



卓越工程师培养计划

▪ EDA ▪

<http://www.phei.com.cn>

冯新宇 寇晓静 编著



ADS 射频电路

设计与仿真 入门及应用实例



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY



卓越工程师培养计划

▪ EDA ▪

<http://www.phei.com.cn>

冯新宇 寇晓静 编著



ADS 射频电路

设计与仿真 入门及应用实例

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书详细介绍了利用 ADS 软件进行射频器件及电路设计的方法。全书共计 17 章，分为 ADS 仿真入门篇、仿真基础篇和仿真应用实例篇三部分。通过大量射频工程领域的无源器件及有源电路的实例，系统而全面地介绍射频微波电路的基础理论和 ADS 设计方法。全书的主要内容包括射频和微波电路基础、ADS 软件仿真基本步骤、直流仿真和交流仿真、S 参数仿真、谐波平衡法仿真、集总参数和分布参数滤波器的设计、LDMOS 微波功率放大器的设计、射频振荡器的设计、功率分配器的设计、微带天线和振子天线的设计、ADS 系统级仿真等。

本书内容紧凑，结构严谨，实例丰富，无论是对于射频微波领域的初学者，还是有一定经验的工程技术人员，都是很好的辅助学习教材。本书既可以作为自学参考书，也可以作为高等学校电子信息、微波技术等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

ADS 射频电路设计与仿真入门及应用实例 / 冯新宇, 寇晓静编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.4
(卓越工程师培养计划)

ISBN 978-7-121-22919-0

I. ①A… II. ①冯… ②寇… III. ①射频电路—电路设计—计算机辅助设计—软件包 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 069274 号

策划编辑: 张 剑 (zhang@phei.com.cn)

责任编辑: 刘真平

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 北京天宇星印刷厂

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: 20.75 字数: 531.2 千字

印 次: 2014 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 59.00 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。

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。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

随着现代无线通信、航空航天、遥感遥测等技术的飞速发展，射频及微波器件和电路的应用越来越广泛，相关行业对射频电路设计工程师的需求也越来越多。任何射频产品的成功开发，很大程度上依赖于对射频电路的软件仿真，射频电路仿真不仅可以保证电路参数的正确性，而且可以大幅度地缩短产品的研发周期。美国 Agilent 公司开发的 ADS (Advanced Design System) 软件是当今微波电路和通信系统最流行的仿真工具，借助于 ADS 软件进行微波电路的开发，提高复杂电路的设计效率，已经成了广大射频工程师的必然选择。

本书从 ADS 软件工具的易学易用特点出发，侧重于软件在射频和微波电路设计方面的独特优势，帮助射频电路设计师更好地分析微波电路的性能，优化电路结构参数，分析通信系统的信号链路特性。ADS 软件的功能非常丰富，可以实现对模拟电路和数字电路、时域和频域、线性和非线性、信道噪声的分析，并且可以对设计的产品进行成品率分析与优化。小到单独元器件的仿真，大到系统仿真、数/模混合仿真，其强大的仿真功能和较高的准确性已经得到业界的普遍认可，成为射频领域最为流行的射频 EDA 软件。

本书重点结合应用实例介绍使用 ADS 进行射频电路和微波器件设计的方法。全书共 17 章，分为三篇。第 1~3 章为 ADS 仿真入门篇，内容包括射频电路和微波电路基础、ADS 软件初识和 ADS 仿真基本步骤。第 4~7 章为 ADS 仿真基础篇，内容包括直流仿真与交流仿真、S 参数仿真、谐波平衡法仿真和电路包络仿真。第 8~17 章为 ADS 仿真应用实例篇，内容包括集总参数滤波器设计与仿真、分布参数滤波器设计与仿真、低噪声放大器的设计与仿真、LDMOS 微波功率放大器的设计与仿真、射频振荡器的设计与仿真、混频器的设计与仿真、功率分配器的设计与仿真、微带天线的设计与仿真、振子天线的设计与仿真和 ADS2009 系统仿真。

本书侧重从工程应用角度出发，采用理论讲解与实例相结合的讲述方法，简明清晰、重点突出、层次分明。在叙述上力求深入浅出、通俗易懂。相信会为广大射频和微波领域读者的学习和工作带来一定的帮助。本书的应用实例全部来自于工程实践，具有很强的参考性和实用性。

本书面向的是电子信息和射频领域的学生及工程技术人员，既包括 ADS 软件的初级用户，也包括具有一定基础知识的射频电子线路设计爱好者，以及高等院校相关专业的大中专学生、研究生。

