

# 一种 L 波段天线合成网络的研制

袁韬韬, 石玉, 何泽涛

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川成都 610054)

**摘要:** 针对实际工艺中使用微带线耦合器在实现高耦合系数时寄生参数较大、且工艺实现较为困难的问题, 采用带状线耦合器与微带线耦合器相结合的设计方法, 结合 ADS 仿真软件, 实现了具有高幅度和相位精度、低插入损耗的合成网络, 解决了高耦合系数与大寄生参数间的矛盾及加工困难的问题。

**关键词:** 天线合成网络; 耦合器; 微带线; 带状线; 仿真

中图分类号: TM622

文献标识码: B

文章编号: 1001-3830(2010)04-0070-04

## Design and Implementation of L-band Antenna Mixing Network

YUAN Tao-tao, SHI Yu, HE Ze-tao

*State Key Lab of Electronic Thin Films and Integrated Circuits, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*

**Abstract:** Considering that the parasitics becomes extremely large and the process is difficult to realize when implementing high coupling for microstrip line coupler, a design method was applied combining the design of stripline and microstrip line couplers. A mixing network with high amplitude and phase accuracy and low insertion loss was developed by the aid of ADS simulation software, solving the contradiction of high coupling and large parasitic parameter and the problem of manufacturing.

**Key words:** mixing network; coupler; microstrip line; stripline; ADS

## 1 引言

在微波系统中, 微带线定向耦合器作为一种基本元件, 它结构简单, 易于嵌入到微波和毫米波混合单片集成电路中, 是一种应用很广泛的微波器件<sup>[1]</sup>。相对于微带线耦合器来说, 带状线定向耦合器则具有体积小、插入损耗小、耦合度高等优点<sup>[2]</sup>。

近年来, 分布式天线系统成为未来公共无线接口一种新的发展趋势, 这也对天线合成网络的幅度相位精度提出了更高的要求。较高的耦合系数难以使用微带线耦合器实现, 但带状线耦合器与其他有源或无源电路的连接较难, 为设计带来困难<sup>[2]</sup>。

本研究设计的是具有高端口相位、幅度精度的天线合成网络, 使用带状线耦合器解决了实现

高耦合系数时常用微带线耦合器寄生参数过大的难题, 结合微带线耦合器降低工艺复杂程度, 最终成功实现预期目标。

## 2 理论分析

待实现的天线合成网络将输入的信号进行不均匀分配, 对各输出端口相位、幅度精度要求较高。为实现精确可控的功率分配, 使用平行耦合线从主信号通路上耦合出各端口需要的信号幅度。

等宽微带线耦合器的原理如图 1 所示。两根具有相同宽度的相邻微带线, 间距为  $S$ , 宽度为  $W$ ,

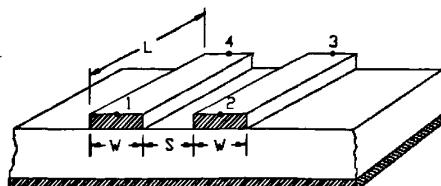


图 1 平行耦合微带线示意图

收稿日期: 2009-12-02 修回日期: 2009-12-26

作者通信: E-mail: yuantaotao@gmail.com

长度为  $L$ 。信号从 1 端输入，4 端为直通端，2 端为耦合端，3 端是隔离端。

在工程应用中，等宽微带线耦合器的耦合系数主要受线间距  $S$  影响，决定输出端口阻抗的是线宽  $W$ ，而整个耦合器对传输信号的相移由长度  $L$  决定。带状线的基本结构由上、下两块接地板和中间导体组成，导体位于上、下接地板的对称面上，导体带与接地板之间可以是空气或填充其它介质，适合光刻加工制造<sup>[3]</sup>。

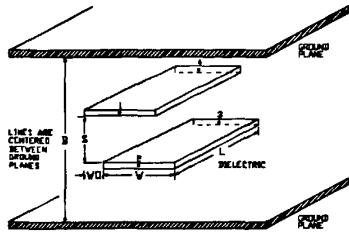


图 2 耦合带状线示意图

图 2 所示为均匀带状线耦合器的原理图。可以很方便地使用仿真工具计算出相关参数与耦合系数之间的关系。

### 3 电路实现

#### 3.1 设计及难点

该天线合成网络为 1 路输入，11 路输出，两侧对称位置的输出端对幅度的要求是一致的，从上至下分别要求为  $-27.96 \text{ dB}$ ,  $-26.92 \text{ dB}$ ,  $-22.35 \text{ dB}$ ,  $-16.86 \text{ dB}$ ,  $-6.80 \text{ dB}$ ，相位要求左侧超前右侧  $180^\circ$ ；第 6 输出端口要求输出为  $-2.81 \text{ dB}$ ，相位超前右侧  $90^\circ$ 。

