶波导,就成了波导 E 面拐角<sup>[4]</sup>,把波导的等效电路再变换为对偶电路,就得到了图 1(b)的等效电路<sup>[3]</sup>,在这个等效电路中:

$$X_a = \frac{2DZ_0}{\lambda} \left[ 0.878 + 2 \left( \frac{D}{\lambda_g} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$X_b = -\frac{\lambda Z_0}{2\pi\lambda} \left[ 1 - 0.114 \left( \frac{2D}{\lambda_g} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中:  $D$  是折合宽度。这个等效电路的参考面是图 1(a)中的虚线所示,取在折合连续平板线开始转弯处。假设

微带线转弯一端匹配负载  $Z_0$ , 求另一端的反射系数  $\Gamma$ , 再据此求驻波比  $\rho$ , 然后根据驻波比和反射系数的相位重新画等效电路, 如图 2 所示<sup>[5]</sup>, 其中:

$$\rho = C + \sqrt{C^2 - 1} \quad (3)$$

$$C = \frac{1 + 2(x_a + x_b)^2 + x_a^2(x_a + 2x_b)^2}{2x_b^2} \quad (4)$$

$$x_a = X_a/Z_0, x_b = X_b/Z_0 \quad (5)$$

等效长度  $L$  则按式(6)给出:

$$kL = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2(x_a + x_b)}{1 - 2x_a x_b - x_b^2} - \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

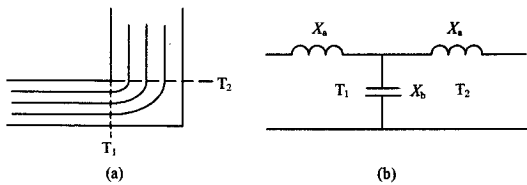


图 1 微带线的直角转弯

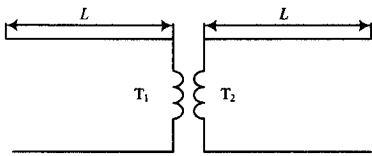


图 2 微带线直角转弯的另一种等效电路

通常使用两种方法来消除微带线直角转弯不连续性所引起的反射。第一类方法是通过削角来补偿直角弯头的效应, 削角可以降低弯头的多余电容效应; 第二类方法是将其改为圆滑的“扫掠”弯头可消除该效应, 但这样会增加它的空间尺寸<sup>[6-7]</sup>。

针对上述两种微带线直角转弯不连续性的补偿方法, 需要分析它们补偿的效果和适用的条件<sup>[8]</sup>。因此本文采用 Ansoft HFSS 高频电磁仿真软件, 对不同程度的直角削角弯头和圆形扫掠弯头的回波损耗、插入损耗进行仿真, 定量地分析微带线不同类型转弯不连续性补偿方法, 对比其优缺点<sup>[9]</sup>。

## 2 仿真结果

以工作频段为 900~1 000 MHz 的微带线为例进行了仿真对比。微带电路板采用美国 Rogers 公司型号为 Rogers4350B 的 PCB 板材, 介质相对介电常数  $\epsilon_r = 3.48$ , 介质厚度  $h = 0.762 \text{ mm}$ , 微带线金属铜厚  $t = 70 \mu\text{m}$ , 介质损耗正切  $\tan \delta = 0.0037$ 。利用 Ansoft HFSS 软件仿真对比了直角转弯, 和  $a = \sqrt{2}w, a = 1.6w$  两种直角削角弯头, 以及  $R = w, R = 3w$  两种圆形扫掠弯头的电性能<sup>[10-11]</sup>, 微带线直角转弯不同补偿方法的 HFSS 电磁仿真模型及仿真结果如图 3~图 7 所示。