本书由冯新宇、寇晓静编著。参加本书编写的还有车向前、穆秀春、杨广学、王冲、边莉、乔文亮、管殿柱、李文秋、宋一兵、王献红、谈世哲、付本国和初航。

在本书的编写过程中，参考和引用了很多同类资料的相关内容和美国安捷伦公司、微波仿真论坛 (<http://bbs.rfeda.cn/>) 的技术资料，在此向这些资料的作者和安捷伦公司、微波仿真论坛的各位同仁致以深深的感谢。

由于编者水平有限，书中错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

目 录

ADS 仿真入门篇

第 1 章	射频电路和微波电路基础	2
1.1	射频技术的发展和趋势	2
1.2	射频电路和微波电路相关概念参数	3
1.2.1	射频电路及其参数	3
1.2.2	微波技术和微波电路	6
1.2.3	史密斯圆图	8
1.2.4	射频网络	12
1.2.5	微带线	14
1.3	射频和微波电路仿真设计工具	26
第 2 章	ADS 软件初识	30
2.1	ADS 软件功能描述	30
2.2	ADS 软件的安装过程	30
2.3	ADS2009 基本操作	33
2.3.1	ADS 原理图参数设置	33
2.3.2	ADS 工程的相关操作	38
2.3.3	ADS 设计相关操作	39
2.3.4	ADS 仿真相关操作	41
2.3.5	ADS 仿真结果显示和分析相关操作	41
2.3.6	ADS 输入/输出相关操作	41
2.4	ADS 的工作视窗	42
2.4.1	主窗口	42
2.4.2	原理图视窗	46
2.4.3	仿真状态视窗	49
2.4.4	数据显示视窗	49
2.5	ADS2009 元件	51
2.5.1	集总参数元件	51
2.5.2	分布参数元件	55
2.5.3	非线性元件	56
2.5.4	系统模型元件	56
2.5.5	信号源	57
2.6	本章习题	58
第 3 章	ADS 仿真基本步骤	59
3.1	新建工程与设计原理图	59

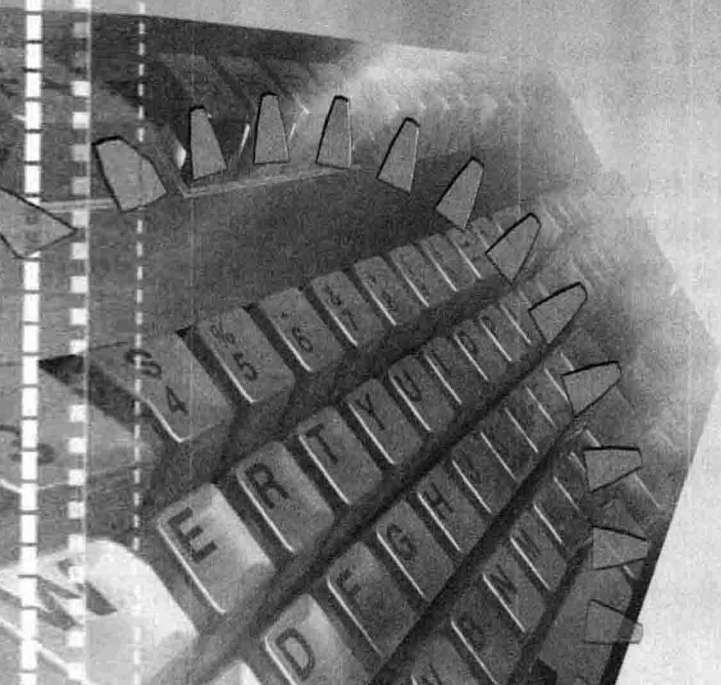


3.2	原理图仿真和结果显示	61
3.3	调谐和优化	64
3.4	设计向导	68
3.5	本章习题	74
ADS 仿真基础篇		
第 4 章	直流仿真与交流仿真	76
4.1	直流仿真	76
4.2	交流仿真	90
4.3	本章习题	104
第 5 章	S 参数仿真	106
5.1	S 参数仿真基本原理	106
5.2	S 参数仿真控制器和面板	107
5.3	S 参数仿真基本过程	112
5.4	S 参数仿真实例	112
5.4.1	基本 S 参数仿真	113
5.4.2	匹配电路设计	115
5.4.3	参数优化	121
5.4.4	噪声和增益	126
5.5	本章习题	128
第 6 章	谐波平衡法仿真	129
6.1	谐波平衡法仿真基本原理	129
6.2	谐波平衡法仿真控制器和面板	129
6.3	谐波平衡法仿真的基本步骤	135
6.4	谐波平衡法仿真实例	136
6.4.1	单音信号仿真	136
6.4.2	1dB 功率压缩点仿真	140
6.5	本章习题	143
第 7 章	电路包络仿真	144
7.1	电路包络仿真基本原理及功能	144
7.2	电路包络仿真控制器和仿真面板	145
7.3	电路包络仿真基本步骤	147
7.4	电路包络仿真实例	148
7.4.1	混频器包络仿真	148
7.4.2	运算放大器包络仿真	150
7.5	本章习题	155
ADS 仿真应用实例篇		
第 8 章	集总参数滤波器的设计与仿真	158
8.1	集总参数滤波器的基本原理	158