由于输出相位可以方便地由输出端微带线长度调整，故耦合系数应该是最值得注意的指标。

为了缩小天线合成网络的整体体积，两侧输出端分别与主传输线的耦合可以简化成三线耦合。图 3 是微带三线耦合的示意图。

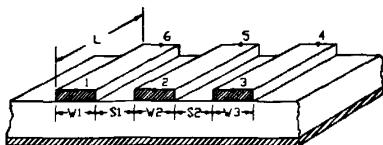


图 3 三线耦合示意图

使用沿信号传输方向的设计顺序，首先确定第 1、11 端口与主信号线构成的三线耦合的相关参数。

设计时可以使用 Advanced Design System

2008 的 LineCalc 工具计算相关参数。使用的板材介电常数为 9.6，厚度为 1mm，设置其他参数如导体厚度及电导率等后，可计算出耦合微带线的线宽、缝宽、长度值。

计算中易得出，为达到  $-6.8 \text{ dB}$  的耦合系数，使用耦合微带线方式时缝宽约为 0.14mm。

使用 0.14mm 缝宽试制了此路耦合器，经测试，耦合系数仅能达到  $-9.2 \text{ dB}$ ，与预期目标相差较大。

在实际的工艺条件下，缝宽工艺误差对耦合系数的影响已经不可忽视，为了实现高耦合系数必须使用高精度的工艺。为了降低工艺复杂程度，对  $-6.8 \text{ dB}$  耦合度这一路使用不同的耦合方式。

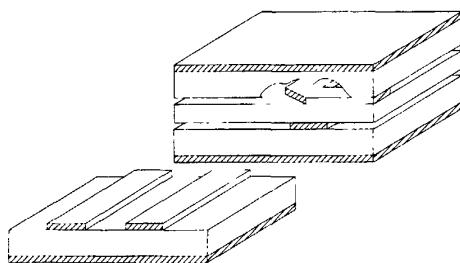


图 4 带状线耦合器示意图

如图 4 所示，实际电路中采用的带状线耦合器使用一层双面板上下各叠有一层单面 GND 层的结构来构成。中间层使用介电常数为 2.65 的板材，厚度为 0.25mm。两侧叠加的单面板使用 FR4 板材，介电常数为 4.6，厚度为 1mm。三层板材使用螺钉叠紧并固定。

值得注意的是，在耦合器的直通端，下侧导体直接连接到下一级，而上侧导体在耦合端一侧使用非均匀偏移带状线输出。

相对于使用微带线耦合器，带状线耦合降低了对工艺精度的要求，减小了工艺误差对结果的影响。

#### 3.2 电路仿真

对于耦合系数低于  $-10 \text{ dB}$  的输出端，如前所述将两侧对称的两对平行耦合线简化成三线耦合，ADS 仿真软件中 LineCalc 工具仅提供两根微带线的耦合的计算，不支持三线耦合器的仿真。一个简便的办法是将计算出的值作为初值代入到仿真界面中，使用 ADS 的调谐工具进行调整，先手动调整各参数的值，观察其对整体性能的影响，对结果影响较为明显的参数应仔细处理，最终调

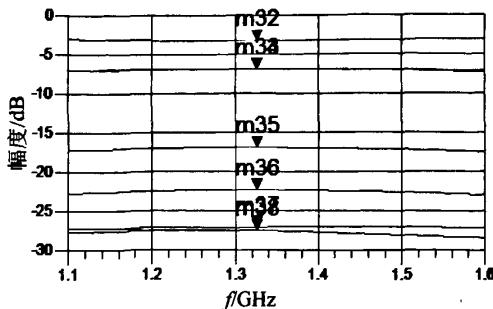


图 5 输出幅度仿真结果

整耦合系数、端口阻抗至接近目标值。依次确定对应各对耦合线的相关参数。

由于前述工艺的原因，使用带状线耦合对第 5、7 路进行设计。带状线的结构决定了无法使用三线耦合，在布局上使得两个带状线耦合错开了位置，这也意味着相同输出幅度的两个端口对应着不同的耦合系数。

