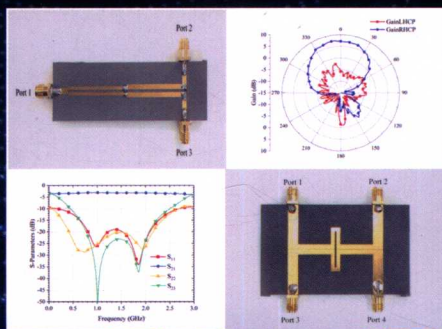


# 微波射频器件和天线的 精细设计与实现

(第2版)

Precise Design and Implementation  
of Microwave Radio-Frequency Devices  
and Antennas, 2nd Edition

吴永乐 刘元安 张伟伟 / 编著



张外借



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

# 微波射频器件和天线 的精细设计与实现 (第2版)

吴永乐 刘元安 张伟伟 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书介绍了耦合线带通滤波器设计与实现、双频带耦合线功率分配器设计与实现、强耦合度高定向性耦合器设计与实现、宽带圆极化天线设计与实现、Origin 和典型数据图片处理，阐述这些器件从理论、设计、仿真、制作到实测的全过程。本书不仅介绍了如何使用仿真软件 ADS 和 HFSS 来设计、仿真和优化代表性的微波无源器件和天线，还介绍了如何使用 AutoCAD 软件将 HFSS 建立的器件模型转化为可直接加工的 PCB 版图。

本书适合从事射频微波无源器件和天线研发工作的科技人员阅读使用，也可作为高等学校相关专业的教学用书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

微波射频器件和天线的精细设计与实现 / 吴永乐, 刘元安, 张伟伟编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2019.4

ISBN 978-7-121-35927-9

I. ①微… II. ①吴… ②刘… ③张… III. ①微波天线 IV. ①TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 014620 号

策划编辑: 张 剑 (zhang@phei.com.cn)

责任编辑: 徐 萍

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.25 字数: 416 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版

2019 年 4 月第 2 版

印 次: 2019 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: zhang@phei.com.cn。

# 前 言

电磁场与微波技术是电子科学与技术一级学科下的一门重要的专业基础学科，覆盖了电子工程、通信工程、电子信息工程、雷达工程和物联网工程等领域。

目前，已经有众多的优秀理论教材能够满足本科生和研究生对电磁场与电磁波基本概念的理解、专业习题的解答和重大考试的复习等。同时，也有不少专业的 ADS、HFSS、AutoCAD 等专用仿真或制作工具的独立教程供大家参考。但是，作者在协助指导本科生和研究生设计和实现具体电路与系统的过程中发现，不少学生或者工程师都专注于自己在某一个知识面的理解或者某单一专业软件的熟悉使用上，很难做到从理论、设计、仿真、制作、实测到形成报告的完整过程，从而无法独立完成科研项目的立项、执行、验收和文档总结的完整工作。更加关键的是，很多学生或工程师缺少突破自己技术能力来完善自己的勇气和途径。作者经过多年的学习和工作积累发现，导致这些问题的主要原因之一是缺乏一本完整且通俗易懂的专业书籍来引导。另外，对于初学者，基本工具的使用和基本电路的尝试是必须经历的过程，而大学老师很难有精力一次又一次地重复相同的科研过程来指导学生。本书就是在该客观需求下产生的，期待本书不仅可以积极引导初学者完成完整的设计流程，而且能够解决高等学校指导微波方向研究生的困扰。

本书的特点是避免烦琐的理论推导，注重微波理论与工程实现的无缝连接，确保包含 ADS、HFSS 和 AutoCAD 等在内的一体化设计流程的流畅性，提供“手把手”模式下设计与实现的细节步骤，力争从微波理论、电路仿真、电磁全波仿真到实物制作形成一个完整的体系，为撰写项目总结和学术论文提供强有力的支撑。本书的案例来自作者在国际 SCI 检索学术期刊的论文和所申请的发明专利的具体实例，详细的理论设计思路和参数性能分析等细节内容可以参考原学术论文和发明专利文件。

本书第 1 版面向市场后，读者反馈效果良好，因此电子工业出版社建议作者优化修订第 1 版后重新出版发行第 2 版。本书第 2 版共分 5 章，全书由吴永乐教授和刘元安教授提出框架结构、提供新颖的器件案例以及负责全书内容的统筹调整，张伟伟博士生主要负责第 2 版的更新与修订工作，另外，辅助参加本书第 2 版修订的人员还有马莉、孔梦丹和王卫民等。

本书的修订得到了国家重点基础研究计划（973 计划）（No. 2014CB339900）和国家自然科学基金（No.61671084）的部分资助。全体参与者特别感谢北京邮电大学电子工程学院给我们提供了良好的工作平台，感谢读者们的宽容、支持与厚爱。吴永乐教授还特别感谢香港城市大学电子工程学系的培育和 IEEE Fellow 薛泉教授对自己多年学术工作细致而富有建设性的指导，感谢加拿大卡尔加里大学电子与计算机学院的 IEEE Fellow Fadhel M. Ghannouchi 教

授以及 iRadio 实验室提供的一些技术帮助。毫不夸张地讲，没有之前多年的学术积累，就无法提供最初的想法和素材来完成本书，也没有机会和勇气通过公开技术细节来推动未来射频微波全行业共赢的局面。

在本书第 2 版的撰写与修订过程中，作者参考或引用了包含 ADS、HFSS、AutoCAD、Altium Designer 和 Origin 等在内的多家商业软件的相关原始技术资料，借此机会向这些技术资料的原著者及相应的软件公司表示由衷的感谢。

由于作者编写水平的限制和完稿时间的紧迫，书中难免有疏漏和不当之处，敬请广大读者批评指正，并殷切希望提出宝贵的意见和建议（读者建议反馈邮箱：[wuyongle138@gmail.com](mailto:wuyongle138@gmail.com)）。