8.1.1	理想滤波器的四种基本类型	158
8.1.2	低通滤波器的响应	158
8.1.3	集总元件低通滤波器的构成	159
8.1.4	滤波器的变换	160
8.2	集总参数低通滤波器的仿真设计	161
8.2.1	集总参数低通滤波器设计向导	161
8.2.2	集总参数低通滤波器的仿真设计	164
8.3	集总参数带通滤波器的仿真设计	170
8.3.1	集总参数带通滤波器设计向导	170
8.3.2	集总参数带通滤波器的仿真设计	173
8.4	本章习题	176
第 9 章	分布参数滤波器的设计与仿真	177
9.1	分布参数低通滤波器的设计	177
9.1.1	分布参数低通滤波器的基本原理	177
9.1.2	微带线阶梯阻抗低通滤波器的设计	184
9.1.3	微带短截线低通滤波器的设计	191
9.2	分布参数带通滤波器的设计	197
9.2.1	分布参数带通滤波器的基本原理	197
9.2.2	平行耦合微带线带通滤波器的设计	201
9.2.3	微带夹夹式带通滤波器的设计	210
9.3	本章习题	216
第 10 章	低噪声放大器的设计与仿真	217
10.1	低噪声放大器的原理和特性参数	217
10.2	低噪声放大器的设计和仿真	221
10.3	本章习题	234
第 11 章	LDMOS 微波功率放大器的设计与仿真	235
11.1	微波功率放大器的原理和特性参数	235
11.2	LDMOS 微波功率放大器的设计	236
11.3	本章习题	241
第 12 章	射频振荡器的设计与仿真	242
12.1	射频振荡器的基本原理	242
12.2	晶体管振荡器的设计和仿真	243
12.3	压控振荡器的设计和仿真	247
12.4	本章习题	256
第 13 章	混频器的设计与仿真	257
13.1	混频器的工作原理	257
13.2	混频器的理论设计	259
13.3	混频器的 ADS 仿真	263
13.4	本章习题	269

第 14 章	功率分配器的设计与仿真	270
14.1	功率分配器的基本原理	270
14.2	功率分配器的设计向导	272
14.3	功率分配器的设计和仿真实例	276
14.4	本章习题	284
第 15 章	微带天线的设计与仿真	285
15.1	矩形微带天线的设计	287
15.2	本章习题	294
第 16 章	振子天线的设计与仿真	295
16.1	振子天线基本理论	295
16.2	振子天线的设计	296
16.3	本章习题	305
第 17 章	ADS2009 系统仿真	306
17.1	射频系统的理论基础	306
17.2	射频发射系统的设计和仿真	308
17.3	射频接收系统的设计和仿真	311
17.4	本章习题	321
参考文献		322

ADS 仿真入门篇



第 1 章 射频电路和微波电路基础



1.1 射频技术的发展和趋势

射频是一种频谱介于 75kHz~3 000GHz 之间的电波,当频谱范围介于 20Hz~20kHz 之间时,这种低频信号难以直接用天线发射,而是要利用无线电技术先经过转换、调制达到一定的高频范围,才可以借助无线电波传播。射频技术实质上是一种借助电磁波来传播信号的无线电技术。

无线电技术应用最早是从 18 世纪下半段开始的,随着应用领域的扩大,世界上已经对频谱进行了多次分段。最早是“二战”期间美国国防部进行划分的。当前,被广泛采用的频谱分段方式是由电气和电子工程师学会所规定的。随着科学技术的不断发展,射频所包含的频率也不断得以提高。到目前为止,经过了两个多世纪的发展,射频技术也已经在众多的领域得到了较为成熟的应用。特别是高频电路的应用,更是得到了行业内外的普遍关注。其中在通信领域,射频识别是进展最快的重要方面。

1. 在通信领域的应用

无线电通信已经从最初的模拟系统演变更新至第 3 代通信系统。在我国,移动通信方式主要有 GSM 系统、GSMIX 双模系统、CDMA 系统、3G 通信等,各占有相应的波段。

在 3G 通信时代,无线、数字等芯片变得越来越复杂,耗能变大,得以使双模甚至多模手机等技术不断成熟,在数据传输的速率上变得更高。同时,也增加了设备的复杂程度。按电路的功能区分,无线通信有三部分:

- ☺ 射频电路:这是射频的前端,是本质上的模拟电路,用于接收和发送信号;
- ☺ 中频电路:由锁相回路、频率合成器等不同的组件组成,用于对波频的再次升降,也可进行调制和解调;
- ☺ 基频电路:用于 A/D 和 D/A 的信号转换及处理。