使用 LineCalc 工具可以方便地进行耦合带状线的计算，将计算得出的值代入到原理图中，在仿真中加入微带传输线及焊盘的影响，调整后得到的幅度值仿真结果符合指标（ $\pm 0.5\text{dB}$ ），如图 5 中所示，仿真结果与目标值比较结果如表 1 所示。

表 1 输出幅度仿真与目标值比较

	$S_{21}/\text{dB}$	$S_{31}/\text{dB}$	$S_{41}/\text{dB}$	$S_{51}/\text{dB}$	$S_{61}/\text{dB}$	$S_{71}/\text{dB}$
目标值	-27.96	-26.93	-22.35	-16.86	-6.80	-2.82
仿真值	-27.50	-27.07	-22.36	-16.93	-6.86	-3.21

在调整耦合系数时同样注意端口阻抗的调整，最终端口驻波仿真结果如图 6 所示。

为了实现输出端的相位差，在每个耦合器输出端使用微带延迟线来调整输出端的相位。图 7 为调整后的相位，基于两侧输出端的对称特性，仅对 1-7 输出端进行了仿真，对称端口使用添加微带延时线的方式来产生相位差。

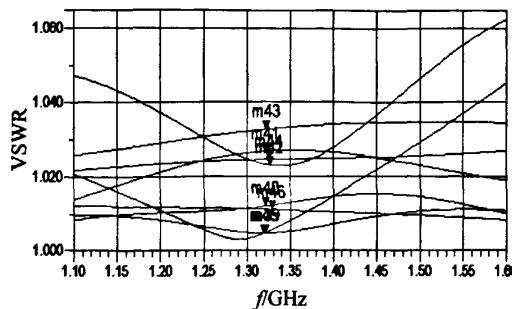


图 6 端口驻波仿真结果

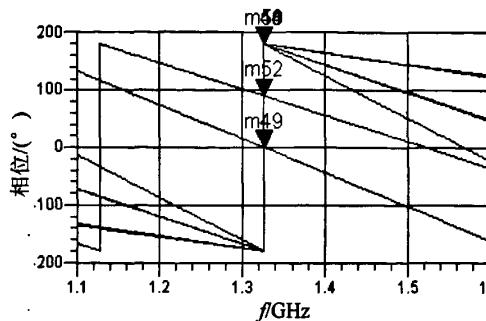


图 7 输出相位仿真结果

### 3.3 实物制作

利用 AutoCAD 设计了布局与 PCB 版图，如图 8 所示。在调整相位的弯曲微带线中间必须加入接地的焊盘以消除相邻微带线间耦合效应对结果的影响。

实物样品（未加装上盖）如图 8 所示。

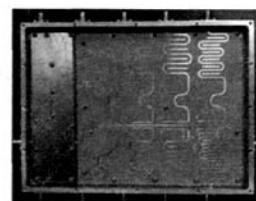


图 8 器件的实物照片

装配完成后，使用矢量网络分析仪对器件进行测试。与目标值比较，各端口幅度误差在  $0.5\text{dB}$  内，相位误差在  $5^\circ$  以内，端口驻波比低于 1.3。测试结果如表 2 所示。

表 2 器件输出幅度测试结果

	$S_{21}/\text{dB}$	$S_{31}/\text{dB}$	$S_{41}/\text{dB}$	$S_{51}/\text{dB}$	$S_{61}/\text{dB}$	$S_{71}/\text{dB}$
目标值	-27.96	-26.93	-22.35	-16.86	-6.80	-2.82
实测值	-27.81	-27.75	-22.67	-16.75	-7.24	-3.23

### 4 结论

精确地控制耦合系数以得到精确的输出幅度值是本天线合成网络设计的难点之一，与此同时还必须考虑到对端口驻波的影响。

当要实现的耦合系数低于  $-8\text{dB}$  时，使用微带线耦合器的缝宽会低于  $0.2\text{mm}$ ，对工艺的要求较高。使用  $0.14\text{mm}$  的缝宽实现的耦合器受寄生参数影响，只能达到  $-9.2\text{dB}$  的耦合系数，离  $-6.8\text{dB}$  的目标值相差较大。

为了达到较高的耦合系数，使用带状线耦合器可以解决微带线耦合对工艺精度要求过高的难

点，测试结果表明，带状线耦合在一定工艺条件下能实现高耦合系数。

## 参考文献：

- [1] 韩磊, 黄庆安, 廖小平. X 波段微带线定向耦合器的设计与模拟[J]. 电子器件, 2006, 29(2): 397.
- [2] 张婷, 傅德民, 田立卿. 一种高方向性宽频带定向耦