编著者

2018 年 1 月

于北京邮电大学电子工程学院

# 目 录

第 1 章 耦合线带通滤波器设计与实现	1
1.1 耦合线带通滤波器介绍	1
1.2 耦合线带通滤波器的 ADS 仿真	2
1.2.1 新建工程和仿真电路模型	2
1.2.2 查看并处理仿真结果	10
1.2.3 微带线电路模型仿真	13
1.3 耦合线带通滤波器的 HFSS 仿真	16
1.3.1 新建设计工程	17
1.3.2 添加参数变量	19
1.3.3 滤波器建模	21
1.3.4 设置激励端口	31
1.3.5 创建辐射边界条件	39
1.3.6 求解设置	41
1.3.7 设计检查和运行仿真	43
1.3.8 查看 S 参数	43
1.3.9 查看群时延曲线	46
1.3.10 参数优化	48
1.4 PCB 制板	57
1.4.1 导出滤波器	57
1.4.2 调整 AutoCAD 背景颜色	58
1.4.3 调出常用工具栏	60
1.4.4 删除外边框	61
1.4.5 测量滤波器尺寸	62
1.4.6 填充微带线	64
1.4.7 进行投板	66
1.4.8 图层的使用	67
1.5 滤波器实物图及测试	68
第 2 章 双频带耦合线功率分配器设计与实现	69
2.1 双频带功分器介绍	69
2.2 双频带功分器的 ADS 仿真	70
2.2.1 新建 ADS 设计工程	70
2.2.2 查看并处理仿真结果	74
2.2.3 微带线电路模型仿真	77
2.3 双频带功分器的 HFSS 仿真	80

2.3.1	新建设计工程	80
2.3.2	添加参数变量	83
2.3.3	功分器建模	86
2.3.4	设置激励端口	100
2.3.5	创建辐射边界条件	103
2.3.6	求解设置	105
2.3.7	设计检查和运行仿真	107
2.3.8	查看 S 参数	108
2.3.9	参数优化	112
2.4	PCB 制板	118
2.5	功分器实物图及测试	124
<b>第 3 章</b>	<b>强耦合度高定向性耦合器设计与实现</b>	<b>126</b>
3.1	强耦合度高定向性耦合器介绍	126
3.2	强耦合度高定向性耦合器的 ADS 仿真	127
3.2.1	新建 ADS 设计工程	127
3.2.2	查看并处理仿真结果	132
3.3	强耦合度高定向性耦合器的 HFSS 仿真	135
3.3.1	新建设计工程	135
3.3.2	添加参数变量	137
3.3.3	耦合器建模	138
3.3.4	设置激励端口	147
3.3.5	创建辐射边界条件	149
3.3.6	求解设置	151
3.3.7	设计检查和运行仿真	153
3.3.8	查看 S 参数和相位信息	153
3.3.9	参数优化	156
3.4	耦合器实物图及测试	164
<b>第 4 章</b>	<b>宽带圆极化天线设计与实现</b>	<b>166</b>
4.1	圆极化天线介绍	166
4.2	圆极化天线的 HFSS 仿真	169
4.2.1	新建设计工程	169
4.2.2	添加设计变量	170
4.2.3	圆极化天线建模	170
4.2.4	设置激励端口	194
4.2.5	创建辐射边界条件	198
4.2.6	求解设置	200
4.2.7	设计检查和运行仿真	201
4.2.8	查看 S 参数	203
4.2.9	参数优化	204

4.2.10 查看最终结果	209
4.3 天线实物图及测试	214
<b>第 5 章 Origin 和典型数据图片处理</b>	<b>216</b>
5.1 双频功分器 S 参数和相位差绘制	216
5.1.1 创建项目并生成初步结果图	216
5.1.2 美化曲线	220
5.1.3 美化坐标轴和图例	225
5.2 圆极化天线轴比绘制	235
5.2.1 创建项目并生成初步结果图	235
5.2.2 美化曲线、坐标轴和图例	236
5.3 圆极化天线方向图绘制	241
5.3.1 创建项目并生成初步结果图	241
5.3.2 美化曲线	242
5.3.3 美化坐标轴和图例	245
<b>参考文献</b>	<b>249</b>



# 第 1 章 耦合线带通滤波器设计与实现

随着现代无线系统的快速发展，滤波器在微波及毫米波无线通信系统中的应用越来越广泛<sup>[1-3]</sup>。在本章，我们展示了一种微带耦合线结构的无源带通滤波器，此滤波器电路结构简单，只包含两对耦合线和一个公共连接点。同时，本章将介绍如何在 ADS 平台下建立该带通滤波器的理想参数仿真模型，以及如何在 HFSS 平台下建立相应的全波电磁仿真模型，最后讲解如何使用 AutoCAD 软件进行 PCB 制板。实验结果表明，该带通滤波器具有尖锐的边缘选择特性。



## 1.1 耦合线带通滤波器介绍

### 1. 滤波器概述

微波滤波器属于二端口器件，其主要功能是使所需信号通过电路而衰减降至最低，同时使无用信号的能量尽可能反射回输入端（或吸收消耗），即实现通带范围内信号的无损耗传输和阻带范围内信号的最大衰减（反射抑制或吸收损耗），其本质依然是一个选频器件。微波滤波器已经广泛应用在微波通信、雷达或射频参数测量系统中，其中带通滤波器的应用更为广泛<sup>[1-3]</sup>。

目前，带通滤波器的评价指标包括通带工作频带（含双频带等）、插入损耗、回波损耗和群时延等。假定端口 1 为带通滤波器的输入端口，端口 2 为带通滤波器的输出端口，则其指标参数表达如下<sup>[1-3]</sup>：

⊙ 插入损耗 (dB) =  $-20\lg|S_{21}|$ ，它表示带通滤波器能量减少的比例值 (dB)；

⊙ 回波损耗 (dB) =  $-20\lg|S_{11}|$ ，它表示带通滤波器输入能量与反射能量的大小比例值 (dB)。

本章从耦合线带通滤波器出发，分别介绍其理论分析、电路仿真、实物制作及测试结果。其中，使用的射频板材信息为 F4B 板，介电常数为 2.65，板厚为 1mm，其他参数可以忽略。