为了节省系统资源,射频芯片向着高集成和低功耗的方向发展。特别是最近几年,这一行业的终端产品在竞争上越来越激烈,降低成本是企业的不懈追求,从而使芯片向着更加轻薄的方向发展,出现了集模拟和数字于一体的芯片产品,其设计更为巧妙,制造工艺也更加成熟。按照通信技术的最新标准和通信系统的要求,器件制造商正在研究新的材料,以使设计人员能够满足下一代系统的要求。材料研究的重点是材料合成、微型化以及多功能的射频元件。而系统设计和架构方面的研究进展则需要确保能在下一代通信系统中成功地使用这些器件。

2. 射频识别的发展和应用

射频识别通过射频方式,实现非接触式的双向信息数据的识别、交换和通信。目前,

这一技术已经有了广泛的应用。比如，超市、书店等商业机构的防盗报警、刷卡付款、打卡签到等系统都是以射频技术为核心的机器。射频识别主要应用在以下领域：

- ☺ 安全防护，如门禁、防盗、电子监控等；
- ☺ 物品的分发和销售，如车间生产线上毛坯或工件的分发或收集，自动化的仓储管理，条形码防伪、识别等；
- ☺ 用于数据的管理和统计，如在畜牧行业管理；
- ☺ 交通运输，如车辆自动收费、违章车辆的管理、集装箱的分类和识别等。

在不同的领域，射频技术有着不同的作用，但是，其组成和原理基本都非常相似。简单地说，射频系统一般由三部分组成：电子标签、阅读器和数据的转换与管理。目前，在国际上，统一的射频产品和使用标准还不成熟，每一个公司都是按照自身的需要和判断，购买或开发自己的识别设备，从而造成了识别设备的差别较大，影响了各公司之间的数据传递和共享。

在我国，电子标签射频技术已经有了一定的行业标准，国家标准委早就成立了“电子标签”标准工作小组，由科技、信息产业等部委联合一些专业的研究院，起草、制定了这方面的国家标准，为走向规范化和标准化打下基础。但我国的射频识别应用还处于初级阶段，物联网还没有广泛地普及和应用，随着社会的发展和信息技术的完善，射频技术的应用潜力应该是非常巨大的。

3. 其他方面的应用

射频技术在军事上也有广泛的用途，如导航、雷达监测、远程制导等技术都是在射频技术的基础上发展起来的。此外，射频技术也越来越多地被用于医疗行业，如核磁共振、射频消融等安全可靠的医疗技术和工具，使手术大大简化，同时也减轻了病人的痛苦。

最近几年，射频技术都保持了相对高速的发展势头，这一技术的应用也不断得到完善和成熟，相信在不久的将来，射频技术和产品也一定会更加丰富。



1.2 射频电路和微波电路相关概念参数

射频微波电路涉及知识点较多，本节主要从 ADS 软件使用较多的知识点进行说明，重点介绍射频电路的主要参数、微波技术和微波电路、史密斯圆图、射频网络以及微带线等基础知识。

1.2.1 射频电路及其参数

在各种各样的微波电路中，放大器是最具有代表性的，将作为重点对其进行介绍，而对于其他的电路，则只介绍其特殊的性能指标，同样的内容不再重复。

1. 放大器

图 1-1 所示为放大器框图。

- (1) 频率范围： $f_1 \sim f_2$ 。
- (2) 增益 (G): $G = P_{\text{out}} / P_{\text{in}}$ 。
- (3) 噪声系数 (N_F):

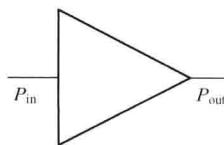


图 1-1 放大器框图

$$F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} = \frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S_i \cdot G}{N_o}} = \frac{N_o}{G \cdot N_i} = \frac{G \cdot N_i + N_x}{G \cdot N_i} = 1 + N'_x \quad (1-1)$$

式中, N_x 是出现在放大器的输出端, 由放大器内部产生的噪声。 $N_F = 10 \log F$, 所以, 噪声系数 N_F 就代表了放大器自身噪声贡献的大小。