(上接 62 页)

动信号。其中同步整流技术是近年来提高开关电源效率的主要手段<sup>[5]</sup>。

### 3.2 自驱动同步整流中的软开关调整

正激式有源钳位同步整流电路拓扑结构如图 6 所示(反激式有源钳位没有明显性能优势亦无成本优势，本文不再讨论)。

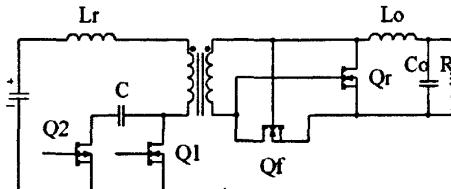


图 6 正激式有源钳位同步整流电路结构

图 6 是在图 3 的基础上将次级整流续流二极管换成 MOS 管  $Q_f$  和  $Q_r$ ，驱动信号分别取自变压器副边同名端和异名端。按照 2.1 介绍的方法调节软开关，如果将  $V_{zvs}$  调整过低电源会发生工作不稳定的情况。当电源工作在图 5 所示的  $V_{zvs} \approx 10V$  的情况下已经非常不稳定了。这是由于软开关谐振改变了电路的工作状态，当开关太“软”时，次级的整流管和续流管提前获得了足以驱动自身导通的驱动信号，发生了比正常导通时刻提前导通的情况。为了保证电源安全工作，必须确保  $V_{zvs}$  足够高以保持合理的安全稳定裕度；为了提高效率，又必须使  $V_{zvs}$  尽可能的低以实现开关尽量“软”。所以设计者必须反复调试软开关以达到最优效果。根据 2.1 的讨论，通过调整  $L_r$  电感大小可以方便地实现最佳效果。在本实验采用的输入电压 36~72V 70W DC-DC 电信电源中， $V_{zvs}$  的最佳值在 32~36V 之间，即略小于最小输入电压。此时  $L_r=0.66\mu H$ 。采用图 6 电路拓扑结果，电源效率可以轻松达到 86% 以上，

合器的研究[A]. 2005 全国微波毫米波会议论文集[C], 深圳, 2006.1136.

- [3] 胡助明. 宽带带状线定向耦合器的设计[D]. 成都：电子科技大学, 2008.

**作者简介：**袁福福 (1986-)，男，四川通江县人，硕士研究生，从事射频电路研究工作。

甚至达到 90%。

## 4 结论

(1) 本文讨论了在有源钳位电路中改变谐振电感调整软开关效果的情况。谐振电感越大，软开关效果越明显，即  $V_{zvs}$  越低。在本文采用的电信电源中，此电感的体积较小，对电路体积影响不大。

(2) 在正激式有源钳位同步整流电源中，开关不能调整得过“软”，以免发生工作不稳定的情况影响电源安全。在本文讨论的电信电源中， $V_{zvs}$  的最佳值在 32~36V 之间。此电路拓扑结构能很容易的实现高效率。

## 参考文献：

- [1] Mappus S. Active clamp transformer reset high side or low side [Z]. Texas Instruments Literature No. SLUA322, 2004, September:2-6.
- [2] Lin B R, Chiang H K, Huang C E, et al. Analysis and implementation of a zero-voltage switching forward converter with a synchronous rectifier [J]. Electric Power Applications, IEE Proceedings, 2005, 152(5) 9: 1085-1092.
- [3] Acik A, Cadirci I. Active clamped ZVS forward converter with soft-switched synchronous rectifier for high efficiency, low output voltage applications [J]. Electric Power Applications, IEE Proceedings, 2003, 150(2): 165-174.
- [4] Sanjaya Maniktala. 精通开关电源设计[M]. 北京：人民邮电出版社, 2008.148-149.
- [5] 宋辉淇, 林维明. 同步整流技术的特点与分析比较[J]. 通信电源技术, 2006, 23(3): 34-36.

**作者简介：**陈鉴宇 (1986-)，男，四川攀枝花人，硕士研究生，研究方向为高效率 DC-DC 变换器。

**勘误：**本刊 2010 年第 3 期发表的《硬币识别器传感线圈参数设计及改进》一文 (p.57-60)，第二作者应为“周小刚”，误为“周小川”，特此更正，并向作者和读者致歉。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### 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，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

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

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 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，一直致力于专注于微波、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经典培训课程和 **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、既能达到了现场培训的效果，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主讲，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>