### 2. 滤波器原理简介

图 1.1 为基于耦合线结构的带通滤波器理想电路图，具体信息见参考文献<sup>[23]</sup>。该滤波器电路结构包含两对耦合线，中间为公共连接点。其中两对耦合线的偶奇模特性阻抗分别为  $Z_{ie}$  和  $Z_{io}$  ( $i=1, 2$ )，其电长度分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ，端口阻抗设为  $Z_0$ 。

一般情况下，如果要构建一个工作频率点为  $f_0$  的理想耦合线带通滤波器，达到理想性能，则其 S 参数应该

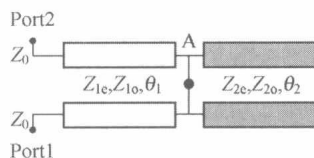


图 1.1 耦合线带通滤波器理想电路图

满足以下条件:  $S_{11}=0$  (通带内),  $S_{21}=0$  (通带外)。设计参数满足的公式如下<sup>[23]</sup>:

$$Z_{1e}Z_{1e}Z_{1o} \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + (Z_0^2 Z_{2e} - Z_{1e}Z_{1o}Z_{2e}) \sin \theta_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + Z_0^2 Z_{1e} \cos^2 \theta_1 \sin \theta_2 = 0 \quad (1-1)$$

$$Z_{1e}Z_{1e} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2 + Z_{1e}Z_{2e} \cos^2 \theta_1 \cos \theta_2 - Z_{1o}Z_{1e} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2 + Z_{1o}Z_{2e} \sin^2 \theta_1 \cos \theta_2 = 0 \quad (1-2)$$

这里假定耦合线带通滤波器的工作中心频率点为 2GHz, 该频率点对应的电长度分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 此处设  $\theta_1=\theta_2=\pi$ 。第一个反射零点  $f_p$  和第三个传输零点  $f_z$  可以这样表达<sup>[23]</sup>:

$$f_p = 1 - \left( \operatorname{atan} \sqrt{\frac{Z_{1e}Z_{1o}Z_{2e} - Z_0^2(Z_{2e} + Z_{1e})}{Z_{1e}Z_{1o}Z_{2o}}} \right) / \pi \quad (1-3)$$

$$f_z = 1 - \left( \operatorname{atan} \sqrt{\frac{Z_{1e}Z_{2e}}{Z_{1e}Z_{1e} - Z_{1o}Z_{1e} - Z_{1o}Z_{2e}}} \right) / \pi \quad (1-4)$$

显然, 指定  $Z_{ie}$  和  $Z_{io}$  ( $i=1, 2$ ) 的值就可以确定对应的  $f_p$  和  $f_z$ 。



## 1.2 耦合线带通滤波器的 ADS 仿真

ADS 平台可以实现参数化的模型仿真, 假设该带通滤波器的工作频点  $f_0$  为 2GHz, 耦合线奇模特性阻抗为  $Z_{ie}$  和  $Z_{io}$  ( $i=1, 2$ ), 电长度为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 端口阻抗为  $Z_0$ , 这些参数都可以在 ADS 电路中给出参数化定义, 然后代入具体的值进行仿真, 以便于观察带通滤波器的各种性能。

### 1.2.1 新建工程和仿真电路模型

#### 1. 运行 ADS 并新建工程

双击桌面上的 ADS 快捷方式图标<sup>[14]</sup>, 启动 ADS 软件。ADS 运行后会弹出窗口【Getting Started with ADS】, 简单介绍一些 ADS 的基本功能以及帮助信息。选中左下角的【Don't display this dialog box automatically】, 这样以后启动 ADS 就不会弹出该窗口。单击右下角的【Close】按钮, 进入主界面【Advanced Design System 2016.01(Main)】, 如图 1.2 所示(注: 此处的工作路径为安装软件时提前设置的路径, 更改方法为右击桌面上的 ADS 快捷方式图标, 选择属性, 弹出如图 1.3 所示的窗口, 在【Start in】中输入新的路径即可)。

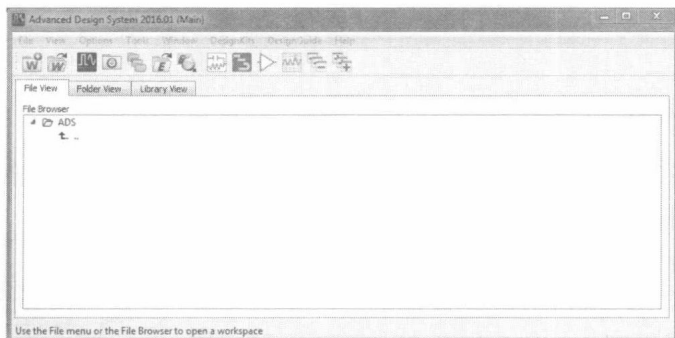


图 1.2 ADS 主界面窗口

执行菜单命令【File】→【New】→【Workspace】，打开如图 1.4 所示的工作空间向导对话框。单击【Next】按钮，如图 1.5 所示，这里可以对【Workspace name】和【Create in】对应的选项进行设置，前者为工作空间（Workspace）的名字，后者为创建的工作空间所保存的路径。此处我们将工作空间名字改为 Filter\_wrk，而工作路径保留默认设置。单击【Next】按钮进入库文件管理对话框，如图 1.6 所示，我们保留默认设置。