(4) 输入、输出反射损耗及电压驻波比 (VSWR): 反射损耗 (LR) 是在输入信号保持不变的情况下, 从短路器反射的电压与从被测负载反射的电压值的比, 并用 dB 表示。

$$LR = 20 \log \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (1-2)$$

式中, ρ 为被测负载的反射系数, $\rho = 1/10^{\frac{LR}{20}}$ 。

$$VSWR = \frac{1+\rho}{1-\rho} \quad (1-3)$$

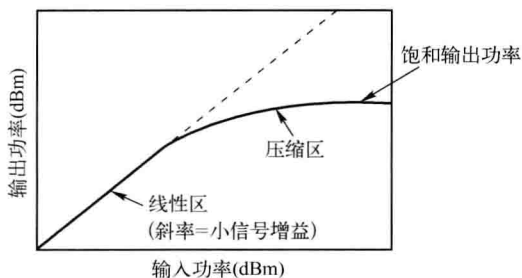


图 1-2 放大器输入/输出功率关系曲线

随着输入功率的增加, 当放大器的增益被压缩了 1dB 时的输出功率, 即为 1dB 压缩点输出功率。 P_{1dB} 是表示一个放大器的非线性特性和输出能力的一项重要指标。

(5) 1dB 压缩点输出功率 (P_{1dB}): 放大器输入/输出功率关系曲线如图 1-2 所示。

(6) 互调分量和交叉点: 如图 1-3 所示,

当频率为 f_1 和 f_2 的两个等幅信号同时加在放大器的输入端时, 由于放大器非线性的影响, 在输出端将出现互调失真的成分。其中 $f_2 \pm f_1$ 为二阶互调分量, 而 $2f_1 \pm f_2$ 为三阶互调分量。另外, 除非是对于宽带的电路, 一般不考虑二阶互调失真的影响。下面以三阶互调失真为例进行分析。

图 1-4 所示是基波分量和三阶互调分量 (IM_3) 与输入功率之间的关系曲线。将它们线性延长的交点, 即为三阶交叉点 (IP_3)。若 IP_3 已知, 那么就可以准确地预知三阶互调失真的大小。

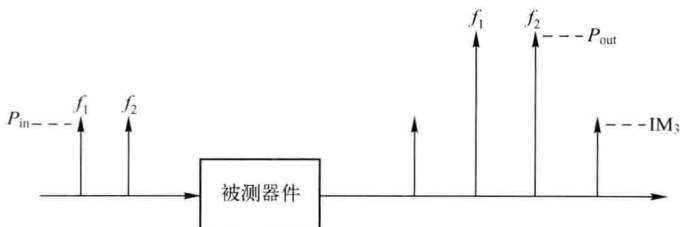


图 1-3 放大器互调失真示意图

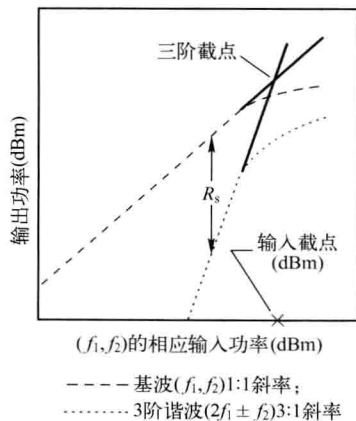


图 1-4 基波分量、三阶互调分量和三阶交叉点

$$IP_3 = P_{out} + \frac{P_{out} - IM_3}{2}$$

$$IM_3 = 3 \cdot P_{out} - 2 \cdot IP_3 \quad (1-4)$$

2. 混频器

杂波抑制：输出的有用信号的功率与杂波之间的差值。杂波抑制如图 1-5 所示。混频器如图 1-6 所示。

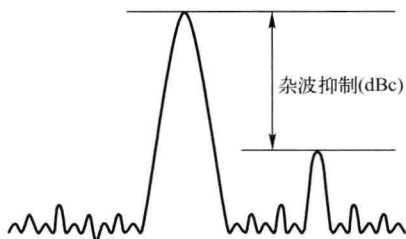


图 1-5 杂波抑制

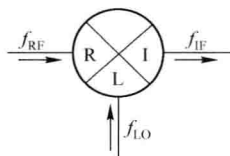


图 1-6 混频器

混频器可以进行下变频或上变频，其输出的有用信号分别为 $f_{IF} = |f_{RF} - f_{LO}|$ 或 $f_{RF} = f_{LO} + f_{IF}$ ，而实际上混频器所输出的频率成分为

$$f_{out} = |m \cdot f_{RF} \pm n \cdot f_{LO}| \quad (1-5)$$

其中除了有用的信号外，其他均为杂波，需要通过改进电路设计，适当增加本振功率等方法来提高混频器的动态范围，或者通过滤波器来抑制杂波。

3. 频率合成器（包括振荡器）

【频率范围】 频率范围是指频率合成器最低输出频率 f_{min} 和最高输出频率 f_{max} 之间的范围， f_{max} 与 f_{min} 之比称为覆盖系数，当覆盖系数大于 2~3 时，整个频段可以划分为几个频段。通常要求在规定的频率范围内，在任何指定的频率上，频率合成器都能工作，而且电性能都满足质量指标。

【频率分辨力】 因为频率合成器的输出频谱不是连续的，所以用频率分辨力来表征两个相邻频率之间的最小间隔，故也称频率间隔。不同用途的频率合成器对频率分辨力有不同的要求。