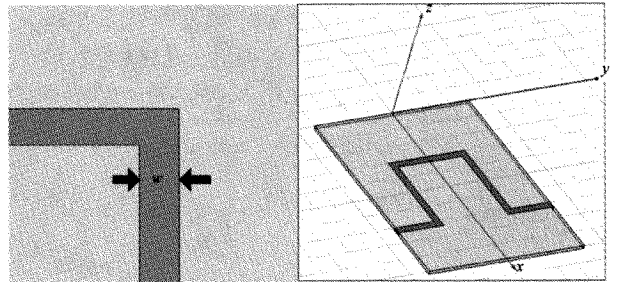


图 3 微带线不削角直角转弯 HFSS 模型

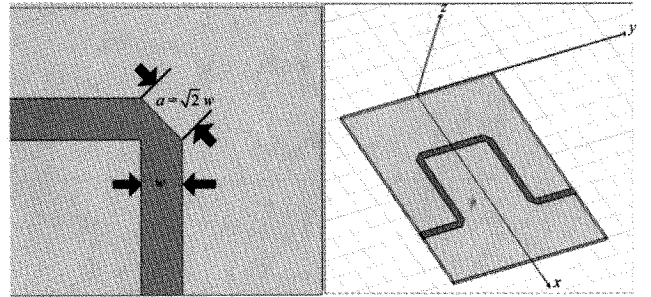


图 4 微带线  $a = \sqrt{2}w$  削角弯头 HFSS 模型

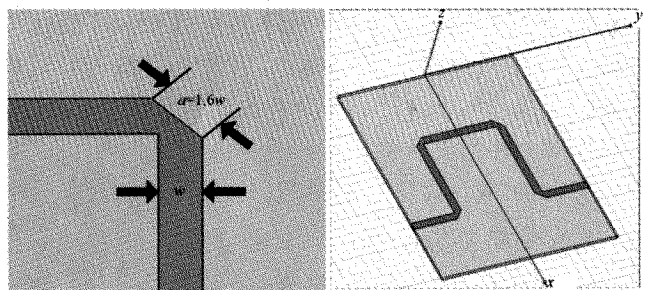


图 5 微带线  $a = 1.6w$  削角弯头 HFSS 模型

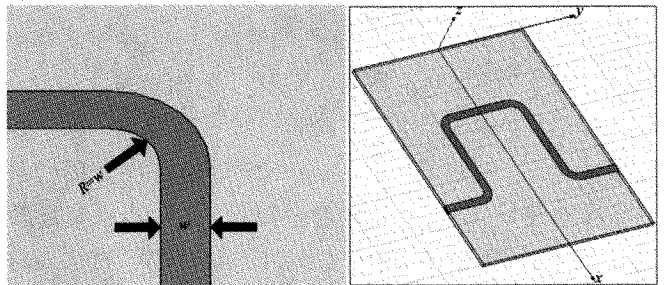


图 6 微带线  $R = w$  扫掠弯头 HFSS 模型

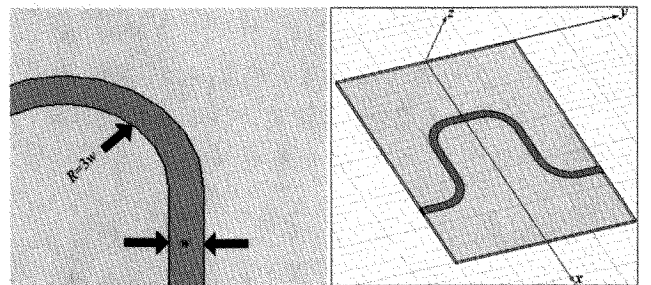


图 7 微带线  $R = 3w$  扫掠弯头 HFSS 模型

Ansoft HFSS 仿真数据对比见表 1, 其包括了不削

角直角转弯,  $a = \sqrt{2}w$  和  $a = 1.6w$  的两种直角削角弯头, 以及  $R = w$  和  $R = 3w$  的两种圆形扫掠弯头的工作

频段高、中、低三个频点的回波损耗  $S_{11}$  和插入损耗  $S_{21}$  数值。

表1 微带线不同类型弯头补偿方法回波损耗与插入损耗 HFSS 仿真数据对比

转弯方式	仿真指标	900 MHz	950 MHz	1 000 MHz
不削角直角转弯	$S_{11}/\text{dB}$	-20.976 4	-20.842 3	-20.755 5
	$S_{21}/\text{dB}$	-0.080 4	-0.084 2	-0.087 6
$a = \sqrt{2}w$ 直角削角弯头	$S_{11}/\text{dB}$	-25.242 5	-25.065 9	-24.932 9
	$S_{21}/\text{dB}$	-0.058 0	-0.061 2	-0.064 2
$a = 1.6w$ 直角削角弯头	$S_{11}/\text{dB}$	-27.517 0	-27.341 0	-27.208 6
	$S_{21}/\text{dB}$	-0.052 1	-0.055 0	-0.057 8
$R = w$ 圆形扫掠弯头	$S_{11}/\text{dB}$	-25.882 5	-25.662 8	-25.483 0
	$S_{21}/\text{dB}$	-0.053 6	-0.056 7	-0.059 7
$R = 3w$ 圆形扫掠弯头	$S_{11}/\text{dB}$	-26.974 7	-26.849 0	-26.711 8
	$S_{21}/\text{dB}$	-0.048 9	-0.052 1	-0.054 6

### 3 结 论

从 Ansoft HFSS 仿真数据可以看出, 不削角直角弯头的回波损耗和插入损耗都是最差的, 这一结果验证了文献[2-4]中关于直角弯头的不连续性引入了寄生电抗, 影响了微带线的性能的描述, 因此必须进行补偿以改善微带线的电性能。对于这样的不连续性, 实际工程中最常用的补偿方法就是设计适当的削角弯头或者扫掠弯头, 以消除寄生电抗的影响。

本文的第一类削角补偿方法包括了  $a = \sqrt{2}w$  和  $a = 1.6w$  的两种直角削角弯头; 第二类扫掠补偿方法包括了  $R = w$  和  $R = 3w$  的两种圆形扫掠弯头。通过 Ansoft HFSS 仿真对比发现,  $a = 1.6w$  的直角削角弯头的回波损耗和插入损耗都是最优的, 这和很多文献上给出的参考值(部分文献给出最优参考值为  $a = 1.6w$  或者  $a = 1.8w$ )是一致的, 说明了研究结果的正确性和可参考性<sup>[12]</sup>。虽然  $a = \sqrt{2}w$  直角削角弯头在结构绘制上比较方便, 但仍然建议微带电路设计中, 特别是高频段、小尺寸的转弯使用  $a = 1.6w$  的削角弯头, 特别是对微带线的损耗要求比较严格的电路设计中应使用。  $R = 3w$  的圆形扫掠弯头的回波损耗和插入损耗明显优于  $R = w$  圆形扫掠弯头和  $a = \sqrt{2}w$  直角削角弯头, 其回波损耗比  $a = 1.6w$  直角削角弯头略差, 插入损耗比  $a = 1.6w$  直角削角弯头略优, 因此建议微带电路设计中, 大尺寸的转弯使用  $R = 3w$  圆形扫掠弯头。

### 参 考 文 献

- [1] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [2] 清华大学《微带电路》编写组. 微带电路[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1976.
- [3] [美] POZAR David M. 微波工程[M]. 张肇仪, 译. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [4] GREBENNIKOV Andrei. RF and microwave power amplifier design[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [5] [美] 巴尔, 巴希尔. 微波固态电路设计[M]. 郑新, 赵玉洁, 刘永宁, 等译. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [6] GREBENNIKOV A V. Create transmission-line matching circuits for power amplifiers [J]. Microwaves & RF, 1984, 23(7): 81-87.
- [7] JOHN Moore, HAO Ling. Characterizations of 90° microstrip bend with arbitrary miter via the time-domain finite difference method [J]. IEEE, 1990, 38(4): 405-411.
- [8] 曾文波, 赵嘉. PBG 结构方形切角微带天线的设计[J]. 广西工学院学报, 2007, 18(4): 57-59.
- [9] 谢拥军, 王鹏, 李磊, 等. Ansoft HFSS 基础及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [10] 谢拥军, 刘莹, 李磊, 等. HFSS 原理与工程应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.
- [11] 李明洋. HFSS 电磁仿真设计应用详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [12] 王克伟, 王均宏. 微带线拐角传输及特性研究[J]. 微波学报, 2006, 22(3): 32-35.

作者简介: 陈 魁 男, 1983 年出生, 陕西紫阳人, 助理工程师。主要从事天线与微波技术研究工作。  
赵 娜 女, 1984 年出生, 陕西大荔人, 助理工程师。主要从事天线与微波技术研究工作。  
陶学敏 女, 1987 年出生, 重庆江津人, 硕士研究生。主要从事天线与微波技术研究工作。

## HFSS 视频培训课程推荐

HFSS 软件是当前最流行的微波无源器件和天线设计软件，易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))是国内最专业的微波、射频和天线设计培训机构。

为帮助工程师能够更好、更快地学习掌握 HFSS 的设计应用，易迪拓培训特邀李明洋老师主讲了多套 HFSS 视频培训课程。李明洋老师具有丰富的工程设计经验，曾编著出版了《HFSS 电磁仿真设计应用详解》、《HFSS 天线设计》等多本 HFSS 专业图书。视频课程，专家讲解，直观易学，是您学习 HFSS 的最佳选择。



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>



### 更多 HFSS 视频培训课程:

#### ● 两周学会 HFSS —— 中文视频培训课程

课程从零讲起，通过两周的课程学习，可以帮助您快速入门、自学掌握 HFSS，是 HFSS 初学者的最好课程，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/1.html>

#### ● HFSS 微波器件仿真设计实例 —— 中文视频教程

HFSS 进阶培训课程，通过十个 HFSS 仿真设计实例，带您更深入学习 HFSS 的实际应用，掌握 HFSS 高级设置和应用技巧，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/3.html>

#### ● HFSS 天线设计入门 —— 中文视频教程

HFSS 是天线设计的王者，该教程全面解析了天线的基础知识、HFSS 天线设计流程和详细操作设置，让 HFSS 天线设计不再难，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/4.html>

#### ● 更多 HFSS 培训课程，敬请浏览: <http://www.edatop.com/peixun/hfss>

## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计相关培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>