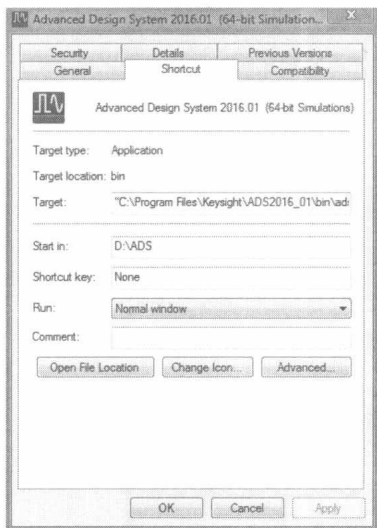


图 1.3 更改 ADS 启动时的默认工作空间路径

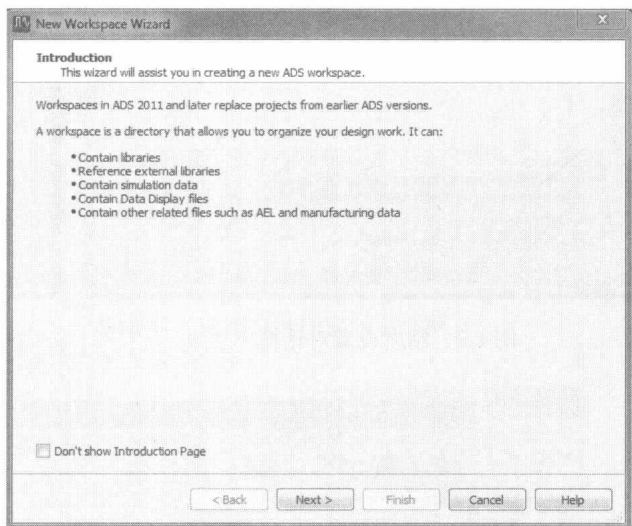


图 1.4 工作空间向导对话框

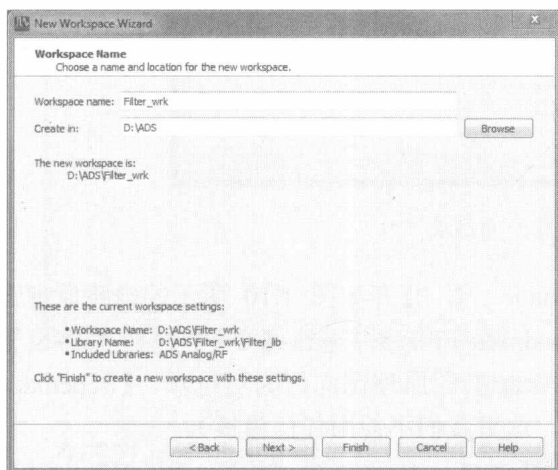


图 1.5 工作空间名字和路径设置对话框

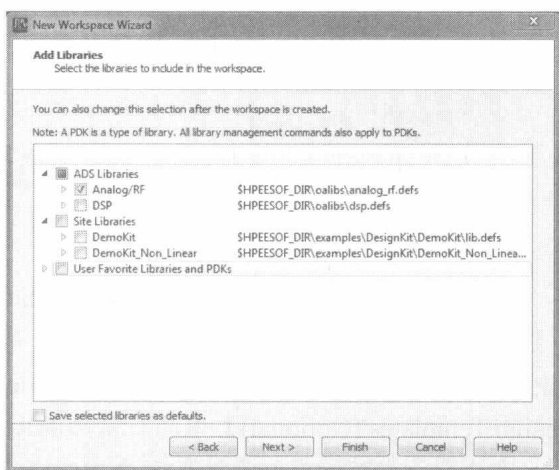


图 1.6 库文件管理对话框

一直单击【Next】按钮，直到出现精度设置界面，如图 1.7 所示。这里我们选择第二个，即精度为 0.0001mm（注：如果读者喜欢用 mil 单位，则可以选择第一个。本书的单位统一为 mm）。单击【Next】按钮出现工作空间设置总结对话框（见图 1.8），从这里我们可以看到之前设置的工作空间的名字、路径、精度以及库文件等信息，单击【Finish】按钮。此时，ADS 主界面中的【Folder View】会显示所建立的工作空间名称和相应路径（见图 1.9），工作空间的名称为“Filter\_wrk”，路径为“D:\ADS\Filter\_wrk”。这个时候我们可以在 D 盘 ADS 文件下找到一个名为 Filter\_wrk 的文件夹，可以进行复制、粘贴、更名以及删

除等操作。

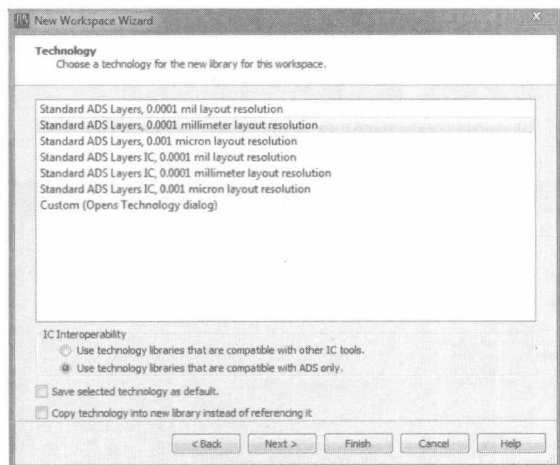


图 1.7 精度设置对话框

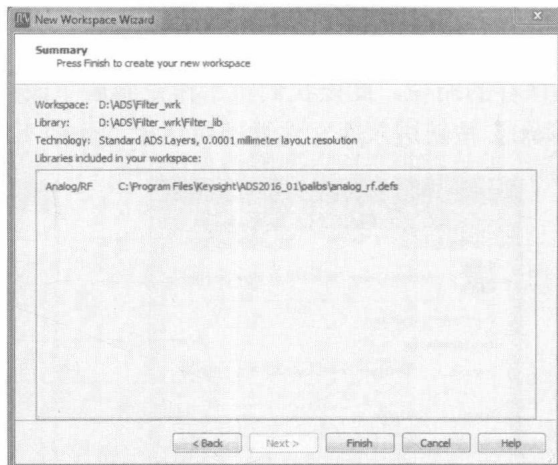


图 1.8 工作空间设置总结对话框

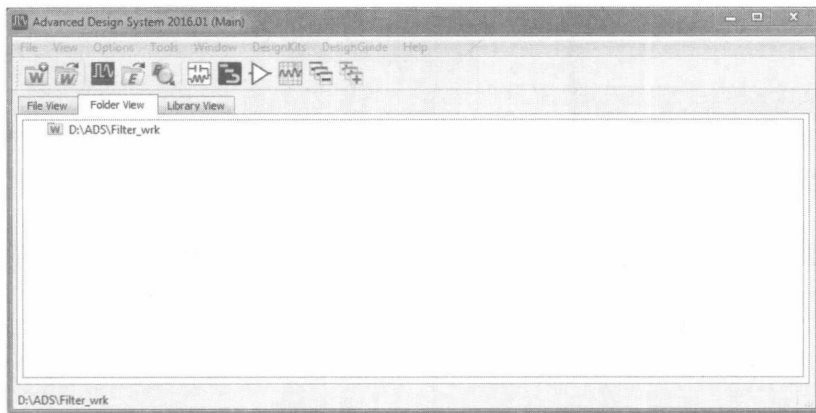


图 1.9 新建工作空间目录

执行菜单命令【File】→【New】→【Schematic...】，打开如图 1.10 所示的电路原理图新建对话框，修改单元（Cell）的名称为“Bandpass\_Filter”，单击【OK】按钮保存设置（注：【Options】中的【Enable the Schematic Wizard】即原理图向导为可选项，【Schematic Design Templates (Optional)】里面有常用的模板，这里我们不使用任何模板）。