【频率转换时间】 频率转换时间是指频率合成器从一个频率转换到另一个频率并且达到稳定所需要的时间。常规通信通常要求低于几十毫秒，跳频通信则要求越短越好，最好达到微秒数量级。直接合成法与直接数字合成法的频率转换时间极短，在快速跳频系统中得到广泛应用，锁相合成法的频率转换时间相对比较长，大约为参考时钟周期的 25 倍，多用于慢速跳频系统。

【相位噪声】 相位噪声一般是指信号源中在各种随机噪声作用下引起的输出信号相位噪声的随机起伏或瞬时频率起伏，也就是常说的频率短期稳定度。而由于温度和老化等引起的频率慢漂移则称为频率长期稳定度。通常主要考虑的是频率短期稳定度问题。理想情况下，合成器的输出信号在频域中为一根单一的谱线，而实际情况下，由于相位噪声的存在，使波形发生畸变。在时域上表现为输出信号的频率（或相位）随时间作随机变化，在频域中其输出信号的谱线就不再是一条单根的谱线，而是以调制边带的形式连

续地分布在载波的两边，在主谱两边出现了一些附加的频谱，从而导致频谱的扩展，如图 1-7 所示。

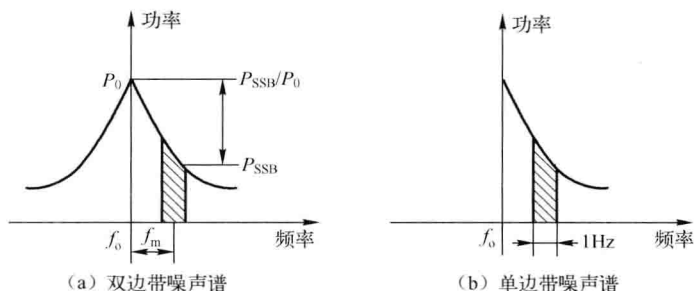


图 1-7 相位噪声边带

4. 滤波器

【带宽 W 或相对频宽 FBW 】微波滤波器是频率隔离器件，要求占用一定频段的有用信号通过，其他频段的无用信号得到足够的衰减，因此滤波器必须满足一定的带宽要求。

【通带插损 $IL (S_{21})$ 】在无线通信网络中，滤波器作为一个双端口元件，由于滤波器元件本身损耗和网络端口的不良匹配会造成一定的能量损耗，造成通带内有有用信号通过系统后信号失真或者引入过高的噪声，为了满足通信系统的要求，用通带插损 IL 来确定滤波器的损耗特性。

【带内驻波 $\rho (S_{11})$ 】滤波器的带内驻波反映的是滤波器输入、输出端口与外界阻抗匹配的程度。匹配越好驻波越小，反之，则不然。

【带外衰减】由于要阻止无用信号通过，因此带外衰减特性越大越好，一般取通带外与截止频率为一定比值的某点频率的衰减值作为此项指标。

1.2.2 微波技术和微波电路

微波是频率非常高的电磁波，就现代微波理论的研究和发展而论，微波是指频率从 300MHz~3 000GHz 的电磁波，其相应的波长为 1m~0.1mm，这段电磁频谱包括分米波（频率为 300~3 000MHz）、厘米波（频率为 3~30GHz）、毫米波（频率为 30~300GHz）和亚毫米波（频率为 300~3 000GHz）四个波段。

1. 微波的基本特点

【似光性和似声性】微波波段的波长和无线电设备的线长度及一般物体的尺寸相当或小得多，当微波辐射到这些物体上时，将产生显著的反射、折射，这和光的反射、折射一样。同时微波的传播特性也和几何光学相似，能够像光线一样直线传播和容易集中，即具有似光性。这样利用微波就能获得方向性极好、体积小的天线设备，用于接收地面上或宇宙空间中各种物体发射或反射的微弱信号，从而确定该物体的方向和距离，这就是雷达及导航技术的基础。

微波的波长与无线电设备尺寸相当的特点，使得微波又表现出与声波相似的特征，即具有似声性。例如，微波波导类似于声学中的传声筒，喇叭天线和缝隙天线类似于声学中的喇叭、箫和笛，微波谐振腔类似于声学中的共鸣腔。

【分析方法的独特性】由于微波的频率很高，波长很短，使得在低频电路中被忽略了一些现象和效应（如趋肤效应、辐射效应、相位滞后现象等）在微波波段不可以忽略。这样低频电路常用的集总参数元件电阻、电感、电容已不再适用，电压、电流在微波波段甚至失去了唯一性意义，因此用它们已经无法对微波传输系统进行完全描述，而要求建立一套新的能够描述这些现象的理论分析方法——电磁场理论的场与波传输的分析方法，用新的装置（如传输线、波导、谐振腔等）代替那些我们已经熟悉了电容、电感、电阻。

【共度性】电子真空管的渡越时间与微波振荡周期相当的这一特点称为共度性。共度性是给予微波电子学巨大影响的非常重要的物理因素。利用这种共度性可以做成各种微波电子真空器件，得到微波振荡源。而这种渡越效应在静电控制的电子管中是忽略不计的。

【穿透性】微波辐射介质物体时，能深入到该物体内部的特性称为穿透性。如微波是射频波谱中除光波外唯一能穿透电离层的电磁波，因而成为人类探测外层空间的重要手段，微波能穿透云雾、雨、植被、积雪和地表层，具有全天候和全天时工作的能力，成为遥感技术的重要手段；微波能穿透生物体，成为医学热透疗法的重要手段；毫米波还能穿透离子体，是远程导弹末端制导和航天器重返大气层时实现通信的重要手段。

【信息性】微波波段可载的信息容量是非常大的，即使是很小的相对带宽，其可用的频带也是非常宽的，可以达到数百甚至上千兆赫。所以现在多路通信系统，包括卫星通信系统，几乎都是工作在微波频段。此外，微波信号还可以提供相应信息、极化信息、多普勒频率信息，这在目标探测、遥感目标特征分析等应用中是十分重要的。

【非电离性】微波的量子能量不够大，因而不会改变物质分子的内部结构或破坏分子的化学键，所以微波和物质的作用是非电离的。由物理学可知，分子、原子和原子核在外加周期电磁场的作用下所呈现的共振现象都发生在微波范围，因此微波为探测物体的内部结构及其基本特性提供了有效的研究手段。

2. 微波技术的应用

微波技术是近代科学技术发展的重大成就之一，微波技术是在雷达、通信和其他科学等领域各个方面应用和实际需要的促进下发展起来的。其发展十分迅速，发展过程可以分为以下阶段：

第一阶段：1940年前，是实验早期研究阶段，主要研究微波的产生方法。

第二阶段：1940—1945年，是微波技术迅速发展并应用于实际的阶段，这个阶段正是第二次世界大战期间，在军事应用的迫切需要下，促进了微波技术的迅猛发展，在这一阶段内，大多数微波电子器件都应运而生，并采用了波导和空腔振荡器。

第三阶段：1945年至今，是微波技术广泛发展和应用阶段。在这一阶段，不仅开辟了新波段，而且扩展了应用范围，并逐步形成了一系列的科学领域，如微波波谱学、射电天文学、微波气象学等。同时建立了一整套微波电子学理论，为微波技术的进一步发展和提高打下了理论基础。

1965年以后，出现了微波固体器件，固体集成电路和同体平面电路使微波技术向着固体化和小型化的方向发展，微波技术的迅速发展和它的应用密切相关。其应用范围也愈加广泛。微波技术的发展至今已有60余年的历史。几十年来，微波的发展相当迅速，应用领域也相当广泛，新的领域更是层出不穷。

【微波通信】通信是微波技术的传统应用领域。最重要的应用之一就是多路通信。由于微波的频率很高，频带很宽，比短波频带宽好几十倍甚至数百倍左右，能够承载的信息量很大，因而用微波作为载波应用于多路通信、微波中波通信、散射通信、卫星通信、移动通信等领域。

【雷达应用】微波最早应用于雷达。正是由于第一次世界大战中人们把微波应用于雷达，才促使微波技术的迅猛发展。现在雷达仍然主要用于军事目的。这方面的雷达有预警雷达、舰载雷达、机载雷达等。除了军用雷达外，民用雷达发展也较快，如导航、气象、防盗、遥感雷达等。

【科学研究】在科学研究中，微波技术也有着重要应用。如原子钟的研制，就是微波技术的应用和发展的结果。微波应用在物理学、天文学、化学、医学、气象学等各个学科领域，如射电天文学、微波波谱学、量子电子学、微波生物学、微波化学、微波医学等。此外，如天文观察、电子直线加速器、等离子体参量测量、频谱分析以及遥感技术等方面都要用到微波。

【微波加热】在生产生活方面，微波被作为一种能源加以利用。利用微波加热物体，就是利用物体吸收微波产生的热效应进行加热的。微波加热的特点是：

- ☺ 对被加热的物体内外一起加热，瞬时可以达到高温。热损耗小、热能利用率高、节约热能。
- ☺ 介质材料的穿透深度要远比红外加热的穿透深度强，可达几十厘米。
- ☺ 微波加热的预热时间短，微波管预热 15s 就能工作。
- ☺ 均匀加热：常规加热为提高加热速度，就需要升高加热温度，容易产生外焦内生现象。微波加热时，物体各部位通常都能均匀渗透电磁波，产生热量，因此均匀性大大改善。
- ☺ 安全无害：在微波加热、干燥中，无废水、废气、废物产生，也无辐射遗留物存在，其微波泄漏也确保大大低于国家制定的安全标准，是一种十分安全无害的高新技术。