完成后 ADS 的电路设计界面会被建立（见图 1.11），在对话框【Schematic Wizard:1】中单击【Cancel】按钮关闭该对话框（注：若不选中图 1.10【Options】中的【Enable the Schematic Wizard】即原理图向导，则对话框【Schematic Wizard:1】不会出现；我们也可以选中图 1.11 中原理图向导对话框里的【Do not show this dialog again】，则以后对话框【Schematic Wizard:1】也不会出现）。至此，一个文件名为 Bandpass\_Filter 的单元创建完成，我们可以在自己创建的工作路径下找到它，如图 1.12 所示。

## 2. 建立滤波器仿真模型

在原理图左侧元件面板列表【Palette】中选择【TLines-Ideal】（见图 1.13），这里面有一些常用的理想器件模型，如微带线、耦合线等。如果原理图左侧没有【Palette】，则可以在

菜单【View】中选择【Component Palette】，调出该元件面板列表。

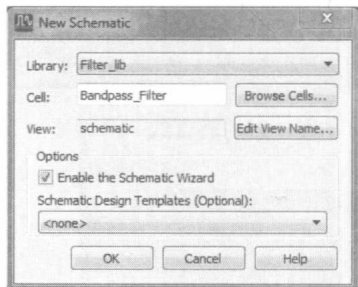


图 1.10 电路原理图新建对话框

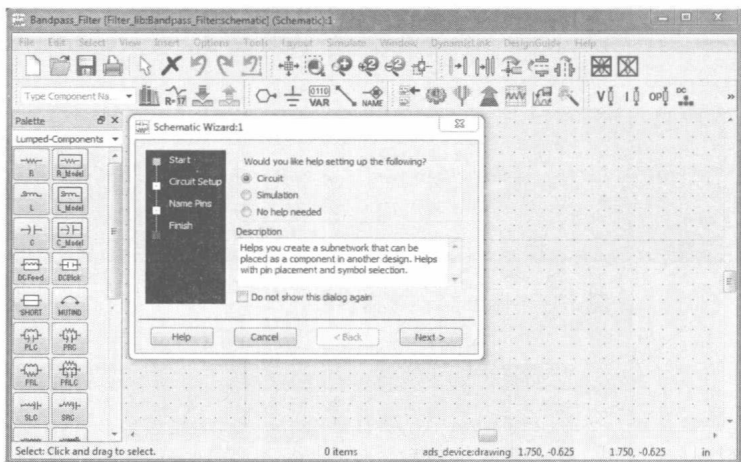


图 1.11 电路原理图向导对话框

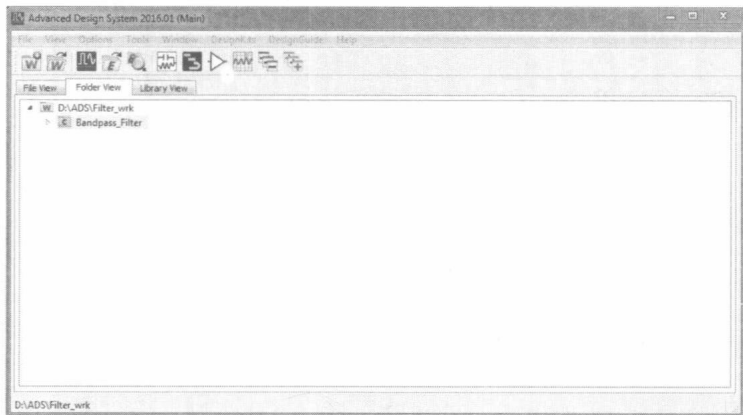


图 1.12 ADS 主界面窗口

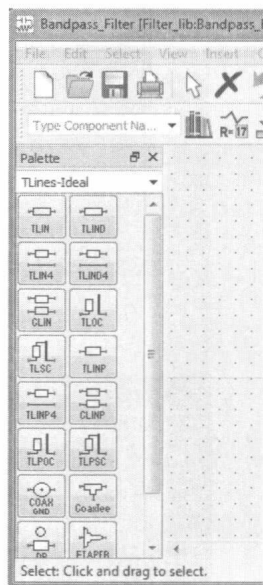



图 1.13 【TLines-Ideal】元件列表

在【TLines-Ideal】中选择理想耦合线模型，在右侧的画图区单击鼠标左键添加一对耦合线模型（见图 1.14），按键盘 Esc 键则可以退出绘制模式。鼠标右键单击新建的耦合线模型，选择【Rotate】可以将该耦合线沿顺时针旋转 90°（或者直接选中耦合线，按组合键“Ctrl + R”也可以进行旋转），旋转后的耦合线如图 1.15 所示。

仿照上述添加耦合线模型的步骤，再添加第二对耦合线（见图 1.16）。也可以选中第一对耦合线，依次按组合键“Ctrl + C”和“Ctrl + V”进行复制和粘贴。

在元件面板列表中选择【Simulation-S\_Param】（见图 1.17），然后在元件面板中单击【TermG】端口（见图 1.18），添加两个仿真端口（见图 1.19）（注：也可以选择元件列表中的【Term】端口，但需要人为添加地，其位于工具栏中，也可以单击菜单栏 Insert 下面的 GROUND 添加地）。

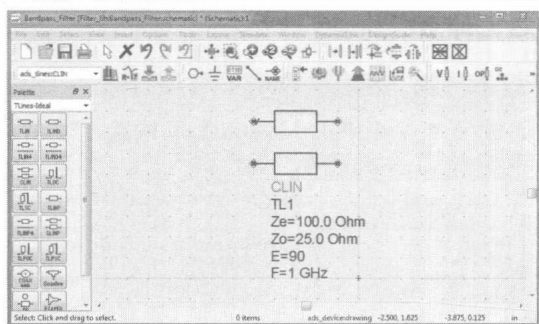


图 1.14 添加第一对耦合线

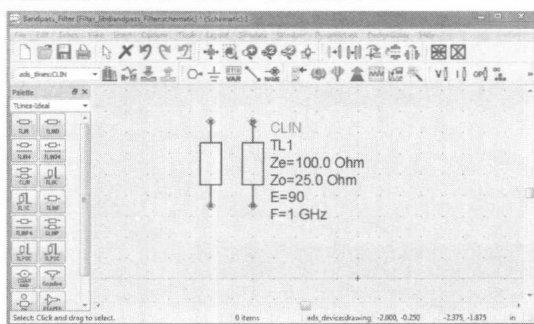


图 1.15 旋转后的耦合线

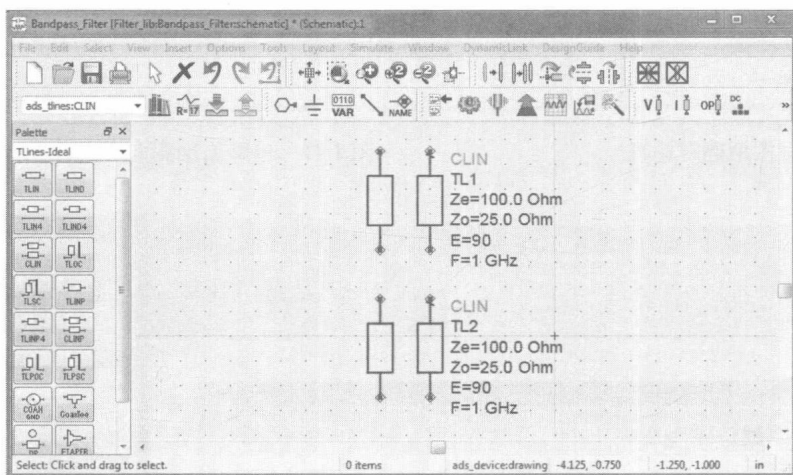


图 1.16 添加第二对耦合线

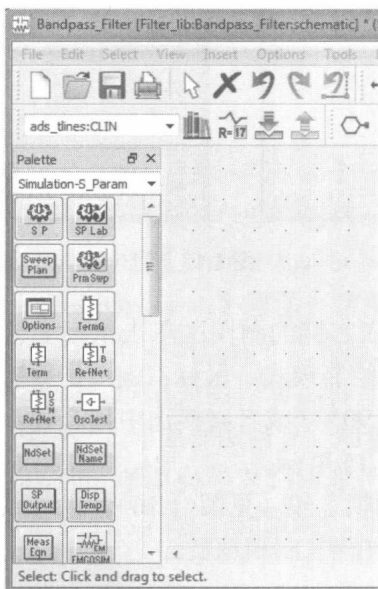


图 1.17 【Simulation-S\_Param】元件列表

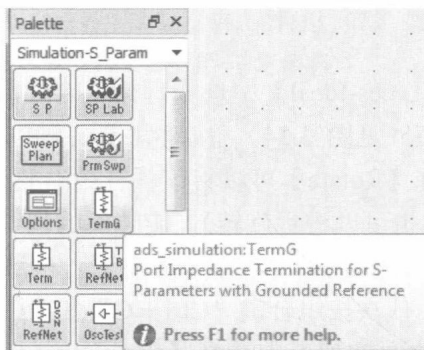




图 1.18 【TermG】端口

单击工具栏上的连线, 依照电路图连接各个元件。单击【Simulation-S\_Param】中的仿真按钮, 在画图区添加 S 参数仿真器, 得到如图 1.20 所示界面。



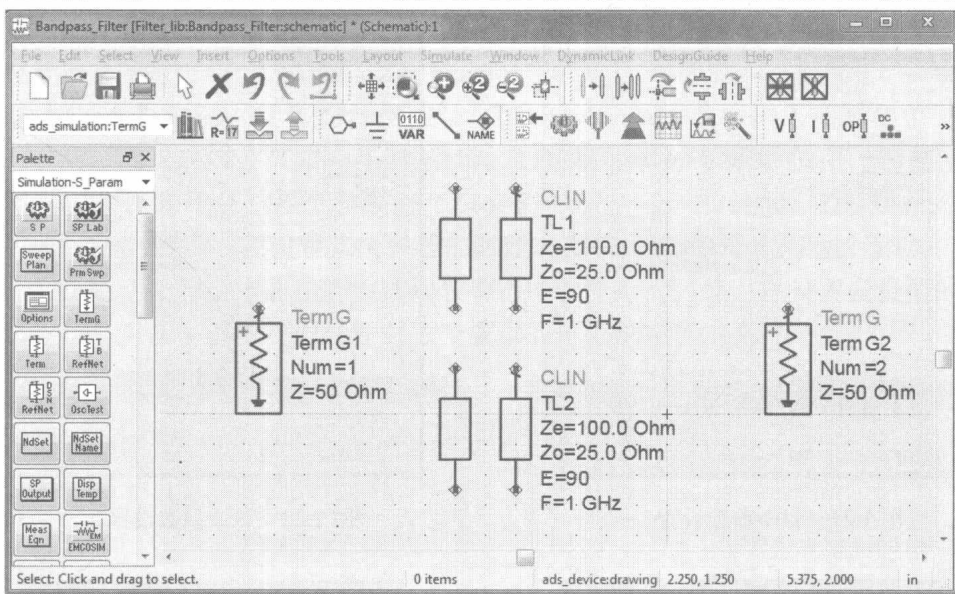


图 1.19 添加两个【TermG】端口

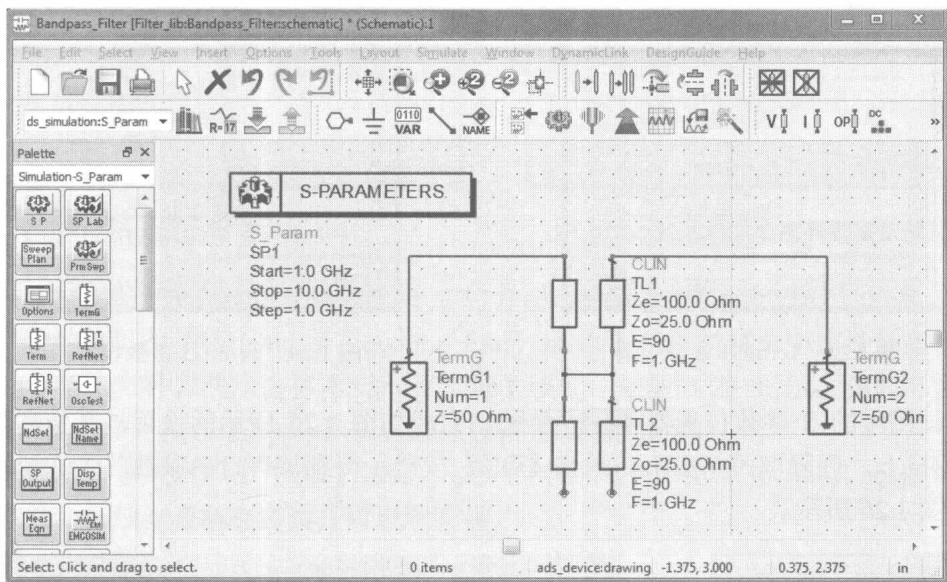


图 1.20 布置走线并添加 S 参数仿真器

由图 1.20 可以看出，添加的耦合线模型 CLIN 默认的工作频率点为 1GHz，S 参数仿真器的仿真频率范围为 1.0~10.0GHz，间隔取 1.0GHz。所以，需要修改该模型的中心频率点以及对应的电路参数和 S 参数仿真器的频率范围及间隔。双击耦合线 TL1，在弹出的对话框中，设置 TL1 的参数值分别为 Z1e (Ohm)、Z1o (Ohm)、SitaT (deg)、f0 (GHz)（注：应检查单位设置是否一致，否则仿真会出错。单位需要在输入文本框的后侧下拉菜单中选择，而不用手动输入。本节电路的参数设置全部变量化，在接下来的部分会对变量进行定义）。设置完如图 1.21 所示，单击【OK】按钮保存设置。

类似地，分别设置 TL2 和端口（TermG）相应的电路参数，其中 TermG1 和 TermG2 的阻抗值均设置为 Z0 (Ohm)，具体参照图 1.22、图 1.23 和图 1.24。

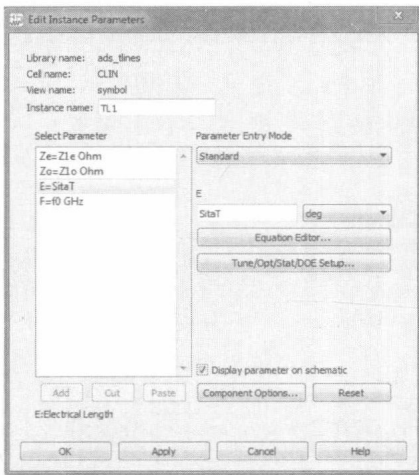


图 1.21 TL1 参数设置

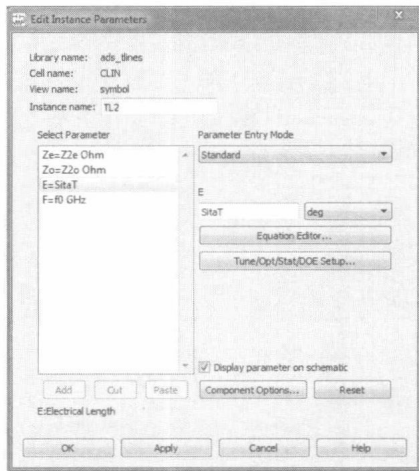


图 1.22 TL2 参数设置

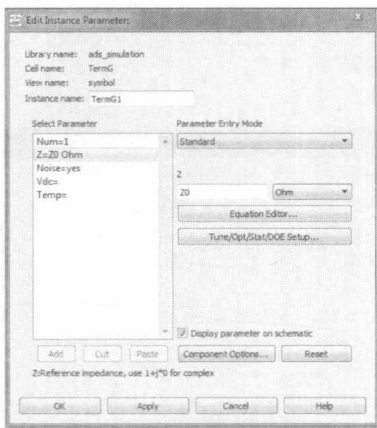


图 1.23 TermG1 参数设置

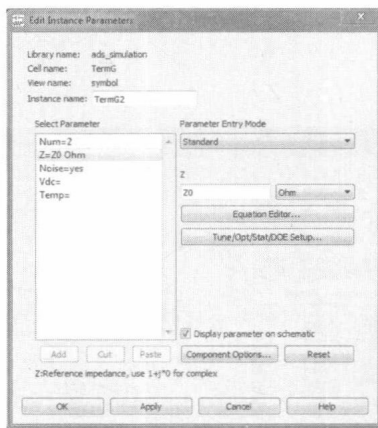


图 1.24 TermG2 参数设置

双击画图区的 S 参数仿真器  S-PARAMETERS，完成如图 1.25 所示的设置，其仿真频率范围为 0.01~4GHz，间隔取 0.01GHz。单击【OK】按钮，得到带有自由参数的带通滤波器仿真模型，如图 1.26 所示。

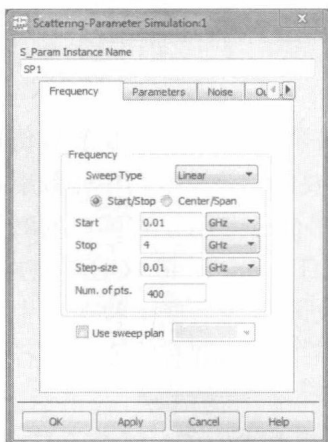


图 1.25 仿真频率范围参数设置

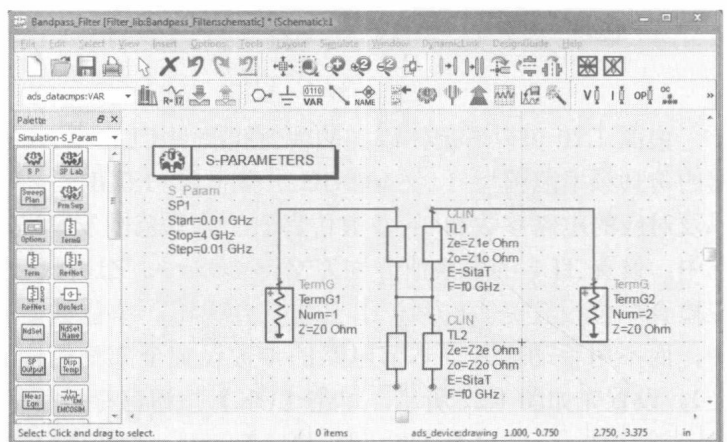




图 1.26 带自由参数的带通滤波器仿真模型



在工具栏中单击变量按钮 ，在原理图空白处单击鼠标左键添加变量控件 。双击该控件打开定义变量窗口，【Variable or Equation Entry Mode】默认是标准模式 Standard，我们可以在【Name】中输入变量的名字 Z1e，【Variable Value】中输入变量的值 123，单击【Apply】按钮，设置后的窗口如图 1.27 所示。如果我们单击【OK】按钮，则直接关闭该窗口。接下来依次设置其余的各个参数值（Z1o=67，Z2e=69，Z2o=40，Z0=50，SitaT=180，f0=2），如图 1.28 所示。在设置其余参数的时候，要单击【Add】按钮进行添加，如果单击【Apply】按钮则直接替换当前左侧参数列表中选中的变量；另外，在设置变量值的时候不需要添加单位，因为在模型中我们已经对各个变量的单位进行了定义。

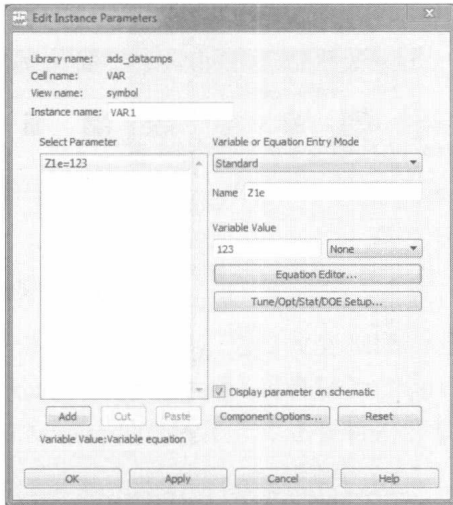


图 1.27 定义变量 Z1e

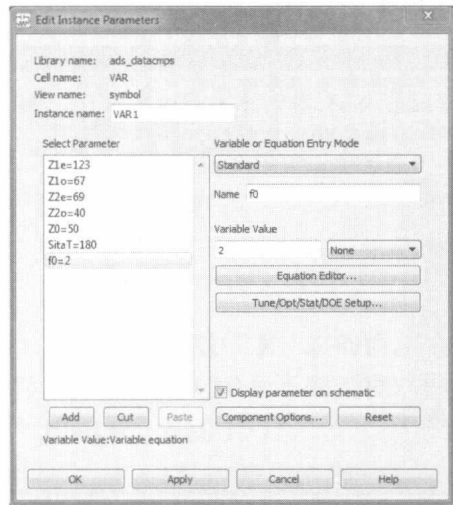


图 1.28 定义该电路所有的参数值

ADS 的变量控件提供了三种添加变量的方法（分别为 Name=Value、Standard 和 File Based），我们可以在【Variable or Equation Entry Mode】的下拉菜单中选择最适合的方法。下面我们介绍第二种方法，选择【Name=Value】模式，如图 1.29 所示，我们可以直接输入 Z1e=123，单击应用按钮【Apply】或者添加按钮【Add】即可。

定义完所有参数后单击【OK】按钮，最终的电路模型如图 1.30 所示。读者可以对比电路图的参数，详细检查所有参数是否设置正确。

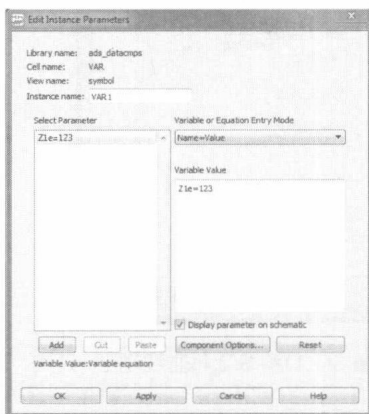


图 1.29 定义变量 Z1e 的第二种方法

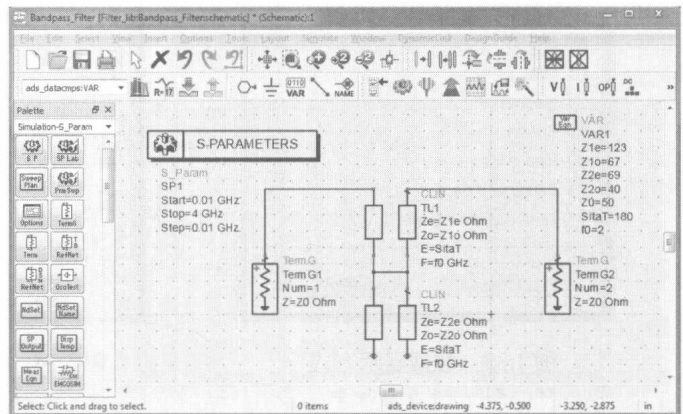


图 1.30 耦合线带通滤波器 S 参数仿真的整体模型