【微波杀菌】微波杀菌是利用了微波对细菌的热效应使其蛋白质产生变化，使细菌失去营养、繁殖和生存的条件而死亡。微波对细菌的生物效应是微波电场改变细胞膜的电位分布，影响细胞膜周围电子和离子浓度，从而改变细胞膜的通透性能，细菌因此营养不良，不能正常新陈代谢，细胞结构功能紊乱，生长发育受到抑制而死亡。

【其他领域】微波在医学、军事上也发挥着重要作用。微波可以对人体内的炎症、溃疡、肿瘤和其他病变产生抑制或治疗作用。微波武器的高能微波束可以干扰敌方人员的神经系统和大脑思维，可以灼伤人的眼睛和人体组织，可以引爆地方的炮弹、导弹甚至核武器等，可以干扰甚至摧毁地方的各种电子设备等。

1.2.3 史密斯圆图

分析天线的工作状态离不开计算阻抗、反射系数等参数，会遇到大量烦琐的复数运算，在计算机技术还未广泛应用的过去，图解法就是常用的手段之一。在天线和微波工程设计中，经常会用到各种图形曲线，它们既简便直观，又具有足够的准确度，即使在计算机技术广泛应用的今天，它们仍然对天线和微波工程设计有着重要的影响作用。Smith chart 就是其中最常用的一种。

在 Smith chart 中反射系数和阻抗一一对应; Smith chart 包含两部分, 一部分是阻抗 Smith 圆图 (Z-Smith chart), 它由等反射系数圆和阻抗圆图构成; 另外一部分是导纳 Smith 圆图 (Y-Smith chart), 它由等反射系数圆和导纳圆图构成; 它们共同构成 YZ-Smith chart。阻抗圆图又由电阻和电抗两部分构成, 导纳圆图由电导和电纳构成。

1. 等反射系数圆

在如图 1-8 所示的带负载的传输线电路图中, 由天线理论的知识可以得到负载处的反射系数 Γ_0 为

$$\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \Gamma_{0u} + j\Gamma_{0v} = |\Gamma_0| e^{j\theta_L} \quad (1-6)$$

式中, $\theta_L = \arctan\left(\frac{\Gamma_{0v}}{\Gamma_{0u}}\right)$ 。

在离负载距离为 z 处的反射系数 Γ 为

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} = \Gamma_u + j\Gamma_v = |\Gamma_0| e^{j\theta_L} e^{-j2\beta z} \quad (1-7)$$

式中, $|\Gamma_0| = \sqrt{\Gamma_u^2 + \Gamma_v^2}$, $\theta_L = \arctan\left(\frac{\Gamma_v}{\Gamma_u}\right)$ 。

当负载和传输线的特征阻抗确定下来之后, 传输线上不同位置处的反射系数值 ($|\Gamma| \leq 1$) 将不再改变, 而改变的只是反射系数的辐角。辐角的变化为 $-2\beta\Delta z$, 传输线上的位置向负载方向移动时, 辐角向逆时针方向转动; 向波源方向移动时, 辐角向顺时针方向转动, 等反射系数圆如图 1-9 所示。

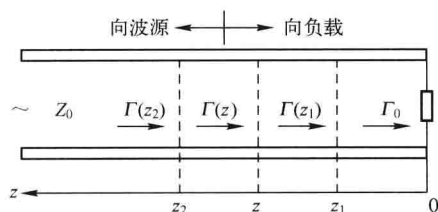


图 1-8 带负载的传输线电路图

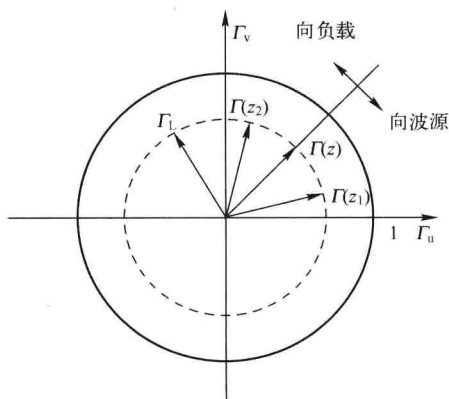


图 1-9 等反射系数圆

传输线上不同位置处的反射系数的辐角变化只与 $-2\beta z$ 有关, 其中传播常数 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_p}$, 所以 Γ 是一个周期为 $0.5\lambda_p$ 的周期性函数。

2. 阻抗圆图

根据传输线理论可以得到如下公式, 把阻抗写成反射系数的函数: