

The Essential Guide to RF and Wireless (Second Edition)

射频和无线技术入门 (第2版)

Carl J. Weisman 著

刘志华 徐红艳 李萍 译

冯玉珉 审

- + 概念、技术、器件和系统等，介绍无线通信系统的基本知识和关键技术
- + CDMA、GPS、宽带固定无线、无线因特网、蓝牙和智能天线等，帮助您理解最新无线通信技术革命
- + 极适合市场人员、投资商、技术作家、PR专家及其他非技术工程师

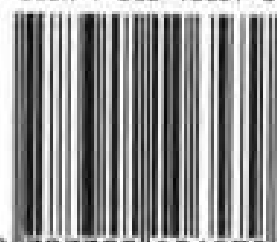


清华大学出版社

The Essential Guide to RF and Wireless (Second Edition)

作者Carl J. Weisman同RF器件和子系统销售链内的非技术人员有过广泛接触，并且为RF制造商的代理和发行商做过大量的销售培训。这些代理和发行商有Avnet/Penstock, Richardson Electronics, Sertek, TTI和Insight Electronics。现在他是为高技术公司提供市场通信、技术分析的顾问。

ISBN 7-302-10657-6



9 787302 106579 >

定价: 25.00 元

射频和无线技术入门 (第2版)

Carl J. Weisman 著

刘志华 徐红艳 李萍 译

冯玉琨 审

清华大学出版社

北京

Simplified Chinese edition copyright © 2004 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and TSINGHUA UNIVERSITY PRESS.

Original English language title from Proprietor's edition of the Work.

Original English language title: The Essential Guide to RF and Wireless, Second Edition by Carl J. Weisman, Copyright © 2002, 2000 by Prentice Hall PTR

EISBN: 0-13-035465-1

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall PTR.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macao).

本书中文简体翻译版由 Pearson Education 授权给清华大学出版社在中国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区)出版发行。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01 2002-3017

版权所有,翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

本书封面贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

射频和无线技术入门(第2版)/韦斯曼(Weisman, C. J.)著;刘志华等译. —北京:清华大学出版社,2005.6
书名原文: The Essential Guide to RF and Wireless (Second Edition)

ISBN 7-302-10657-6

I. 射… II. ①韦… ②刘… III. ①射频接转—通信技术 ②无线电通信—通信技术 IV. TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第020108号

出 版 者: 清华大学出版社
<http://www.tup.com.cn>
社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦
邮 编: 100084
客户服务: 010-62776969

责任编辑: 刘 彤

印 刷 者: 北京四季青印刷厂

装 订 者: 三河市春园印刷有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印张: 13.75 字数: 295千字

版 次: 2005年6月第1版 2005年6月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-10657-6/TN·239

印 数: 1~3000

定 价: 25.00元

译 者 序

近几年来,无线通信系统在世界范围内得到了迅速发展,并不断有新技术出现,主要在于射频硬件处理技术的不断发展。从第1代模拟蜂窝移动通信,到当前普遍使用的第2代数字蜂窝移动通信,再到以宽带、多媒体业务为标志的第3代移动通信,无论从用户数量、业务范围,还是从服务质量上都得到了长足的发展。迄今,我国移动用户已超过3亿,并与固话普及率并驾齐驱。

作为这方面的基础知识,Carl J. Weisman 以其多年的工作经验,用幽默诙谐的语言、简洁明了的篇幅书写了“The Essential Guide to RF and Wireless”(射频和无线技术入门)。本书简明地对无线通信中的基本概念、主要射频器件做了全面的介绍,并以数字移动电话为例,详细介绍了无线通信系统中的基本常识。

本书对基本射频硬件及无线通信系统从概念到工作原理上都有较为详细的介绍,并系统而具体地介绍了无线通信系统发展过程中所出现的关键技术及系统,如广播、雷达、点到点微波以及移动电话系统等;对无线通信中较新领域的关键技术也进行了简单介绍,如宽带固定无线通信、无线网络、移动 Internet 等。

由于本书内容以理解射频硬件和无线系统主要概念为主,因此,本书适合射频和无线通信初学者阅读,也可作为在射频和无线通信领域工作人员的自学参考书。

本书由通信专业高级工程师刘志华和优秀的研究生李萍、徐红艳女士翻译。本书中的电气图形符号保留了原书的形式。由于译者水平有限,难免会出现一些不妥,甚至错误,敬请通信界同仁和读者批评指正。

冯玉珉

2004年7月于北京

前 言

自从我写了第1版《射频和无线技术入门》以后,射频(RF)和无线领域发生了很多变化。实际上,很多技术已经出现很长时间了,只是在近两年才得到广泛应用。不可否认,我们的生活将随着正在经历的无线技术革命而发生变化。

这本书是为那些想了解这项神秘技术的实际工作情况,但没有好运气获得工程学学位的人而写。自始至终,本书最重要的目的是要简化射频电子学和无线技术,因此应用了类比、比喻和少量数学写作手法。为进一步解释内容,还包括很多图形和数字。不同于其他通信技术类的图书,本书语言清晰、明快、幽默诙谐。依我看来,一本有关RF的介绍性的书无论多么正确或有内涵,如果冗长而枯燥,通常读者连第1章也没兴趣读完。

《射频和无线技术入门》尽量用简单方法解释概念,在其指导下,本书想达到两个主要目标:提供射频器件和无线系统的概念理解,并给出行业中的主要术语。若事先没学习术语,很难理解像无线通信这么复杂的内容。

《射频和无线技术入门》主要面向那些对射频知识没有什么基础,但又需要或者很想了解的非技术人员。对于工作在RF领域的工程师,有很多是这个领域的非技术人员,他们从理解和交流RF中得到益处。他们包括非技术经理、销售主管、调度专家、制造商代表、销售人员、市场和通信人员、广告代理商、零售摊人员、招聘人员、金融分析人员和技术专家等。本书第1版在投资银行家和风险资本家中很畅销。

可以有三种方法使用本书。第一,将本书通读一遍,每一章都是以前一章为基础写的,并以基本概念和术语开头,以各种无线系统类型结尾。第二,若读者想快速掌握单个名词和概念,可只阅读部分内容。在不同章节中对有些名词进行了重复解释,比单个章节的描述更便于理解。第三,本书可作为参考书目。其中很多表、术语、附录都能使读者快速掌握无线行业中的术语、缩写和规范。

不论读者如何使用本书,如果是初次接触射频,建议读者先阅读第1部分的全部内容(第1、2章),它为本书其余部分奠定了概念基础。

第2部分(第3~5章)主要面向工作在射频和无线行业的人员,详细介绍了射频系统的基本技术。解释了所有用于制造射频硬件的重要功能模块,以及制造它们的不同方法。同时还讲述了关于调制的引人入胜的话题,这是进入无线世界的预备知识。

在第2版中,第2部分增加的新内容,包括智能天线和超导滤波器。第2版增加的其他新器件是移相器和相位检测器(和它们在相位调制中的角色)。同时相应地加入了相位调制的扩展讨论和形象描述。同时第2版新增加了一些当今使用的更新型半导体材料。

最后,第3部分(包括第6~8章)内容很有趣。这部分给读者几种无线系统一个总的看

法。第6章讨论一些已经出现一段时间的无线系统。这些系统中的大多数读者已经很熟悉,但很可能不了解它们的工作原理,新版的第6章包括GPS的扩展讨论及对卫星因特网传送的介绍。

第2版对第7章进行了重新修订,专门讨论移动电话。讨论了世界范围内选择的不同移动电话系统及它们的工作原理,并给出一般数字蜂窝电话框图。由于对未来移动电话很重要,第7章还专门用一节讨论了CDMA的工作过程。第7章还对未来移动电话进行了讨论。

第8章是第2版新增部分,讨论所有这些无线技术、系统和应用(它们在出版第1版时就已经出现了),包括宽带固定无线、无线互联和移动因特网接入的发展。还讨论了一些前沿无线技术、无线安全和健康问题。

感谢所有对第1版反馈信息的人,并希望得到更多补充性反馈内容,尤其希望得到一些批评性建议来改进第2版内容。

如果你愿意给本版反馈信息,请用电子邮件联系我: cjweisman@yahoo.com

目 录

第 1 部分 基本原理

第 1 章 基本概念	1
1.1 简介	1
1.2 词汇	2
1.2.1 词头	2
1.2.2 基本电子术语	2
1.3 射频基础	3
1.3.1 发射机和接收机	3
1.3.2 信号	4
第 2 章 射频行为	8
2.1 损耗和增益	8
2.1.1 器件	8
2.1.2 衰减	8
2.1.3 插入损耗	9
2.2 分贝	10
2.2.1 定义	10
2.2.2 分贝数学表达	10
2.3 带宽	12
2.4 宽带和窄带	13
2.5 环境中的射频	13
2.6 匹配	15
2.6.1 匹配的概念	15
2.6.2 不良匹配的结果	17

第 2 部分 射频硬件

第 3 章 基本系统器件	19
3.1 方框图	19

3.2	天线	20
3.2.1	方框图	20
3.2.2	天线特性	21
3.2.3	天线如何工作	23
3.2.4	天线性能	23
3.2.5	极化	25
3.2.6	天线维数	25
3.2.7	智能天线	26
3.3	放大器	27
3.3.1	方框图	27
3.3.2	放大器的基本属性	27
3.3.3	放大器如何工作	30
3.3.4	特殊放大器	31
3.4	滤波器	32
3.4.1	方框图	32
3.4.2	滤波器的功能	33
3.4.3	滤波器的类型	33
3.4.4	滤波器的性能	34
3.4.5	特殊滤波器	35
3.5	混频器	37
3.5.1	方框图	37
3.5.2	混频器的功能	37
3.5.3	混频器如何工作	38
3.5.4	混频器的配置	39
3.6	信源	40
3.6.1	方框图	40
3.6.2	振荡器如何工作	40
3.6.3	不同类型的振荡器	41
3.6.4	特殊振荡器 压控振荡器	42
3.6.5	合成器	43
3.7	快速回顾	43
3.7.1	发射机和接收机方框图	43
3.7.2	回顾	44

第 4 章 其他器件	46
4.1 开关	46
4.1.1 方框图	46
4.1.2 开关的功能和性能	47
4.1.3 开关的类型	47
4.1.4 系统应用	49
4.2 衰减器	50
4.2.1 方框图	50
4.2.2 衰减器的功能	50
4.2.3 衰减器的类型	50
4.3 分配器和组合器	53
4.3.1 方框图	53
4.3.2 分配器和组合器的功能	53
4.3.3 系统应用	54
4.4 耦合器	54
4.4.1 方框图	54
4.4.2 耦合器如何工作	54
4.4.3 耦合器的类型	55
4.5 循环器和隔离器	56
4.5.1 方框图	56
4.5.2 循环器如何工作	56
4.5.3 系统应用	57
4.5.4 隔离器	57
4.6 变换器	58
4.6.1 方框图	58
4.6.2 变换器的功能	59
4.7 检测器	60
4.7.1 方框图	60
4.7.2 检测器的功能	60
4.8 移相器	60
4.8.1 方框图	60
4.8.2 移相器的功能	61
4.9 相位检测器	62

4.10 器件回顾	62
第5章 电路和信号	63
5.1 半导体	63
5.1.1 材料和器件	63
5.1.2 二极管	65
5.1.3 晶体管	65
5.1.4 集成电路(MMIC)	67
5.2 电路技术	68
5.2.1 集总和分散电路	68
5.2.2 分立、混合和 MMIC 电路选择	69
5.2.3 组件	72
5.2.4 空穴	72
5.3 调制	73
5.3.1 调制的概念	73
5.3.2 调制的类型	73
5.3.3 调制器和解调器	78
5.4 传播	79
5.4.1 电缆	80
5.4.2 连接器	81
5.4.3 波导	84
5.4.4 电路迹线	84

第3部分 射频系统

第6章 传统技术	86
6.1 广播	87
6.1.1 广播的概念	87
6.1.2 频率的角色	88
6.1.3 调谐	90
6.1.4 电视传输	91
6.2 雷达	93
6.2.1 雷达的概念	93
6.2.2 雷达如何工作	95
6.2.3 各种雷达系统	97
6.3 卫星通信	99

6.3.1	为什么使用卫星	99
6.3.2	卫星如何工作	100
6.3.3	卫星系统	105
6.3.4	一种特殊的卫星系统 GPS	107
6.3.5	下一代卫星——LEO	110
6.3.6	互联网构建	112
6.4	点到点微波	115
6.4.1	点到点微波概念	115
6.4.2	点到点操作	116
第 7 章	移动电话	119
7.1	世界的选择	119
7.1.1	区别	119
7.1.2	世界范围的系统	120
7.2	蜂窝的概念	121
7.2.1	拓扑	121
7.2.2	基础结构	122
7.2.3	移动	123
7.2.4	增容	124
7.3	根本技术	125
7.3.1	频率复用	125
7.3.2	空中接口	127
7.3.3	蜂窝电话方框图	129
7.4	CDMA	131
7.4.1	扩频	131
7.4.2	信道	136
7.5	蜂窝发展	136
7.5.1	发展历程	136
7.5.2	通向 3G 的道路	138
第 8 章	无线新领域	142
8.1	宽带固定无线	143
8.1.1	无线本地环	143
8.1.2	空间链路传输技术	148
8.2	无线网络	151

8.2.1	局域网.....	151
8.2.2	个人局域网.....	155
8.2.3	家用网络.....	157
8.3	移动 Internet	159
8.3.1	技术.....	160
8.3.2	移动商务.....	161
8.4	前沿	162
8.4.1	技术展望.....	162
8.4.2	安全问题.....	166
8.4.3	关注健康.....	168
附录 A	术语表	170
附录 B	缩写词	189
附录 C	规范	202
参考书目		204
关于作者		205

第1部分 基本原理

第1章 基本概念

本章将介绍学习射频所需要了解的最基本词汇和概念。在学习读写之前,读者要先学习 ABC,本章就是学习射频的 ABC。这里可能会看到曾经在学校里学习过的一些术语,同时将会了解到一些不只与射频相关,而且在所有电子领域中使用的词,如瓦特、电路、赫兹等。当然,我们会透彻地解析射频的含义。

本章介绍的一个重要概念是方框图,它是射频硬件组成的图形描述。本章介绍了描述所有无线系统中的两个基本功能模块:发射机和接收机;同时讨论了电能量存在的两种模式,即两种类型的电信号:数字信号和模拟信号。

频率是理解射频的最重要的概念,在此也作了详细解释。最后,本章还突出了无线通信中的一个独特之处,即无线通信是两个不同形式电信号的结合:一个是存储信息,一个是承载信息。

1.1 简介

警告! 本书是非常复杂问题的一个超简化版本。阅读完本书,读者不会设计射频电路 也不应该会。但是,读者应该能够在行地谈论射频和无线概念,理解业内人士的行话,并能够很形象地了解正在发生的事情。

阅读本书的动力就是简单,也就是说,可以很容易地理解内在的量化概念。本书也采用很多比喻和类比手法来帮助读者理解概念,如果要在简单化和精确事实之间作个选择的话,本书宁愿选择简单化。这就如吃比萨一样,根本不必知道如何种西红柿;读者想了解射频,同样也没有必要非知道麦克斯韦方程式不可。

本书是为那些在射频和无线领域或相关行业工作的、没有获得技术学位的人士而写,读者不需要懂得电子、射频或任何其他神秘科学。为了努力达到该目的,整本书里,只在这里介绍一个公式,希望读者记住,即

$$B=M$$

这个等式的意思是,此书卖得越多,我赚的钱就越多。也就是说,读者可以尽管放松。

本书中“射频”和“无线”两个词交替使用,目的就是为了不显得太单一。无线主要是一个市场术语,用来描述一个新的射频应用子集,同时该应用还包括像蜂窝电话和寻呼等。本书经常用蜂窝电话来举例,帮助读者理解发生的事情。

有两件事请注意。第一,本书使用方框图来描述射频系统,如果还有其他方式,我也会选择;不幸的是,这是最简单的描述方法。方框图由直线连接特殊符号来系统地构成。某种意义上,方框图就像是一门外语,射频工程师们用它来交流在射频领域内所发生的事情。当读者阅读本书的时候,会理解基本的方框图。

第二,本书力求达到的另一个特点就是要生动有趣。

1.2 词汇

在真正开始阅读本书之前,有必要熟悉几个术语。第一个也是最为重要的就是 RF。RF 的字面意思是射频,不过,该词更常用于名词和形容词形式,例如射频(名词)或者射频信号(形容词)。射频也可以表示频率范围,后面还有更多描述。本书很快就会告诉读者,最好把射频认为是运动的电信号。

1.2.1 词头

接下来要知道的是 10 的多次幂的词头表示法,只有 4 种结果,如表 1-1 所示。

表 1-1 射频中有用的词头

词头	含义	举例	解 释
m(毫)	10^{-3}	5mW	0.005W
k(千)	10^3	3kg	3 000g
M(兆)	10^6	2MHz	2 000 000Hz
G(吉)	10^9	100G\$	比尔·盖茨的净资产

1.2.2 基本电子术语

表 1-1 引入了您需要了解的另外一个词: 瓦特(W)。瓦特是功率测量单位。如果读者不知道瓦特是什么,就想像一下摸着一个发烫的电灯泡。和功率相关的是能量(J),即功率乘以时间。如果 100W 的灯泡点 2 个小时,就等于 $200\text{W} \cdot \text{h}$ 能量。如果要想像一下能量是什么,就想像摸了两小时发烫的电灯泡。但请注意,在奇特的射频世界里,功率和能量两个词经常替换使用。

与功率和能量密切相关的两个词是电压和电流。电压就是一种电能势,它分两种:AC(交流)电压是墙上插座提供的电压类型;DC(直流)电压是电池所提供的电压类型。电流仅仅是电子的移动。与电压一样,电流也可以是交流或者直流。电压、电流和功率之间确切的关系很简单:电压乘以电流等于功率。

与电流、电压相关并经常使用的一个重要的词就是电路。电路就是电材料之间的互连,电路有时被加工在印刷电路板(PCB)上。如果读者曾经看过计算机、录像机或其他电子仪器的内部结构,就会看到PCB。其实它就是一块布满电子材料的硬而薄的塑料板。

偶尔还会见到的一个词是微波。它经常和射频混用,但更常见于描述频率范围。毫米波也常用于描述频率范围。

现在读者可能已经感觉到频率一词在射频世界里的重要性,这个词将在后面详细描述,但它的重要怎么强调都不为过。如果读者打算彻底了解射频,就一定要了解频率这个词。如果已经理解了频率是什么,那么你就成功了。如果你认为频率就是某事重复发生的程度,你是对的,接着往下看吧。

下面将用蜂窝电话来解释射频如何工作,因此还要熟悉一个词——基站。蜂窝基站由那些路边的蓝色或灰色的钢塔构成,它属于蜂窝运营商,用于蜂窝电话间的通信。

在射频世界里,所有术语都最终被它的缩写词代替,在解释了概念,并将缩写词标注在括号中以后,本书将交替使用这些概念和缩写词。这样就不需要阅读几百页的大部头了。但是不用担心,附录B提供了这些缩写词的说明,从而帮助读者理解。

1.3 射频基础

1.3.1 发射机和接收机

电能量以如下两种方式中的一种从一个地方转移到另一个地方,它或者像电流沿着导体流动(电子束沿着金属线移动),或者在空气中以不可见波传播。在一个典型的无线系统里,电能量开始时为电流沿导体流动,接着转为空气中传播的波,然后又转回电流沿导体流动(见图1-1)。

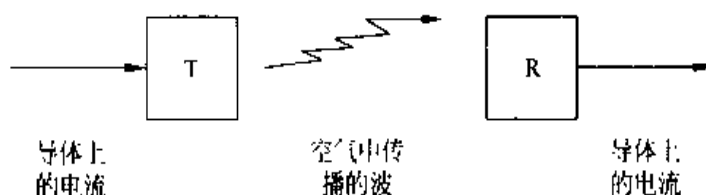


图 1-1 通用无线系统方框图

在图 1-1 中,电信号随电流在导体中移动(从左开始),进入标注为“T”的盒子内。盒子 T 就是发射机,它将电子电流转换成空气中的波。波以光速传播,再到达标注为“R”的盒子。盒子 R 就是接收机,它将波再转换成电子电流。

你知道吗?

有时射频工程师将发射机和接收机结合成一个功能单元,现在读者能想像到这个独特的产物叫什么吗?收发机。

1.3.2 信号

1. 模拟信号

如果使电能量强度(电流或波)随时间而变化就可以存储信息。当电能量以受控方式随时间变化时就称为信号。信号可分为两类:模拟和数字。读者如果学习过中学的三角学,可能还记得正弦波。冒着可能会激起你可怕回忆(不幸忘掉了)的风险,图 1-2 还是描述了一下正弦波。正弦波当从 A 点增长到 B 点达到最大值,在 C 点返回 0,接着在 D 点达到最小值,在 E 点又返回到 0 值。如此周而复始持续下去。

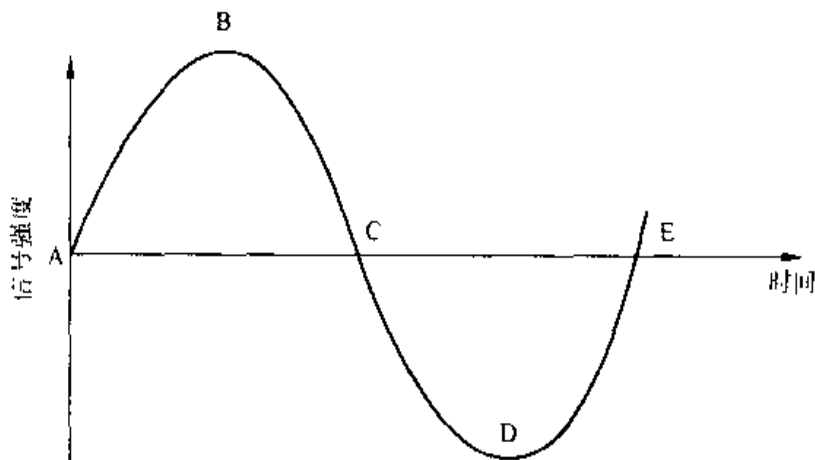


图 1-2 一个正弦波

正弦波是模拟信号的一个例子。不论是电流沿导线流动还是波在空气中传播,一个正弦信号强度的变化就是图 1-2 中所描述的那样。在射频世界里,信号强度通常都是以功率(W)来衡量。信号在 1 秒内完成一个完整正弦波(从 A 到 E)的次数就是信号的频率(以赫兹为单位,符号为 Hz)。如果读者觉得很难理解赫兹,那么每次听到赫兹一词就用“每秒周期数”替代。为理解这些信号上下振荡是多么快,举个例子,例如蜂窝电话中使用 900MHz 信号,也就是说在 1 秒内信号上下振荡了 9 亿次。以今天的标准来看,它还不算是一个非常高的频率。

2. 频率

正如前面所提及的,频率概念是理解射频的关键。因为射频所涉及到的事物都是与频率相关的,可以完全依据信号的不同频率将不同信号区别开。根据频率,可以将一个射频信号和另一个射频信号隔离,也可以区分不同的无线应用,表 1-2 包含了不同频率的电子和无线活动。读者可能还不全知道它们是什么,但从中可以观察出两件事情。首先,注意到其中包含了多少种和频率相关的应用——这只是一小部分例子。第二,请注意表的结构,并要意识到所有频率数量级的变化。

表 1-2 各种活动的频率

频率/Hz	应 用
60	电源插座
2 000	人的噪音
530 000	调幅广播
54 000 000	电视频道 2 (VHF)
88 000 000	调频广播
746 000 000	电视频道 60 (UHF)
824 000 000	蜂窝电话
1 850 000 000	PCS 电话
2 400 000 000	无线局域网
2 500 000 000	MMDS
4 200 000 000	大碟形卫星天线
9 000 000 000	机载雷达
11 700 000 000	小碟形卫星天线
28 000 000 000	LMDS
500 000 000 000 000	可见光
1 000 000 000 000 000 000	X-Files

表 1-3 用频率来表示前面介绍的一些术语的数量范围,虽不属于严格定义,但可以作为大致参考。

很显然,仅以一个数字来描述信号频率太简单了,所以早期的射频工程师决定使用字母来描述一定范围的频率,并称之为波段。更糟糕的是,当人们记住了这些波段后,技术又向

表 1-3 部分频率范围定义

术 语	频率范围/GHz
射频频率	< 1
微波频率	1~10
毫米波频率	>40

前发展,把这些彻底改变了。纯粹为了娱乐,在表 1-4 中给出了过去较为流行的波段定义。现在如果有人说卫星工作在“C-波段”,那么读者至少要明白它的信号频率范围是什么。

因此一个 3GHz 信号,可以称为 3GHz 信号、微波信号或者 S 波段信号。

表 1-4 部分频率波段(频带)的定义

波 段	频率范围/GHz
L-波段	1.0~2.0
S-波段	2.0~4.0
C-波段	4.0~8.0
X-波段	8.0~12.0
Ku 波段	12.0~18.0

你知道吗?

大约在 1889 年,一个名叫 Heinrich Hertz 的德国物理学家在他的实验室成功地产生了第一个空气传播的射频波。为了纪念他,射频工程师们将他的名字作为频率单位。我们实在很幸运,第一个产生射频波的人不叫 Heinrich Schmellingstonberger。

3. 数字信号

另一类电信号是数字信号,就是和计算机中使用的信号一样。不像模拟正弦波信号,模拟信号在它的高点和低点之间逐渐改变,数字信号是在两个值之间瞬间变化。实际应用中,数字信号在两个高、低电平之间没有其他值。如图 1-3 中所描述的就是数字信号,注意其中只有两个信号电平:高和低。数字信号可以以这种高和低的模式来描述信息,例如,一定模式的高和低电平可以表示蜂窝电话上的声音。

数字信号是用来表示信息的,而不用来承载空气中传播的信息。只有模拟信号(正弦波)可以“在它们的背上”承载信息。这些模拟载波信号可以承载模拟或数字的信息信号。将信息信号承载到载波信号上的过程称为调制,后面将会讨论。信息信号和载波信号结合的结果就是无线通信,做承载工作的模拟信号称为射频或载波。举例来说,第一代移动电话就是一个模拟无线通信应用,第二代移动电话——个人通信服务(PCS)就是一个数字无线通信应用,它们都使用射频来承载不同格式的信息。

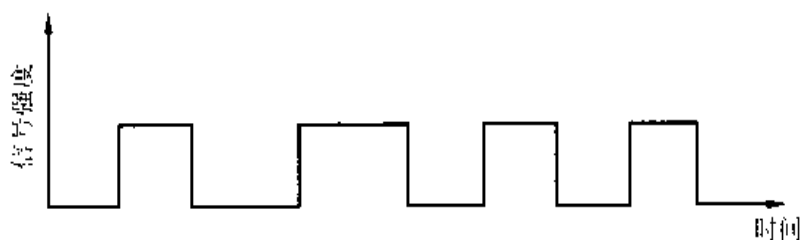


图 1-3 一个数字信号

你知道吗?

当发射机连续工作时,不断地发出射频信号,这个射频信号就叫做连续波射频信号。后面将学到,有的无线应用中发射机不停地快速开和关,这样发出的射频波是不连续的。读者可能想当然地会认为这种射频信号该称为“断续”波射频信号,实际上不是。射频工程师称这种射频信号为脉冲射频信号。

读者可能很想知道哪一种通信方式更好——是模拟还是数字无线通信?简单地说,要视情况而定,因为它们各有优缺点。但有两点是一定的。第一,数字无线通信是一种更新的技术,大多数老的无线系统都是模拟的。第二,数字无线通信可以无缝地和其他数字应用系统进行互操作,如计算机。基于这个原因,可以肯定地认为很多将要出现的新的无线通信系统将是数字的。

第2章 射频行为

本章描述射频能量的行为,它或者是电路中的一个信号或者是空气中的波。影响射频能量的两个基本概念是:损耗和增益。射频能量在传播过程中会发生变化:变大、变小或失真。有时这些变化是有意产生的,有时只是射频世界中多余的东西。

这里还会了解到如何将频率概念拓宽来描述射频领域里的一个非常重要的参数:带宽。任何射频事物的性能都与它的带宽有关。带宽还可以用来定义一个射频应用的边界。所有的无线应用都受限于预定义的频率边界。在美国,这些边界由通信委员会(FCC)来决定,委员会不仅有权选择每个带宽的精确频率和应用,而且有责任强制执行,以确保不会发生滥用频率或者发射非法射频信号的行为。

本章中,吸收和反射概念是用来描述当射频波遇到实心物体时所发生的行为。这种行为对一些应用系统可能产生有害影响,而有些应用却要依赖于此行为。

最后,本章将介绍一个有趣的术语——匹配,以及它的两种度量方法——VSWR 和回波损耗。

2.1 损耗和增益

2.1.1 器件

电信号以电流形式存在于发射机或接收机中,它沿着某些导体流动,在此过程中,会遇到很多不同的叫做器件或元件的物体。表面上,有数百种不同元器件存在,但所有元器件都可归为有源的和无源的两类。区别很简单,需要供电装置才能正常工作的叫有源器件,反之叫无源器件。

所有器件(有源和无源)都或者显示损耗特性,或者显示增益特性。如果出来的信号大于进去的信号,表明该器件有增益,这样的器件叫做放大器。所有放大器都是有源器件(即它们都需要电源)。如若不相信,把你手机里的电池取出来再打个电话试试,在手机里,电池就和若干个放大器连接着。

2.1.2 衰减

如果出来的信号小于进去的信号,表明该器件有损耗。任何信号通过一个器件表现出

损耗现象时可称为经历衰减或被衰减。

有很多具有损耗的器件,一些是无源的,一些是有源的。读者可能想知道(也可能不想),当一个大的射频信号进去,变成一个小的射频信号出来,那么剩下的那部分没出来的信号呢?它转变成了热能。表现出损耗现象的器件将变暖,损耗越多,就越热,甚至熔化。这就是为什么无源器件中对功率的处理能力是非常重要的。

图2-1是一个增益和损耗的图示。左边信号通过一个有源器件后经历增益,信号(正弦波表示)被放大。如果信号变大,这个器件叫什么?给你一个提示,字母“a”开始,以“mplifier”结束(放大器)。右边信号经历损耗,输出信号比输入信号小。如果信号变小,这个设备叫什么?后面还会讨论它。

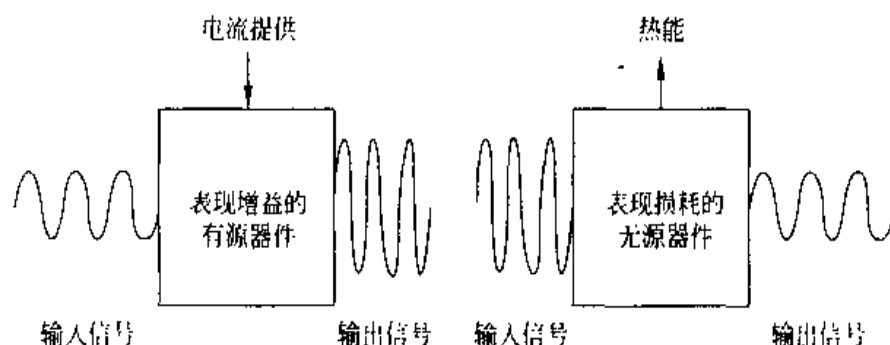


图 2-1 表现增益和损耗的器件

如果放大器输出的信号是输入信号的10倍,则该放大器的增益为10。如果有两个这样的放大器串接,增益结果将是100(而不是20)。即信号放大10倍后,再放大10倍,最后的信号将是原始信号的100倍。这是简单的乘法(见图2-2)。

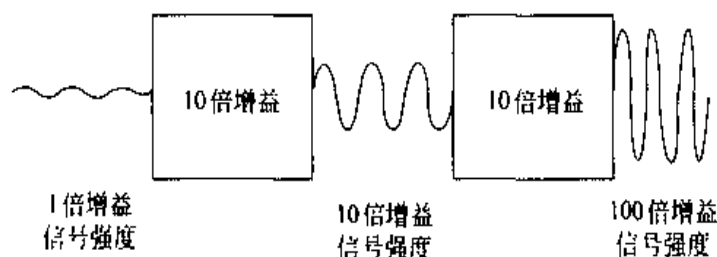


图 2-2 多级增益的结果

2.1.3 插入损耗

无源器件表现出和有源器件正好相反的行为。如果从一个无源器件出来的信号是进入信号的1/100,那么该器件的损耗为100,将输入信号除以100得到输出信号的幅度。如果输入信号为100W,经历损耗为100,输出信号将为1W。射频工程师称信号通过一个无源器件所经历的损耗为插入损耗。

你知道吗?

由于它们的散热特性,大多数无源射频器件被列为热阻抗。一个器件的热阻抗仅是,在给定输入功率后,所能产生多少热量的度量。热阻抗的度量单位是摄氏度每瓦($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)。

2.2 分贝

2.2.1 定义

如果没有出现数学家,那么故事发展到这儿,你将是损耗和增益方面的专家了。不幸的是,发射机所发射的信号可能会是到达接收机信号的十亿倍,乘或除这么大的一个数字是很难把握的。所以数学家提出了一个用小数表示大数字的方法,使用加法和减法来代替乘法和除法。他们把这称为对数(或者,就像有些人亲切地称它们为那些代数里没人能理解的讨厌的小东西)。在惊慌地要丢掉本书之前,请相信我,对数真的很简单。

在射频当中,只需要知道有关对数的两样东西。其一,对数是两个值的比值;其二,该比值的单位为分贝(就像某些家伙的姓 Bel 一样)。分贝也常写成 dB。如果你们当中有受虐倾向,就请记住下面 dB 的定义吧:

$$10 \times \lg (\text{输出功率} / \text{输入功率})$$

2.2.2 分贝数学表达

正如上面所提及的,如果放大器的输出信号是输入信号的 100 倍,那么该放大器的增益为 100。或者使用上面介绍的公式,这个放大器的增益为 20dB。在你转身要去找中学时代的计算器之前,让我简单地告诉你,只需要两种 dB 转换。记住:

+3dB 指的是两倍大(乘以 2)

+10dB 指的是 10 倍大(乘以 10)

这里还有两个结论(还记得几何学吗?)必须知道。第一,如果数字变小,dB 值将是负值:

-3dB 指的是减小到 1/2 (除以 2)

-10dB 指的是减小到 1/10 (除以 10)

第二,dB 只能进行加或减,不能乘或除。这样,就已完全掌握必须要了解的对数和分贝了。现在给一个简单的例子,见例 2-1。

例 2-1 简单的分贝转换。

如果信号经历的增益为4 000(变大4 000倍),那么增益为多少dB?

最好将4 000分成如下的最小因数:

$$4\,000 = 10 \times 10 \times 10 \times 2 \times 2$$

现在可以将这些因数替换成简单的dB加法(根据已经知道的两个值)。

$$4\,000 = 10\text{dB} + 10\text{dB} + 10\text{dB} + 3\text{dB} + 3\text{dB} = 36\text{dB}$$

4 000增益等效于36dB增益。如果4 000增益变成4 000损耗又会是什么结果呢?这很简单。4 000损耗相当于-36dB。如果是5 000增益呢?如何利用已经知道的两个值呢?请发挥创造力。

$$5\,000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \div 2$$

$$5\,000 = 10\text{dB} + 10\text{dB} + 10\text{dB} + 10\text{dB} - 3\text{dB} = 37\text{dB}$$

如果增益为6 000呢?它不能完全转化为2和10的乘除怎么办呢?用近似法。由上可知,4 000增益为36dB,那么8 000增益为39dB,既然6 000正好在4 000和8 000中间,可以取36dB和39dB之间的一个数(37.5dB)作为近似值,其实较为确切的值为37.78dB,但这两个值很近似。现在你可以算得上是专家了。

既然已经知道了如何转换,就可以忘记它了,因为不再需要它了。射频世界里只处理dB,所需要做的是,进行加加减减就足够了。

注意:

当器件表现出损耗特性时,可能会说有“6dB的损耗”,必须知道它等效于-6dB的变化,而不是说有“-6dB的损耗”。

假设如图2-3所示,A端一个电信号进入器件1,损耗2dB,接着进入器件2,增益30dB,再进入器件3和4,损耗分别为7dB和1dB,那么B端信号相对于A端信号会是多少?最后表现为增益还是损耗呢?现在可能还不很熟悉,我会引导你分析,但将来要读者自己来分析。

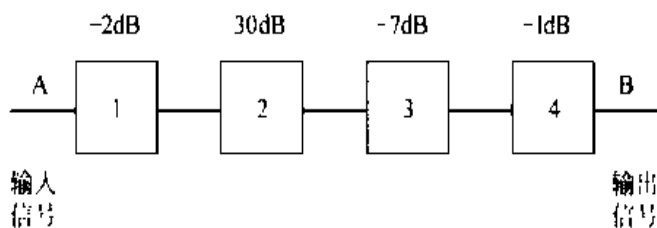


图 2-3 分贝计算

A端信号减2dB,加30dB,减7dB,减1dB就等于B端信号。所以,A端信号加20dB后就等于B端信号。既然是20dB加在了A端信号上,也就是说A端信号到达B端变大了,表现为增益。所以,B端信号比A端信号大20dB(或100倍)。如果理解了该解释,祝贺你,你已经掌握了射频的关键要素。

但是为了确保已经真正理解,请读者参考图2-4,计算一下B端信号相对于A端信号的大小。

答案是一10dB(原信号的1/10)。值得注意的一件有趣的事情是,在图2-3和图2-4中连接元器件间的线也有损耗。大多数情况下,这些线上的损耗相对于实际器件中的损耗是

很微小的,所以可以忽略。但应该意识到,当系统中一点的信号比另一点信号小 10dB 时,可称小信号是大信号“降 10dB”后的信号。

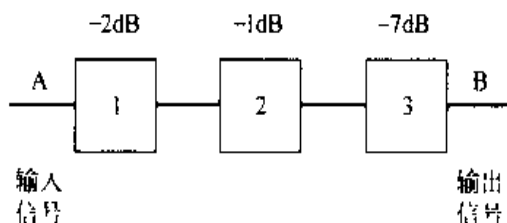


图 2-4 分贝测试

你知道吗?

也许射频中最著名的表达是术语“降 3dB”。若认为信号是一个参考信号的“降 3dB”,就意味着它是参考信号的 $1/2$ 。有时,射频工程师开玩笑地说,“我需要我的体重降 3dB。”听起来很有趣,不是吗?

2.3 带宽

也许在射频世界里没有比带宽更常用的词了。既然知道频率是什么了,理解带宽也不会很困难。**带宽是描述频率范围的方法,它等于器件或应用中最高频率和最低频率的差值,**所以需要两个频率值来定义带宽。例如,如果一个特殊器件能容纳从 75MHz 到 125MHz 之间的所有频率,那么它的带宽就是 50MHz($125\text{MHz} - 75\text{MHz}$)。

有时带宽也用百分比来表达,它等于实际带宽除以上下频率的平均值。见例 2-2 所描述。

例 2-2 计算百分比带宽。

如果设备能容纳从 75MHz 到 125MHz 之间的所有频率,它的百分比带宽是多少?

首先,计算实际带宽。本例中实际带宽为 50MHz($125\text{MHz} - 75\text{MHz}$)。

接下来,计算两个频率的平均值。本例中,平均值为 100MHz($(125\text{MHz} + 75\text{MHz}) \div 2$)。

最后,用实际带宽除以平均值,再乘 100%:

$$50\text{MHz} \div 100\text{MHz} \times 100\% = 50\%$$

工作在 75MHz 到 125MHz 的设备有 50% 的带宽。

在后面章节中还可以学到,带宽和数据承载能力(数据速率)有直接关系。无线系统的带宽越宽(即频率范围越大),在一定时间内所承载的数据就越多,所以数据速率就越高。

倍频和十倍频

带宽的另外两个术语就是:倍频和十倍频。倍频和十倍频来源于对数算法,其中倍频指 2 倍大,十倍频指 10 倍大。如果器件的上边频是下边频的 2 倍大,那么器件具有倍频带

宽。例如,器件工作在 100MHz 到 200MHz 之间就具有倍频带宽。同样,设备的下边频为 1.2GHz,上边频为 2.4GHz,结果也相同。真正混淆的是,如果器件的下边频是 100MHz,上边频是 400MHz,那么器件具有两个倍频带宽。设备带宽大于一个倍频的都叫做多倍频带宽。

如果器件的上边频 10 倍于下边频,那么可以说器件具有十倍频带宽。举一个十倍频带宽的例子:器件工作于 100MHz 到 1 000MHz(1GHz)之间。

2.4 宽带和窄带

为什么宽带和窄带很重要呢?因为所有射频器件都可以归为两类:窄带(窄的带宽)或者宽带(宽的带宽)。窄带和宽带的区分没有严格规定,所以我决定,如果设备带宽小于 50%就是窄带,大于 50%就是宽带。

好了。接下来会有什么结果呢?器件的带宽越宽,所容纳的频率越多,但是它的成本就越高,操作性能就越差。例如,一个窄带无源器件可能有 1dB 的插入损耗(好),而同样的宽带无源器件的插入损耗可能会是 3dB~4dB(坏)。设计射频电路时,在容纳所有要求的频率情况下,要尽量使用带宽最窄的器件。例如,移动电话通信时,从手机终端到基站,频率覆盖范围为 824MHz~849MHz,最明智的设计就是正好容纳这个频率范围,不要包含更多的频率。

说一个有趣的事情(如果你实在很无聊了),窄带和宽带器件的制造过程完全不同,这也就说明了为什么在射频行业里,有些公司专门生产窄带产品,有些专门生产宽带产品。

你知道吗?

今天,当射频工程师想要说一些最新的行话时,通常会将带宽说成“管道”。他们会说,“如果我们希望更快地传送数据,我们需要一个更大的管道”。他们的意思是,如果想要传送数据更快,需要一个更宽的带宽。

2.5 环境中的射频

信号行为

1. 趋肤效应

读者已经知道了,射频信号不是存在于导体中,就是以波的形式存在于空气中。当射频信号存在于导体,即任何金属上时,它只是挂在金属物体表面。给一个砖头形状的实心金属拍照,如果射频信号放在该砖头上,那么它只出现在该砖头的表面,不会冒险进入里面。如

果可以将一个检测器放在砖头里面,它将检测不到射频信号的存在。射频信号所呈现的这种行为称为趋肤效应,这是不言自明的。

如果读者有一个电子工程专业学位的话,趋肤效应发生的原因很容易理解。但是本书的前提是假设你没有任何电子工程学位,或者说你是一个有很多空闲时间的工程师,给你解释一下。射频信号天性喜欢逃离实心物体,在空中遨游,但是由于某些原因,这些原因以后会解释,它们不可能总能达到目的;所以接下来,这些不安分的射频信号所能做的最好的事情就是尽可能地靠近实心物体外层,希望终有一天会逃出去到达真正的目的地:被从外星球来的异族检测到。

2. 自由空间损耗

一旦射频信号逃离导体边界,飞翔在空气中,它们将经受所谓的自由空间损耗。为帮助了解,请想像一个带有喷头的浇花软管,水从喷头流出后开始扩散。如果将食指和拇指搭成一个圈放在喷头跟前,几乎所有的水都可以从圈中通过。但当这个圈离开喷头,部分水就不会从圈中通过,实质上,所有的水仍然在那里,只不过喷洒的范围更大了。把这个圈想像成一个接收机,离得越远,所接收的水(信号)就越少。所以对于接收机来说,类似于从喷头(发射机)流出的信号,接收到的信号丢失了部分能量。

忽略其他,接收机离发射机越远,所接收到的信号就越小,原因就是自由空间损耗。现在从浇花软管类推,这次不用拇指食指构成圈,而用一个方形的框,假设每边1m,像前面所说的,当方框离发射机越来越远时,通过它的射频能量就越来越少,这次通过它的射频能量是有意义的,该值的单位是瓦特每平方米(或者有时为微瓦每平方米),称为功率密度。功率密度是空气中传播的信号强度的度量,射频领域内会经常用到它。

3. 吸收

如果自由空间损耗值不太大,几乎射频信号在空气中传播所遇到的任何东西,都会使射频信号发生一定形式的变化。这些变化归为两种:或者变得更小,或者改变传播方向。

射频所遇到的大部分事物都是使射频信号变得更小,包括我们所呼吸的空气、雨、玻璃、木头,甚至植物。我们可以把这些事物看成具有一定插入损耗的某种类型的无源器件(当然,以dB表示),这些事物所表现出来的插入损耗称为吸收,因为它们吸收射频信号。

吸收的一个很好的例子就是雨对家庭卫星电视的影响,它主要在Ku波段。很凑巧的是,承载家庭卫星电视的射频信号大小正好接近于平均雨滴的大小,这是吸收的理想条件。当天气良好,信号对于接收机来说只有自由空间损耗。但当下雨时,一些信号会被雨滴吸收,到达屋顶小碟形卫星天线的信号就很少。如果雨很大,很有可能发生严重的吸收而导致信号消失,令卫星电视服务质量很差。这种情况不是因为服务提供商插播广告造成的,应该意识到这种情况的存在。

若射频信号穿过暴风雨经历损耗,损失的能量到哪里去了?变成热量了!无论相信与否,实际上雨会变暖。当然它的温度变化很小,很难测量得到,更别说取出温度计前,交织的雨滴可能早就不见了。现在提一个价值 64 000 美元的问题。什么时候移动电话会有更大的呼叫范围,晴天还是雨天?请读者自己回答。

你知道吗?

吸收正好解释了微波炉是如何工作的。微波炉内辐射水容易吸收的某个频率的射频信号。当射频信号遇到水时,信号变得越来越小,水就变得越来越热。这就是为什么没有水的东西在微波炉里无法变热的原因。

4. 反射

不是所有东西遇到射频波后都要吸收射频能量。有些东西遇到射频后会改变射频信号的方向,这种方向的改变叫做反射。大致上,射频信号会以遇到物体时相同的角度反射回去(见图 2-5)。

很多物体至少会将部分射频信号反射。反射值与两个因素有关:射频频率和物体的材料。有些材料只是以一定程度反射射频信号,如混凝土。而其他材料会发生完全反射,如金属。对于只是部分反射射频波的材料,剩下的信号会怎样呢?我会给你一个提示,返回去看看吸收。现在该知道答案了,当射频信号遇到这种材料时,射频能量或者被完全吸收(如水),或者被部分吸收部分反射(如混凝土),或者完全反射(如金属)。祝贺你,现在你已经理解了射频行为。

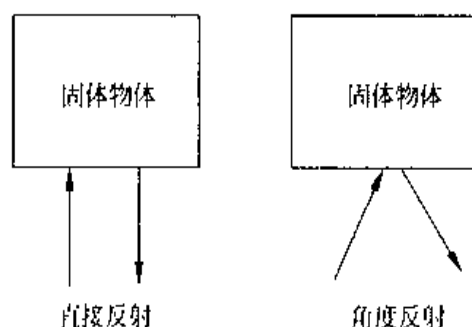


图 2-5 直接反射和角度反射

2.6 匹配

2.6.1 匹配的概念

1. 50 欧姆的含义

在射频信号进入空气之前,会在导体或器件内游荡。每个器件都有一个入口或出口,或两者都有。很容易将导体和器件看成花园软管系统的一部分,射频信号就像水一样在里面流动,如果射频信号穿过导体进入一个器件,导体(花园软管)和器件(喷头)之间要有连接。这似乎简单。

因为工程师操纵着射频世界,没有两个花园软管大小完全一样。所以无论什么导体和什么器件连接,部分射频信号(水)还是会泄漏(这毫不奇怪)。为了方便,射频世界的工程师们将软管大小标准化,并都同意使用它们。这样,一个公司生产的导体(或器件)就可以和另一个公司生产的器件协同工作,只有很小的泄漏发生。如果正在谈论的是软管,标准化的尺寸可能是“直径 0.5in”(1in=0.025 4m),既然在谈论射频,它的标准尺寸是 50 欧姆(Ω)。欧姆(以某个著名的工程师名命名)是阻抗的度量单位,它描述射频信号(水)通过导体(软管)的困难程度。任何物体的阻抗都以它的物理尺寸和材料类型来规定。很自然,一个小口径软管的阻抗比一个大口径软管的阻抗高。

读者会问为什么是 50 Ω 呢?我所能告诉的是,第二次世界大战期间,军队需要连接一些碰巧是 50 Ω 阻抗的天线(后面讨论)。结果,他们开发了一些 50 Ω 的电缆(第 5 章讨论),后来称为 RG 58。一旦他们有了这些电缆,其他所需要连接的东西都只能是适从这 50 Ω 了。

50 Ω 是最佳的吗?不是的。就说电缆吧,75 Ω 的性能更佳(即衰减更小)。因为它是近期开发的,75 Ω 是用于有线电视中的阻抗。相应地,现在有两种阻抗标准:射频用 50 Ω 和视频用 75 Ω 。当两个领域要互连该怎么办呢?对于低功率和(或)低频率(<300MHz)来说,连接 50 Ω 和 75 Ω 的物体不会有什么问题。但在高频或高功率时,需要阻抗匹配电路,这将要费 3 页纸才能说清楚。

射频工程师最想知道的是,既然他们已经同意了这个标准大小,当和其他软管连接时到底会泄漏多少,这是很重要的。因为我们的目的就是要使信号从一个导体或器件传输到另一个时不会失去太多。如果泄漏太多,系统将无法正常工作。

2. VSWR

要测量泄漏量,射频工程师提出了一个术语叫 VSWR。从技术角度讲,VSWR 代表电压驻波比。VSWR 是描述匹配情况的数字度量,匹配越好,泄漏越小。

VSWR 公式很复杂,更糟糕的是,它没有度量单位。它的表达方法是 X:1,X 越大,泄漏越多(见表 2-1)。

表 2-1 VSWR 的含义

VSWR	含 义
1.0 : 1	完美匹配,没有泄漏的软管,不可能制成
1.4 : 1	优良匹配,很小泄漏,通常作为设计目标
2.0 : 1	良好匹配,可接受的泄漏量
10 : 1	可怕的匹配,读完本书后设计电路的结果
∞ : 1	企图将浇水管和林肯隧道连接 ^①

① 对于那些有幸逃过微积分学的人来说, ∞ 指无穷大。

3. 回波损耗

因为射频工程师拒绝适可而止,认为一个度量不够。还有一个度量匹配的术语叫回波损耗,以 dB 为单位。有一个很直接的公式可以将 VSWR 换算成 dB,但由于没有人肯记住它(包括很多射频工程师),因此可以用表 2-2 转换表来近似。可以看到,VSWR 越大,回波损耗越小。

表 2-2 VSWR 和回波损耗

VSWR	回波损耗
1.0 : 1	∞
1.4 : 1	15.6
2.0 : 1	9.5
10 : 1	1.7
∞ : 1	0

2.6.2 不良匹配的后果

尽管射频工程师们弄了很多不必要的复杂东西,但下面是使用回波损耗术语的一个很好理由。当匹配不够好,软管发生泄漏时,水(射频)实际上不会流出。现实当中,射频能量沿着来的方向返回。当射频能量开始沿着来时的方向返回时,称为反射(听起来很熟悉?)。由于没有完美匹配,经常会有一些射频信号被反射。通常,被反射的射频能量很小而不被注意。在匹配很差的情况下,大部分射频能量被反射,发送射频能量的设备会爆炸,通常这种很差的匹配会被发现。

你知道吗?

关于回波损耗有两个极端例子:理想开路 and 理想短路。发生理想开路的情况是,若有人忘记将电路的其他部分连接到器件的输出,从而使射频信号只遇到空气而没有其他情况。发生理想短路的情况是,有人用一个螺丝刀跨接一个理想开路。在这两种情况下,几乎所有射频能量都被反射,VSWR 接近于无穷大。不用说,应该避免这些情况,除非射频器件爆炸很有趣。

阻抗匹配

在射频电路设计中经常会遇到不得不连接两个匹配很差的东西(一个导体和器件)。例如,导体可能大小(阻抗)很合适(50Ω),但是它所连接的器件阻抗为 100Ω 。这种连接将导致匹配很差,大量功率被反射,电路也不能很好地工作。在这种情况下射频工程师该怎么办

呢？哭吗？不，他们会在两个不同阻抗之间插入一个小小的阻抗匹配电路。在上面的例子中，阻抗匹配电路将 50Ω 阻抗变成 100Ω ，这两个东西就可以很好地连接了。图 2-6 是一个阻抗匹配电路的图形表示。

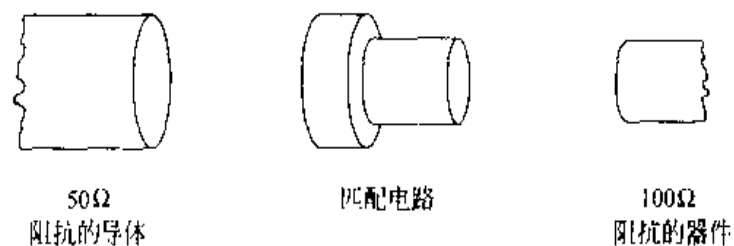


图 2-6 匹配电路的图形描述

后面将讨论，阻抗匹配电路有很多种，但它们的目的相同：将某些射频器件的阻抗变为 50Ω 。

第2部分 射频硬件

第3章 基本系统器件

本章的开始介绍了器件的方框图,这些器件组成了无线系统的两个基本模块:发射机和接收机。一旦明白了发射机和接收机的工作原理及其承担的角色,就可以很快理解无线通信。而且,这两个方框相当简单,便于查看也便于理解,因为它们仅由5个射频器件组成,这些器件将在本章讲述。

本章将解释天线、放大器、滤波器和混频器在改变信号的本质、大小、形状和频率中的作用。同时,本章也指出射频信号从哪里来,即信源。本章每一部分证明了这5个基本器件都可能取不同变量,完成特定的目标。这通常需要在生产仪器时,使一两个关键性能参数达到最优,这样自然增加了成本。附录C是一个全面的列表,其中包含了很多用来量化射频器件性能的参数。

射频产业的制造商总是试图使这5个器件更小、更轻、能量效率更高并且损耗更低,以此来改善器件的性能。大批量生产的无线产品,如手机,已经增加了对上述条款的需求,这些需求有助于大幅降低无线产品的成本。由于竞争刺激创新,这些条款需求不断改变。例如,至少有30家公司为无线设施生产高功率放大器,这种竞争最终为消费者带来更低的价格和更多的特色。

最后,本章结尾将回顾两个基本组成方框,希望引起读者的注意。

3.1 方框图

虽然发射机和接收机都是有許多内部器件的复杂系统,但是所有的发射机和接收机完成相同的基本功能,因此都被描述成简单的方框图(如图3-1和图3-2)。在这些图中,信号流从左到右。奇形怪状的东西是器件,直线是连接它们的导线。从这些方框图中可以看出来,一个信号通过导线从一个器件传到另一个器件。接收机将无线波变成电信号,发射机将电信号变成无线波。

考虑最简单的情况,所有的发射机和接收机都仅由5个基本的功能块构成(注意图3-1和图3-2,虽然有些器件是重复的,但在每个方框图中只有5个不同的器件组成)。一旦理解

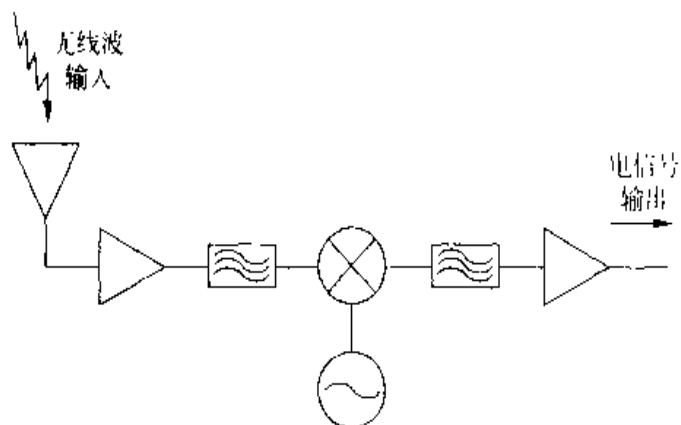


图 3-1 接收机方框图

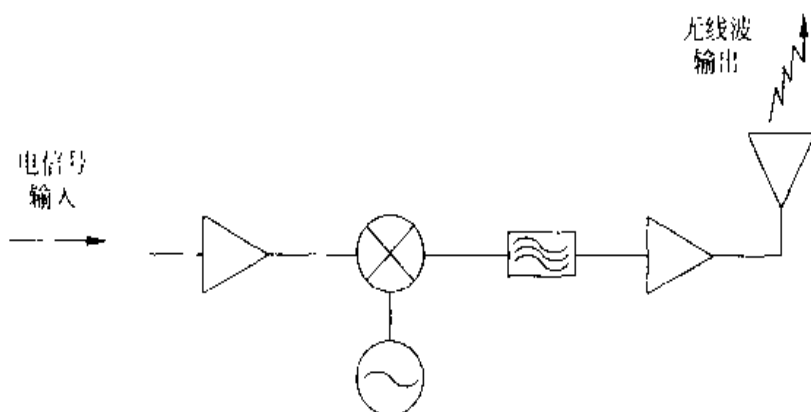


图 3-2 发射机方框图

这 5 个组成块以及它们的功能,对射频系统和无线通信就等于明白了一半(读者将在调制那部分明白另一半)。下面将讨论每个功能块,以及它们在无线系统中承担的角色。

3.2 天线

3.2.1 方框图

第一个器件称作天线(如图 3-3)。如果从这本书上只学到一件事,那就是:每个无线系统都有天线。读者也许没看到,没认识到,但事实上它就在那里。天线的任务很简单:它把电信号转化成无线波(在发射机中),或是把无线波转化成电信号(在接收机中),或者二者兼而有之。天线是无线系统的核心:没有天线就没有无线通信。直观地讲,可以看成无线波进入(或离开)方框图顶

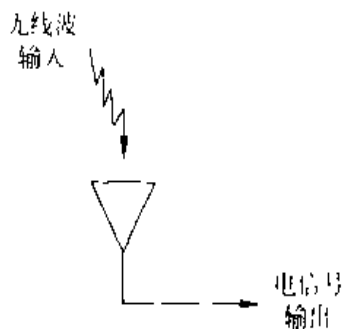


图 3-3 天线方框图

部的烟筒状结构并且沿方框图底部的导线离开(或进入)。当无线波离开天线,我们称之为无线波从天线辐射出去。大部分的天线都双向工作得很好。

3.2.2 天线特性

1. 有源和无源

天线可以有源器件也可以是无源器件。无源天线就是一大块金属,以一种特殊的方式配置。如果天线是有源的,它有电源。有源天线仅仅是比无源天线在内部多了放大器。读者将会在下一章了解到更多关于放大器的知识。

你知道吗?

大部分有源天线只有一个电路连接。有源天线在相同的导线上既传输射频信号又传输能量信号,这样不但能减少材料成本,而且还能减少为建立另一个连接需要的额外5秒钟。每一点小的改进都很有用。

2. 大小和形状

正如读者可能已经观察到的,天线有许多形状和规格,既有发射调幅无线信号的巨大发射塔,又有大大小小的接收卫星信号的碟形卫星天线,还有手机上可爱的橡皮天线。各种天线如图3-4所示。图3-5显示了一个蜂窝基站塔,在塔的顶部的垂直结构就是天线。



图3-4 天线样本,M/A-COM公司提供

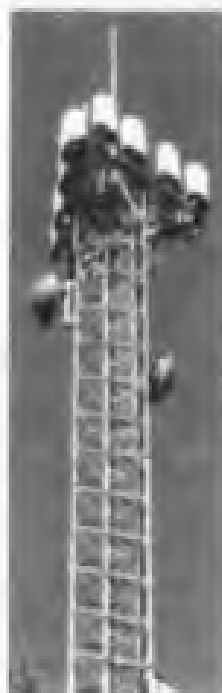


图 3-5 基站天线。
Alpha 企业提供

任何一种天线的形状和大小都依赖于 3 个因素。天线的物理特性依赖的首先就是频率，即天线需要处理的频率。总的来说，天线处理的频率越低，天线规模越大。这也是为什么调幅广播站在 530kHz 频率广播时，它的天线有几百米高，而手机工作在 900MHz，它的天线仅有 6in 长。

第二个决定天线大小和形状的因素就是无线电波传播的方向。如果要在各方向同等接收或发送无线电波信号，那么天线将是某个形状。这种天线类型称作全向天线，意味着它要求各个方向都工作。另一方面，如果只在一个方向发送（或接收）无线波信号，那么天线将是完全不同的形状。这种天线被简单地称为定向天线。

最后决定天线大小和形状的就是天线发送或接收的功率。作为一个粗略的近似，功率越大，天线规模越大。

3. 信号强度和方向

如果不是射频系统工程师没情趣的话，那么他们为什么选择一种天线类型而不选其他的？在发射信号的例子中，由于只有有限的射频能量进入天线，除非读者相信牙齿仙女，否则只有有限能量从天线中以无线电波辐射出来。如果使用全向天线，所有的射频能量必须均匀地分布在各个方向。如果天线在一个大城市的中央或是手机的组成部分，那么全向天线很好。但是如果天线正对着山，将会怎么样？直接向山辐射一部分射频能量是一种浪费，除非有人住在山里试图接收 HBO^①。

一个定向天线严格不向山辐射射频能量，将比全向天线能辐射更多的射频能量给非山区。这两种天线都输出同样多的射频能量，但是由于定向天线能集中在一个更小的区域上分配能量，因而那个小区域上能接收到更多的射频能量。这里有个类比。假设读者有两个苹果饼，第一个馅饼很普通，馅覆盖整个饼。这类似于全天线，所有的卡路里（射频能量）均匀覆盖整个馅饼。第二个馅饼和第一个馅饼有同样量的馅，但是馅只夹在饼的一半里。这和定向天线相似，“那一半的”馅饼比普通馅饼有更多的卡路里（射频能量）。增加的射频能量使从天线出来的信号传输范围增加或者使数据率提高（或者两者都提高）。

从个人体验可能会知道，离天线越远，从天线辐射出的信号强度将越小（回忆一下前面章节，这种行为是由于自由空间的损耗）。这就是为什么随着远离城市边缘，对广播站的接收会减弱。所以，在同样的输出功率的情况下，在小区域具有高功率的定向天线将比全向天线有更大的信号范围，这意味着读者可以更远地收听所喜欢的广播。

① 译者注：HBO 是美国一个著名的收费电影频道。

3.2.3 天线如何工作

天线是接收和发射电磁波的装置。天线的工作原理是：当电磁波入射到天线时，天线中的自由电子在电磁波的电场作用下产生定向运动，从而在天线两端产生感应电动势，形成电流。反之，当电流在天线中流动时，也会产生电磁波，向外辐射能量。

你知道吗?

通常对于天线成立的理论对于射频世界也成立;频率越高,东西越小。当今手机那么小的一个原因就是因为他们工作在高频,这允许内部器件可以做得非常小,小得可以放在手机内部。下面是3个普通的无线应用的波长:

调幅广播: 566m

蜂窝电话: 1ft

卫星电视: 1in

正如读者在图 3-6 的左侧所看到的,有一个(近似)的圆形图样与中心天线等距。这是典型的全向天线方向图,显示了射频能量均匀从各个方向辐射出来。在图 3-6 的右侧是许多可能的定向天线方向图的一种。注意所有的射频能量辐射到中心天线的右侧。这个天线方向图可以用来在两个高山间的狭窄关口辐射射频能量。

2. 天线增益

所有天线都有增益,甚至无源天线都有。这怎么可能,增益总是需要电源的?我忘了提到,天线除外。天线增益有一点不同,射频能量的绝对值并没有真正变大。

为了解释这一现象,假定有一种虚构的天线称为各向同性天线(说它虚构是因为不能做出来这样的东西)。各向同性天线是空间中一个单点,向各个方向辐射能量(它的三维天线方向图是天线在中心的一个球)。既然射频能量在所有三维方向均匀辐射,它可以以任意薄进行传播(也就是它有最低的可能功率密度)。

使用同样的射频能量(记住馅饼的例子),任一个在一个方向上辐射射频能量的天线,必然比一个各向同性天线发射信号更远(在同样的方向上)。既然定向天线发射同样的射频能量比各向同性天线传得更远,定向天线相对于各向同性天线被认为是具有增益。这是方向增益,而不是功率增益。天线束越集中,它的增益越大。

令人吃惊的结果是,所有天线和各向同性天线相比都有增益,即使全向天线也有增益,尽管很小。这怎么可能?不要忘记,各向同性天线从三维空间辐射射频能量,全向天线限制射频能量到二维空间。一个全向天线的三维天线方向图看起来更像一个酷饼,天线在中间做牙签。

所以天线增益是方向增益,并且它相对于各向同性天线进行度量。增益仍然用 dB 度量,但是由于它是相对于各向同性天线,度量单位为 dBi,“i”代表各向同性(最后的“i”与 Internet 无关)。

天线增益引出一个有趣的问题:从天线出来的功率是什么?天线增益是否被加到所有其他增益和损失中,来决定发射机的输出功率呢?是的。但是当天线增益用来决定发射机的输出功率时,输出功率被赋予了一个非常专业的名字:有效各向同性辐射功率或 EIRP。读者现在知道很多天线增益的方式了吧。

3.2.5 极化

当射频波在空气中传播,正弦波自身有方向:垂直或水平。这个方向称作极化,这很好想像。如果手机被这样放置,将其天线颠倒,出来的射频(正弦)波将被垂直极化(正弦波在传播的时候将会上下变化)。但是如果手机天线侧向放置,出来的信号将是水平极化,正弦波在传播时将从一边到另一边变化。

你知道吗?

如果读者带着有趣的眼镜看过三维电影,可能直接感受过极化的效果。所有的电磁波,不止射频,由传播的正弦波组成。可见光由水平和垂直正弦波组成。在三维电影中,两个稍有不同的形象,通过不同极化,被投影出来。眼镜的每一边只让一种极化通过,这导致每只眼睛看到不同的形象,欺骗了读者,使读者认为看到了一个有深度的形象。

谈这些的目的是什么?极化是一种方法,把两个相同频率的不同信号同时放到同一个地方。所有射频系统的目的就是把尽可能多的信息放到分配的带宽中,将两个完全相同的信号仅仅通过不同的极化使之不同。在理论上,通过使用水平和垂直极化,在同样的带宽内,可以实现2倍的转换。

可以通过观察手机上的信号强度指示来亲身见证这种现象。如果要接收的手机信号和大多数手机信号一样是垂直极化,读者水平拿着手机,将收到很弱的信号。当把手机的天线竖起来,在它完全竖立起来前,信号强度将会增加。

因为射频工程师有很多空闲时间,他们计算出如果垂直极化信号和水平极化信号合并,结果将是一个全新的极化类型,叫做圆形极化。在这种极化形式中,射频正弦波在传播时,不断从水平变到垂直。

你知道吗?

有两种不同的圆形极化(我告诉过读者射频工程师有很多空闲时间)。一种类型叫做右手圆形或RHC,自然另一种叫做左手圆形或LHC。

3.2.6 天线维数

1. 一维天线

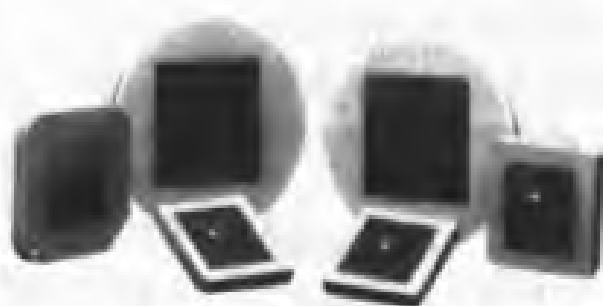
正如以前提到的,有许多不同形状的天线,但它们往往都可以归纳为两种类型:一维天线和二维天线。一维天线由许多电线组成,这些电线或者像手机上用到的直线,或者是一些灵巧的形状,就像出现电缆之前在电视机上使用老兔子耳朵。

单极和双极天线是两种最基本的一维天线。一个单极天线仅仅是一个直的天线,它的长度近似于要辐射的射频信号波长的 $1/4$ 。双极信号长度近似于射频信号波长的一半。为什么是半波长?原来是当天线是半波长时,它辐射射频能量效果很好(这是一个物理现象)。

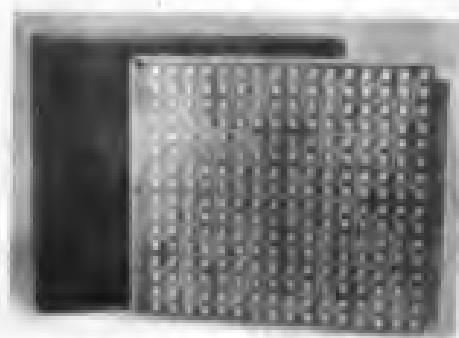
所以如果天线是半波长时,它工作得很好,还要 $1/4$ 波长的单极天线有什么用?单极天线辐射能量虽然不如双极好,但是当使用单极天线时,它通常直立在地面上。因为大地是良导体(如果读者不相信,试着在雷雨中打高尔夫球),它可以作为射频的“镜子”。其实从射频行为的观点说,埋在地里的单极天线就等效于双极天线。在低频应用中使用单极天线是很重要的。一个 100ft 高的单极天线和 200ft 高的双极天线,读者会竖哪一个?

2. 二维天线

二维天线变化多样,有片状,阵列状,还有喇叭状、碟状。一个片状天线就是一块正方形的金属,而一个阵列天线就是组织好的二维模式的一束片。这两个例子如图 3-7 所示。喇叭状天线类似于以前高中拉拉队队长用的扩音器。



(a) 片状天线, Alpha 企业提供



(b) 阵列天线, Epsilon Lambda Electronics 提供

图 3-7 二维天线

碟状天线等效于收集主要来自卫星的射频能量的大漏斗。碟状天线有很多规格,大到当地电视台使用的巨型天线,小到直接面向家庭(DTH)的卫星电视使用的 18in 天线。碟子的大小取决于两方面:一是频率,读者现在已经知道的,频率越高,所需要的碟子越小;二是发射或接收的功率,例如,另一方的发射功率越大,接收用的天线就越小。现在读者可能意识到了,由于最新代的卫星具备了发送高频大功率信号的能力,才使带有小碟状天线的 DTH 卫星电视成为可能。一个大的碟状天线如图 6-9 所示(见 6.3 节)。

3.2.7 智能天线

有一种新类型的天线叫做智能天线,它主要用于移动电话。如果仔细看图 3-5,读者可以发现基站天线实际上是三套天线。在大多数蜂窝系统中,蜂窝被分成 3 个 120° 的扇区。每套天线负责 120° 的覆盖,因此当看一个天线方向图时,存在 120° 的波束宽度。

当一个天线(或一套天线)负责 120° 覆盖时,出现两个问题。第一个问题就是浪费射频能量。可能在整个扇区内只有一个或两个移动手机用户,但是射频能量被辐射到各个地方。

第二个问题是干扰。最简单的解释,干扰就是不需要的信号。由于天线不知道某个移动用户的位置,它们就必须到处发送信号。尽管这个信号对于使用它的用户来说非常有用,但它对于扇区内的其他用户来说都是干扰。

一个简单的解决办法就是把 120° 扇区分成更小的一束区域,每个区域有它自己的天线,这样不仅会减少干扰,而且会增加蜂窝自身的范围。这多少就是智能天线完成的工作。智能部分来自于天线在扇区内跟踪用户的能力。这种把扇区分为更小的部分,并且跟踪移动用户,被称为空分多址或 SDMA。

有两种类型的智能天线:交换波束和适应阵列。交换波束使用许多窄波束天线,每个指向一个微有不同的方向,以此覆盖整个 120° 扇区。当扇区内的移动用户移动时,系统内的智能天线从一个天线变换到另一个天线。适应阵列使用一个阵列天线(如图 3-7(b)所示)和成熟的数字信号处理来从一个位置到下一个位置转换天线束。

3.3 放大器

3.3.1 方框图

接下来要介绍的器件如图 3-8 所示,叫做放大器,它使信号放大。当射频信号从一个地方传到另一个地方,经常需要放大。这就像开车,读者开车到处转,就要消耗汽油,当汽油减少后,读者要去加油。一个放大器对于射频信号来说就是一个加油站。直观地看,一个小信号进入方框图大的一端(左侧),从尖端出来时就成为一个大信号。

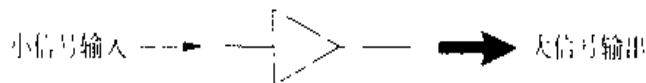


图 3-8 放大器的方框图

3.3.2 放大器的基本属性

1. 增益

放大器有 3 个基本属性:增益、噪声系数或输出功率、线性。增益是度量输出信号比输入信号大多少,正如读者所猜到的,用 dB 度量。在射频系统中的某些地方需要大增益(40dB 或 50dB),而一些地方只需要很小的增益(5dB~10dB)。

放大器主要分3类:低噪声、高功率和其他。低噪声放大器是信号通过接收器天线后遇到的第一个放大器。高功率放大器是在信号从发射机出来前通过的最后一个放大器。

2. 噪声系数

低噪声放大器(LNA)用于监听非常小的射频信号,所以它们必须非常非常安静。LNA的安静度量叫做噪声系数(NF),用dB做度量单位。LNA的基本属性是噪声系数。LNA的NF越低越好。一些射频工程师在低NF的LNA上投入很多资金(我们其他的人只投资共有基金)。什么是好的NF?视情况而定。可以这样思考:噪声系数越低,LNA可以听到的信号越小,LNA可以离得更远,这样手机的范围就越大。

3. 输出功率

在射频信号从天线出来之前,高功率放大器(HPA)尽可能放大射频信号。信号越大,它传输得越远,也就是说手机的范围越大。HPA的第二个基本属性是输出功率,用瓦特(W)来度量。一般来说,功率越高越好。

不幸的是,射频工程师坚持把事情搞复杂,趋向于用dBm表示输出功率。dBm的意思是什么?它的字面意思是比1mW大的dB数。例如,10dBm就是一个信号比1mW大10dB,30dBm就是比1mW大30dB,如此类推。一个30dBm信号就是比1mW大30dB(1000倍),也就是1W。所以30dBm等于1W。可恶的工程师!一些通常的转换请见表3-1。

表 3-1 W 与 dBm 的转换

W 表示的功率	dBm 表示的功率
0.1mW	-10dBm
1mW	0dBm
1W	30dBm
1000W	60dBm

图3-9(a)表示了一个LNA的例子,图3-9(b)表示了一个HPA的夸张例子。这两个用来说明与LNA比起来HPA是多么大。HPA这么大是由于它需要散热。因为放大器不是100%的效率,进入放大器的一些能量以射频信号形式出来,其余以热量散发出来,这正是为什么像汽车发动机内有风扇一样,HPA的风扇用来提供内部冷却。如果HPA风扇停止工作,读者或许可以从里面得到软糖。

当讨论HPA的输出功率时,读者需要知道与其相关的每个事情。比如,大部分手机内的输出放大器的输出功率小于1W,基站端的输出放大器输出50W,两个放大器都是HPA。这是因为一个HPA并不意味着它输出很大功率,但是意味着它是发射器的最后放大器。



(a) 低噪声放大器(LNA)



(b) 高功率放大器(HPA)

图 3-9 放大器

4. 线性

在数字通信时代,放大器的第三个属性叫线性。数字无线通信的一个含义就是当一个数字信号加载到射频的载波上,信号通过的任一个放大器都必须真正的线性。线性用来度量放大器使信号形状失真的程度。在后面的 5.3 节中,读者将会学到,射频载波的微小变化部分实际上都包含着信息;因此不需要的信号形状的变化会使信息严重失真。射频工程师在放大器的输出端希望得到的信号是比输入信号大但形状却和输入信号完全一样。作为一种可视化方法来介绍线性的概念,我提供给读者放大器的最重要信息——传输曲线(如图 3-10)。传输曲线就是放大器的输出功率对输入功率的图。所有放大器表现出了这种行为。

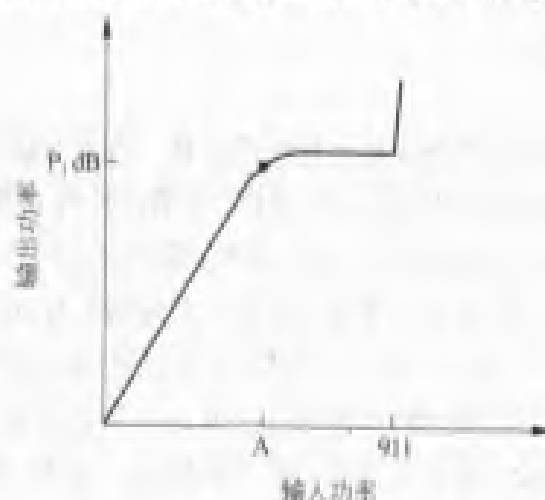


图 3-10 放大器的输出功率、输入功率比较

参考图 3-10,随着放大器的输入功率增加(移动到水平轴的右侧),至少在 A 点前,放大器的输出功率都有一定量的增加。直到 A 点前的范围被称为放大器的线性区。如果要避免射频信号失真,放大器必须在这个区域内工作。A 点的输出功率被称为 $P_{1\text{dB}}$ 点或 $P_{1\text{dB}}$ 功率点或 1dB 压缩点。虽然 $P_{1\text{dB}}$ 有精确的定义,但是它会引起混淆。这样想很简单:放大器的 $P_{1\text{dB}}$ 是放大器在线性区输出的最高功率。从另一种角度去看, $P_{1\text{dB}}$ 是一个放大器输出的最高线性功率。

超过水平轴的 A 点(再增加输入功率),注意输出功率不再增长而是保持平坦。换言之,输入功率的增加不再导致输出功率的增加。放大器停止放大。过了 A 点,可以说放大器饱和了,进入了非线性区。在非线性区,所有的信号都发生失真,把数字手机呼叫搞乱。比 $P_{1\text{dB}}$ 大的输出功率叫做饱和输出功率。在一些例子中,饱和输出功率有用,但是在数字无线通信中没用。注意:如果输入功率进一步增加,将达到放大器的输出功率迅速增加的那点,如图 3-10 所示。当然在这点,输出功率像火焰一样从放大器中投射出来,这就是为什么这点被称为(戏称为)911 点。

测量放大器线性的一个方法就是利用它的互调点(通常称为三阶互调点)。互调点越高,放大器的线性越大。互调点由符号 Ip_3 表示(有时放大器的 Ip_3 称为动态范围)。就像功率一样,互调点也用 dBm 度量。一个有 40dBm 互调点的放大器比有 30dBm 的放大器线性要大。所有射频工程师使用的经验准则是:放大器的 Ip_3 比 $P_{1\text{dB}}$ 点大 10dB。没有必要再深究了。

你知道吗?

三阶互调点是一个虚构点,它事实上不存在,不能直接测量。取而代之,制定了许多其他度量,于是放大器的 Ip_3 使用这些度量来计算。如何把这个关键器件的性能构建在不存在的东西上面还是留给射频工程师研究吧。

3.3.3 放大器如何工作

放大器如何给输入信号提供增益是个有趣的过程。当输入信号通过放大器时,它本身并没有真正变大。实际上,输入射频信号控制 DC 功率,DC 代表直流(DC 功率或 DC 电压不同于正弦波,它是常量,不随时间变化,就像从手电筒的电池出来的电压)。类似于读者转动汽车的轮胎,当开车的时候,读者并不是真正地去转轮胎本身,而是通过称为方向盘的控制器来控制轮胎的转动。如果汽车是个放大器,司机就是输入射频信号,轮胎将是 DC 功率,方向盘就是称为晶体管的控制器,晶体管在后面的章节将会学到。在放大器中,射频输入信号告诉晶体管使直流功率恰恰反映输入信号的形状。这样,输出信号与输入信号有完全相同的形状,仅仅是变大了而已。变多大,这依赖于有多大的直流输入功率。HPA 和其他放大器的主要区别是 HPA 有更大的输入功率。

3.3.4 特殊放大器

1. 限制放大器

如果读者真的想留下射频工程师一点印象,应注意两种特殊的放大器。第一种类型叫做限制放大器,正如名字所暗示的,它限制了输出功率。这种放大器用于这种地方,如果放大器的输入功率太大时,它后面的器件将被损坏,这时就需要用限制放大器。限制放大器为下一个器件提供保护。读者可以回顾一下图 3-10,所有放大器都有些限制放大器的性质。在某个输入功率范围内,输出功率稳定。基本上可以这样说,限制放大器和其他放大器的惟一区别就是限制放大器不让发生在理论 911 点爆炸。

2. 平衡放大器

另一种类型的放大器叫做平衡放大器。它的不同之处在于设计。在平衡放大器中,有并联的两个放大器。

参考图 3-11,在平衡放大器的设计中,射频信号照常进入左侧。一旦进去,信号分成两半,一半进入一个放大器,另一半进入另一个放大器。在放大器内,这两个半信号被分别放大,然后在从右侧输出前再合到一起。从外部看,平衡放大器看起来和工作起来就像一个普通的放大器。

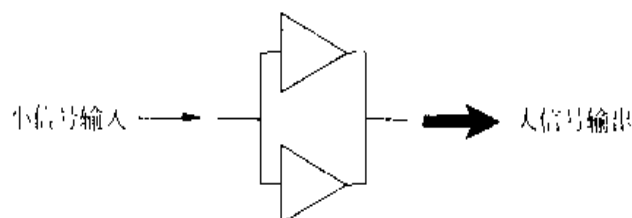


图 3-11 平衡放大器的方框图

读者肯定奇怪,为什么一个放大器就能完成,这里却要用两个。因为平衡放大器具有两个优点,这是单一放大器不能实现的:第一个优点就是如果两个放大器中有一个坏了,另一个仍然可以工作,但是性能将有所降低。平衡放大器经常用于要求高可靠性和具有容错能力的环境中。

第二个优点,就是平衡放大器比普通的放大器提供更好的匹配,读者只要记住我的话就行了,因为这一点很难解释。它们的泄漏很少,这就意味着有更好的性能,而有一些射频系统仅仅是能正常工作就行。

你知道吗?

放大器的价格变化很大。通常来说,频率越高,或者带宽越宽,或者输出功率越大,放大器的成本就越高。有超低噪声系数的放大器也很贵。举个例子,一些低成本的表

面安装的放大器仅卖 50 美分,而一些大功率、宽带宽的放大器卖到 50 000 美元。很高兴的是,射频工程师不在读者的圣诞节购物清单上。

3. 可变增益放大器

还有最后一种类型的放大器需要知道,就是可变增益放大器或 VGA。大多数的放大器有固定增益(即增益只有一个值)。一个 10dB 增益的固定增益放大器将使所有输入变大 10 倍。可变增益放大器有一个外部控制,它允许用户在预定义的范围内变化增益。所有的 VGA 都由增益范围来区分,比如 10dB~20dB。一个 VGA 就像气体范围,热量(增益)从温热慢慢变化到沸腾,外部控制就像炉子的旋钮。VGA 的方框图如图 3-12 所示,读者可以看到它只是比普通放大器多了一个穿过它的箭头。

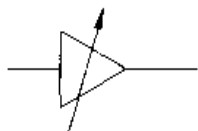


图 3-12 可变增益放大器的方框图

实际上,VGA 的外部控制很少像炉子的旋钮那样与外面相连。常常是,VGA 的控制与射频系统的某个点相连,那点感觉发生变化,然后相应地改变 VGA 的增益。器件根据系统某处的变化改变它的性能,这就叫做反馈。VGA 经常感觉到一个射频信号“顺着线路走下去”。如果 VGA 感觉到信号太大,它降低增益,如果信号不够大,VGA 加大增益。直到 VGA 感到信号合适了,就不再改变它的增益,并在那点保持它的增益。

你知道吗?

电子学有一个分支叫做反馈理论,它预测反馈电路的行为。自动调温器控制屋子里的温度就是反馈理论的一个典型例子。所有反馈电路都是以同样的方式工作,感觉输出(房间温度),然后变化输入(炉子火苗)来取得特定结果(所需要的温度)。射频系统就像所有的电子系统一样,广泛使用反馈电路。我猜测当输出太凉时,器件不会喜欢它。

3.4 滤波器

3.4.1 方框图

接下来的器件叫做滤波器(如图 3-13)。滤波器完成读者所想像的工作,它滤除所有不需要的信号。表面上看,它可以被看作是一束不同频率的信号在左侧(f_1, f_2, f_3)进入滤波器,在右

侧(t_2)只有需要的信号(以需要的频率)出来。这些不需要的信号从何而来?到处都是。

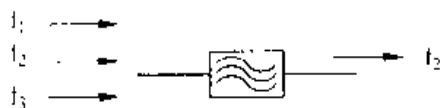


图 3-13 滤波器的方框图

3.4.2 滤波器的功能

任意时刻都有许多看不见的射频波以各种频率游荡在空气中。这些波来自于所有射频发射发生的地方,如手机、卫星通信、雷达甚至太阳黑子。所有这些游荡的波试图通过接收机的天线进入接收机,并且许多都成功了。一些信号甚至通过了 LNA,这些地方正是需要滤波器的地方,滤波器就像一个夜总会的保镖,让许多可接受的信号进入,拒绝其他所有无用信号。滤波器选择信号不是依据吸引力或是财富,而是依据频率。

在一个理想(简化的)世界,当滤波器完成它的工作时,惟一留下的信号恰恰就是需要得到的信号。但是,世界并不是理想的,这就是为什么读者经常在发射机和接收机中看到有几个滤波器。

理解接收机中滤波器的目的很简单,但是为什么发射机中也需要滤波器呢?读者很快就会了解到,在所有的射频系统中有一个很不好的器件称作混频器。这个坏器件所做的工作(在其他器件中)就是将不需要的信号(以不需要的频率)注入发射信号。但是,发射机笑到最后,因为就在信号被 HPA 放大送往天线之前,滤波器可以清除所有由混频器注入原始信号中的不需要的信号。呵呵……

FCC 的角色

在大多数情况下,联邦通信委员会(FCC)要求在发射端有滤波器。当某人被批准在特定频率发射信号时,他们被禁止在其他频率发射信号,以免把别人的信号搞乱。发射滤波器确保没有“非法”信号离开发射机。

你知道吗?

FCC 掌管分配所有在美国的无线电波传输的权利,许多年前它通过抽签方式分配蜂窝频率带宽。发现这个小策略几乎没从美国政府那里获得一元钱之后,FCC 变得精明起来了。自那之后,所有无线传输的权利都被以很高的价钱拍卖。

3.4.3 滤波器的类型

滤波器的类型太多了,以至于可以就这个题目写一本书,这正解释了为什么在这个题目

上有那么多书。但是所有的滤波器,不管它们是怎么构造的,都可以归为4种,如表3-2所示。

表 3-2 不同的滤波器类型

滤波器类型	解 释
低通	允许小于一定频率的所有频率通过,拒绝所有其他频率。就像只让矮个子通过栅栏
高通	和低通相反
带通	允许两个特定频率之间的所有频率通过,而拒绝所有其他的。就像允许身高在 5ft10in 和 6ft2in 之间的人通过栅栏
带阻	和带通相反,也被称为陷波滤波器

几种滤波器如图 3-14 所示。注意所有不同的形状和大小(多美丽)。就像所有其他射频材料,滤波器拥有共同的频率属性: 频率越高,滤波器越小。



图 3-14 滤波器

3.4.4 滤波器的性能

频率响应

通常来说, 滤波器是无源器件, 所以不需要电源。事实上, 滤波器通过改变它们的插入损耗来工作, 而插入损耗是频率的函数(见图 3-15)。图 3-15 所示称为滤波器的频率响应曲线(它还能被称为别的东西吗?)。每个滤波器都有一个频率响应, 这是描述滤波器时所必须有的。图 3-15 显示了带通滤波器的频率响应。在频率小于 A 点, 大于 B 点区间, 插入损耗

很高。滤波器的高插入损耗可能是 30dB,这意味着在这些频率,滤波器去除射频信号的 99.9%。相反地,A 点和 B 点之间的频率是低插入损耗。低插入损耗可能是 1dB,只清除了信号的 20%。

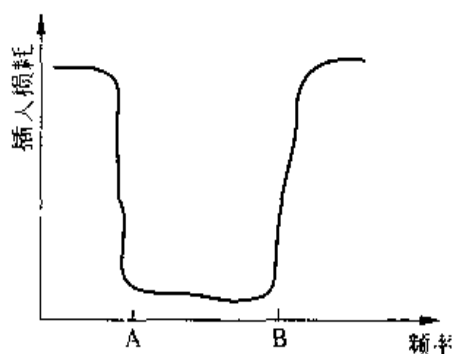


图 3-15 带通滤波器的频率响应

再次参考图 3-15,A 点和 B 点之间的频率称为通带,因为滤波器允许这个带宽的频率通过。相似地,A 点和 B 点之外的频率称为阻带。如果阻带不允许射频能量通过,这些能量将发生什么?它转化为热量,这就解释了为什么射频工程师希望在信号还是低功率(如在 HPA 前)时,对所有信号进行滤波。在很多情况下,这是可能的,但是读者很快就会知道至少在一种流行的无线系统中,这是不可能的。提示:想想蜂窝系统。

3.4.5 特殊滤波器

1. 双工机

读者可能听到过双工机这个词(或同向双工器),这是个很奇特的设备,它能把两个滤波器放入一个器件里。双工机经常用于与基站天线的连接。通过把发射机和接收机的滤波器放在同一个设备中,同样的天线既能用于发射又能用于接收,这样减少了基站所要求的天线数目。如果双工机在一个设备中有两个滤波器,读者猜猜三功器有多少滤波器?

2. SAW 滤波器

还有一种类型的滤波器应该知道,那就是 SAW 滤波器,当然它不是用木头造的切割工具。SAW 代表声表面波,这是一种奇特的描述声波的方法。记住随着频率变小射频器件变大,在一定频率以下,标准射频滤波器变得非常大。直到某一天,某个聪明的射频工程师发现如果射频信号首先转变成声音信号,滤除这种声波所需要的器件将小多了,这就是 SAW 滤波器的工作原理。首先,它们将射频信号转化为声音信号,然后它们滤出声音信号,最后它们再把声音信号转化为射频信号。

因为 SAW 滤波器的制作很像半导体,它们批量生产很便宜,所以,优先考虑尺寸小而且成本低时(不是这样的时候呢?),SAW 滤波器是一个非常好的选择,这就是为什么它们广泛用于移动电话的原因。不幸的是,由于生产限制,SAW 滤波器真正商业化的只在 10MHz 到大约 3GHz 之间。

关于一般的无源设备,尤其是滤波器,还有一件需要提及的是:放大器不是惟一的有 1dB 压缩点(P_{1dB})和一个三阶互调点($Ip3$)的器件。像滤波器这样的无源器件也有这些参数。在无源器件中,这两种参数测量的不是器件输出的功率(因为它们是无源的),而是在不引起信号失真的情况下,器件能处理的功率。读者可以想像,如果一个很大的信号输入一个小滤波器,将会出现一些坏的结果。事实上,发生的坏事就是信号变形,也就是信号大小和形状发生任何预料以外的变化。当然,如果信号相对于滤波器来说变得过大,滤波器可能会着火,这也是信号失真的一种形式。

3. 超导滤波器

如果读者回忆一下图 3-2,射频信号在传到发射器(在天线之前)的路上通过的最后一个装置就是 HPA。有时功率很大,且 FCC 的要求很严格,需要在 HPA 之后加一个滤波器,以保证输出没有干扰的信号。这在蜂窝基站的发射机输出中是很普遍的。这是一个所有的滤波都不能在低功率工作的例子。

回忆一下通带的情况,即使最好的滤波器也有一些(插入)损耗。当滤波器在 HPA 之后时,滤波损耗是一件很坏的事。它削弱了信号,这将减小无线系统的范围。但是如果有一个去除滤波器插入损耗的方法,将会怎么样?

加入超导滤波器。如果读者从不知道超导滤波器,可能知道超导是特殊材料,它表现为没有阻抗。用超导材料做一个滤波器将会怎么样?它将没有(或非常小)插入损耗。

举个例子,假定一个典型的用于蜂窝基站输出的滤波器有 0.5dB 通带插入损耗(这并不坏),基站输出 40W 的射频功率(在滤波器前)。由于滤波器的插入损耗引起的功率损耗超过 4.5W。这意味着发射机的真正输出功率小于 35.5W。

现在如果换成超导滤波器将会怎么样?比如超导滤波器只有 0.1dB 的插入损耗。读者可能在想,这有什么好处,我们仅节省了 0.4dB?但这个例子中真正的输出功率几乎是 39W,或比原来增加 3.5W。3.5W 可能听起来并不多,但事实上,它很多了。它会急剧增加蜂窝基站的传输范围,或急剧延长读者移动电话电池的使用寿命。

越来越多的超导滤波器应用于蜂窝基站,这是它们目前惟一真正的应用。它们用于蜂窝基站而不是移动电话的原因是,它们非常大。这里忽略的一点是超导滤波器工作时需要保持温度很低,比如零下几百度(摄氏或华氏)。为了使它们保持低温,必须有冷却系统。但是它们仍有经济价值,所以得到应用。

3.5 混频器

3.5.1 方框图

啊,邪恶的混频器。组成混频器(如图 3-16 所示)的数学和物理公式太复杂了,需要一个扩展页来描述。幸运的是,从概念上很容易解释它。

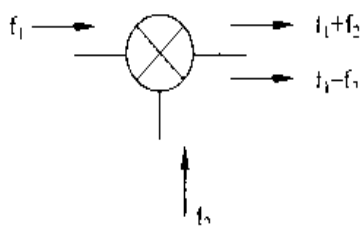


图 3-16 混频器的方框图

3.5.2 混频器的功能

1. 数学表达

混频器的目的就是改变信号的频率但保持信号的其他特性不变。表面上,一个信号在左侧以特定频率(f_1)进入混频器,另一个信号以第二个频率(f_2)进入混频器的底部,从右侧出来的是两个不同的信号。一个信号的频率等于两个信号频率和($f_1 + f_2$),另一个信号的频率等于两个信号频率差($f_1 - f_2$)。下面举例说明(见例 3-1)。

例 3-1 混频器的数学表达。

两个信号进入混频器。一个信号频率是 500MHz,另一个信号频率是 400MHz。那么从混频器出来的两个信号的频率是多少?

第一个频率可以通过两个频率相加得到

$$500\text{MHz} + 400\text{MHz} = 900\text{MHz}$$

第二个频率可以通过两个频率相减得到

$$500\text{MHz} - 400\text{MHz} = 100\text{MHz}$$

从混频器出来的两个信号的频率是 900MHz 和 100MHz。

这里提出三个问题。(1)为什么一个信号的频率需要改变?(2)现在有两个信号怎么解决?(3)什么使得混频器变得邪恶?

2. 改变频率

首先,信号的频率必须改变,因为我们在日常生活中遇到的信号是在空中传播的不同频

率的、携带信息的信号。例如,当读者讲话时,在周围引起 2kHz ($2\,000\text{Hz}$) 的声波。然而,如果读者希望用蜂窝电话打电话,声音的频率 (2kHz) 需要变换成蜂窝通信中使用的频率 (900MHz)。为了将人的语音频率搬到蜂窝载波上,需要一个或多个混频器。

其次,在从混频器出来的两个信号中,需要去除一个不需要的信号。在例 3-1 中,如果需要的信号是 900MHz ,那么 100MHz 的信号就被删除。接下来是最危险的问题, 100MHz 的信号如何去除? 用滤波器。这就是为什么在一个混频器后恰好有一个滤波器,因为混频器输出两个信号,滤波器滤除一个不需要的信号。如果读者给它一个机会,这个信号也是有用的。

最后,为什么混频器是有害的? 如果混频器恰恰如上面所描述的那样,它们并无害处。正如读者已经学到的,在射频世界中,事情并不是那么简单。实际上,当两个信号进入混频器,输出的并不是两个很干净的信号。许多信号以各种频率出来了,这使得射频工程师发疯(想想吧,这是混频器的最大益处之一)。这些不需要的信号在工程术语中被松散地定义为噪声。一个射频系统中的噪声,或者是一个不需要的频率的信号,或者是需要的射频信号的瑕疵。混频器之所以声名狼藉,就是因为它将噪声加入到射频系统,这是混频器后有滤波器的另一个原因。

3. 混频器的其他名字

需要指出的是,混频器有时需要被称作上变频器或下变频器。如果混频器是接收机的一部分,那么它就是下变频器。如果它是发射机的一部分,读者可以推测出结果。

3.5.3 混频器如何工作

1. 三个端口

为了努力扩大读者已经很丰富的射频词汇,再介绍混频器中的两个输入和一个输出(称作端口)被称为 RF、LO 和 IF。RF 就是有高频信号(在例 3-1 中 900MHz) 的端口,IF 或称为中频,是有稍低频率的信号的端口。LO 将在本章后面讲到。正如读者所猜到的,RF、IF 和 LO 端口在它们有限的频率范围工作。在端口频率范围之外,操作混频器将会导致很坏的电子性能。正如其他射频器件一样,三个端口的频率范围越宽,混频器损耗越大,性能越差。设计混频器的射频工程师选择最窄的频率范围来完成任



图 3-17 混频器,Mini-Circuits 提供

频器事实上有三个端口。

既有有源混频器又有无源混频器,但是说实话,95%的混频器都是无源的。虽然有源混频器有增益,这通常是件好事,但是有源混频器的性能参数低劣,所以几乎没什么人使用它们。

2. 转换损耗

就像所有的无源器件,无源混频器表现出插入损耗。现在射频工程师不把它称之为插入损耗,因为这太简单了。为了区别,混频器中的插入损耗叫做转换损耗(CL)。转换损耗是无源混频器中两个最重要的参数之一。CL越低越好。无源混频器的另一个主要参数是噪声系数(NF)(还记得噪声系数吗?)。读者认为只有放大器有NF,其实并非如此。就像LNA那样,混频器中的NF越低越好。同时,正如上面所暗示的,RF、IF和LO端口的频率范围越宽,参数CL和NF也越差,如果读者能够理解这句话的首字母简略词,就真正掌握了混频器的术语。

3.5.4 混频器的配置

1. 两级混频器

这是最后的使事情复杂化的努力。通常是在发射机或接收机中有两个混频器,在它们中间的信号是IF,最低频率的信号叫做基带信号(如图3-18)。

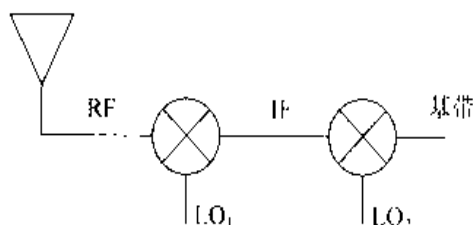


图 3-18 接收机中两级混频器的方框图

注意基带信号是射频信号的低频版本。在它顶部还有信息信号。一个完整的接收机可以被认为是完成两个功能。第一个功能就是降低载波的频率,第二个功能是从基带信号取出信息信号。第二个功能将在5.3节详细讨论。这两步同样也发生在发射机中,只是顺序相反。

你知道吗?

当一个接收机在一行中使用两个混频器,如图3-18所示,它就称为超外差接收机。就如同两个五分镍币相加后称为一角。

2. 混频器类型

顺便提一下,读者应该知道混频器分为3种:单端、双平衡、三平衡。这些区别与混频器内部如何构建有关,与混频器的功能无关。上面任何关于混频器的描述,都是以一种慢而长的方式来讲述的,忽略它们,只想混频器即可。

3. 倍频器

这是与混频器紧密相连的又一个器件:倍频器。冒着对读者无礼的危险,倍频器的输出频率是输入频率的二倍。还记得混频器是如何产生各种频率不同的不需要的信号吗?倍频器用它的这种特性来使信号倍频。说得够多了。

3.6 信源

3.6.1 方框图

最后介绍信源或振荡器(见图3-19)。给混频器提供一个输入的振荡器叫做本地振荡器或LO(我猜这是用来区别位于金星的远端振荡器)。现在读者知道LO端口在混频器中的作用了:它与一个振荡器建立连接。

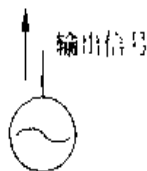


图 3-19 振荡器的方框图

3.6.2 振荡器如何工作

虽然振荡器的实际工作原理有点复杂,但是它们从概念上很好理解。接上电源之后,理想状态是输出一个完美的预定频率的正弦波信号(这就是为什么在圆圈内有一个小正弦波)。不必说,所有的振荡器都是有源器件。

振荡器就是射频最先发出来的地方。它们是射频的源。从振荡器顶部发出来的只是一个正弦波信号,如图3-19所示。图3-20是一些用于目前无线系统中的表面安装的振荡器。注意一下它们多小呀。



图 3-20 表面安装振荡器, VAR-L 有限公司提供

你知道吗?

几乎每个存在的实体都有自共振频率。那意味着如果读者可以用电能(或路放它)激发材料,这种材料将产生一个正弦波!不是开玩笑。

3.6.3 不同类型的振荡器

有许多不同类型的振荡器,可以表示为只取首字母组成的字母表,详细情况见表 3-3。这些振荡器中的每一个都有相同的目标:在给定条件下(温度、频率等)提供最完美的正弦波。引起问题的正弦波是非理想的,需要使用额外的滤波器。

表 3-3 振荡器类型

缩写词	振荡器	用途
DRO	电介质共鸣振荡器	精确的高频
DTO	电介质调谐振荡器	可变的电介质共振器
OCXO	恒温晶体振荡器	精确的,带有内置恒温箱
SAW	表面声波	低损耗小型号
TCXO	温补晶体振荡器	准确的温度控制
VCO	压控振荡器	可变频率
VCXO	压控晶体振荡器	非常准确而且可变
XO	晶体振荡器	非常准确
YIG	钇铁石榴石	准确,甚高频

1. 使用不同振荡器的原因

选择何种振荡器取决于对正弦波完美的要求。自然地,正弦波越完美,振荡器越昂贵。实际的正弦波要求由系统要求决定。例如,数字无线通信系统,如新的蜂窝电话,对来自LO的理想正弦波的要求,比调频广播站的通信系统的要求高。LO正弦波的不完美性显示为系统噪声,使系统性能降低。

2. 振荡器为何不同

在振荡器内,决定实际频率和正弦波的完美性的是一些小材料,如陶瓷或晶体。确切的频率是由材料的成分和大小决定的,读者现在应该知道所需要的频率越高,给定材料越小。

你知道吗?

有一种振荡器叫做YIG振荡器。YIG代表钇铁石榴石,这是冶金学的化合物,正好可以产生难以置信的完美正弦波。至于射频工程师是如何偶然发现这种珍品的信息的,就超出了本书的范围。

3. 如何确定频率

振荡器应该具有什么频率?为了回答这个问题,读者可以回顾一下混频器的操作。混频器加减频率,在发射机中是用来在射频信号从天线发射之前,提高它的频率。在这种情况下,混频器把两个频率加到一起(而不是相减)。如果进入混频器(IF)的信号是400MHz,我们需要输出的信号(射频)是900MHz,那么LO的频率是多少呢?我将等待读者计算。答案是500MHz。但是混频器得到两个频率,不需要的频率(100MHz)被滤波器去除,这读者已经知道了。

3.6.4 特殊振荡器——压控振荡器

一种特殊的振荡器通常称为压控振荡器或VCO。VCO就是可以对应输入电压变换输出正弦波频率的振荡器。VCO的方框图如图3-21所示。

它们如何工作

随着作用于VCO的电压变化,VCO的输出频率改变。不像一个固定频率的振荡器,VCO有一个可操纵的频率范围。所有规则也适用于VCO:频率范围越宽,振荡器越贵,性能越差。在这种情况下,性能差指的是正弦波的不完美性。当射频工程师设计一个需要VCO的系统时,就选择一个足够宽的频率变化范围的振

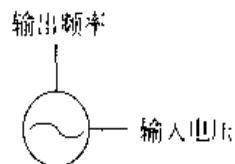


图 3-21 压控振荡器(VCO)的方框图

荡器来满足要求,但 VCO 的频率不能更宽。

射频系统中 VCO 用在哪里?正如读者在后面的 3.3 节将会学到的,有一种调制叫做频率调制或 FM,这是应用在调频广播信号中的调制。频率调制通过使信息无线发射,同时通过使射频载波的频率变化将信息加载到射频载波中。读者认为射频系统中用什么设备来改变射频载波的频率?提示:参考图 3-21。

3.6.5 合成器

1. 使用反馈

还有一种设备与振荡器有关,称为合成器。在一些情况下,从普通振荡器出来的正弦波不够完美。最后,射频工程师发现如果振荡器与其他电路结合起来,利用反馈,可以使正弦波更完美,这就是合成器的功能:一个振荡器加上一些其他使用反馈的电路来产生完美的正弦波。

2. 锁相环

正如以前提到的,在电子系统中的反馈只是感觉某些器件的输出,如果输出不正确,就改变它的输入使它正常。这是合成器工作的基本原理,通过感应振荡器的输出,并且如果正弦波不够完美的话,在振荡器内部稍微改造一下来改善它的性能。当合成器执行反馈时,它们有时称为锁相环或 PLL。

实际生活中的合成器非常复杂,也很昂贵。它们可以完成许多功能而不仅仅是反馈。合成器的一个功能就是完成频率的可编程性。合成器的输出频率可以是渐变的,也可以从一个离散频率迅速变到另外一个频率。由于这些离散频率,一个合成器就像一个内部装有几个不同频率振荡器的盒子。系统可以选择合成器输出哪个频率,这样,合成器可以即时转换到不同(振荡器)频率上。这种在两个不同频率间迅速转换的能力在保密军事通信中很有用,在最新的数字无线通信中也有用。

3.7 快速回顾

3.7.1 发射机和接收机方框图

为了快速回顾前面讲到的内容,使用如图 3-2 和图 3-1 所示的射频信号穿过通用发射机和接收机的方框图说明之。这里重复这两个图是为了方便,见图 3-22,图 3-23。

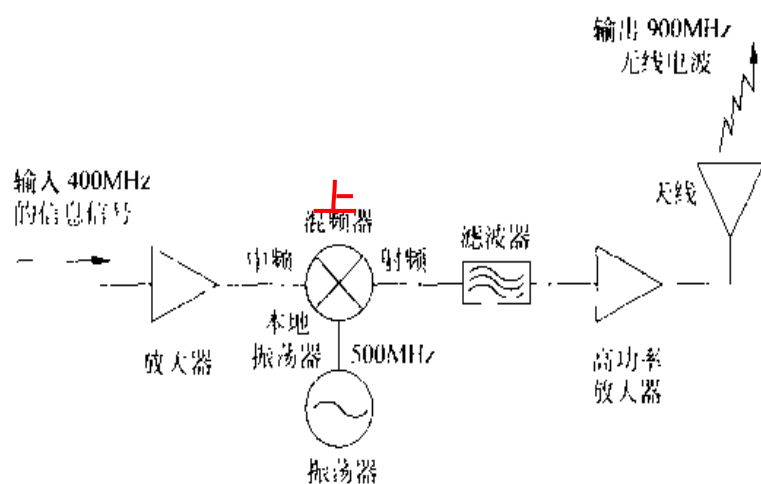


图 3-22 发射机方框图

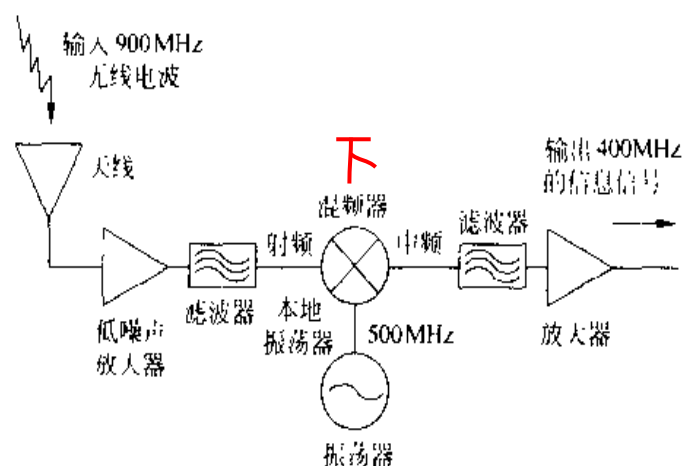


图 3-23 接收机方框图

3.7.2 回顾

1. 发射机

从图 3-22 的发射机开始,电源连到振荡器,输出一个 500MHz 的完美正弦波。接下来,输入另一个已经装载要发射的信息(400MHz)的信号。首先放大输入的 400MHz 信号,因为它对于混频器的使用来说可能不够大。在这种情况下,混频器是一个上变频器。从混频器出来两个信号 900MHz 和 100MHz,由于这是发射机,更低的频率将被随之而来的滤波器去除。最后,信号进入天线(如导线上的电流)之前通过 HPA 放大,以不可见波输出,通过空气传播。

2. 天线

如果天线是全向天线,那么发射信号到处传播;如果信号足够大,并且没有障碍物,信号

将会进入指定接收机的天线。注意：信号也会进入非预定的天线束，比如邻居的蜂窝电话。事实上，信号同样到达了非预定接收机，但是此后信号将停止了，因为在蜂窝电话内的数字信号处理器(DSP)会忽略非预定信号。DSP 功能的一个简要的回顾在 7.4.1 节中介绍。

3. 接收机

预定接收机天线将不可见波转化成导线上的电流。信号由于路径损耗和吸收变弱。在它发挥作用之前，需要将它变大(放大)。所以它被送进 LNA，此后它就大得可以被“看见”，然后滤波器去除所有通过天线进入的不需要信号(噪声)。

现在，通过从 900MHz 信号中减去 500MHz 恢复原始 400MHz 信息信号。这是通过给另一个混频器(下变频器)发送信号来完成的，此信号是由与发射机相同频率的振荡器反馈回来的。混频器的输出将得到两个信号(和与差)，一个是 1 400MHz，另一个是 400MHz。高频信号通过滤波器去除。最后，因为信号已经通过阻碍，所以它利用最后一个放大器有了一点增大。原始 400MHz 信息信号通过无线方式从一点移到了另一点。生活是不是很精彩？

你知道吗？

对于一个被正确接收的无线信号，它并不需要非常强大。由于无线通信系统的路径损耗和吸收，接收信号通常是百万分之一瓦的数量级(称为微瓦)。它是看不见且极小的，但是非常有用。我喜欢射频。

第4章 其他器件

除了以前章节讲到的5个基本器件外,在射频系统中还有许多其他器件。其中一些器件非常容易理解,另一些则不然。这些器件大部分完成一个或两个目标。它们从不同方向或多个方向发送射频信号,或者改变信号的大小和形状。所有这些“其他”器件在射频系统中有效地合作,并最终完成无线通信。记住,任何时候的目标都是获取正好大小且仅有一个频率的理想正弦波。

本章将讲述11个用于射频系统的器件及其衍生件。开关、分配器、组合器、耦合器、循环器、隔离器,在系统内的一个或多个方向上重新路由选择射频信号。这些器件的一个主要设计目标是在重新路由选择信号时,使插入损耗最小化。另一方面,在保持射频信号形状的同时,衰减器、变换器、检测器、移相器和相位检测器改变射频信号的大小和本质。就像前面章节所讲到的器件,这些其他器件中的每一个都可以用来优化一个或两个主要参数。至少可以给出一个它们被用在无线系统中的例子。

和第3章中讲过的5个器件不同,本章列出的器件通常由很少的公司生产,因为它们不常用。这为生产这些器件的小型厂家提供了一个规模虽小,但利润丰厚的商机。

还有一些其他用于射频的深奥的器件超出了本书的范围(如果读者真想了解它们,那么先读一个工程学位)。本章的目的是想让读者了解除了用于发射机和接收机的5个基本器件,射频电路有多么复杂。

4.1 开关

4.1.1 方框图

开关的方框图见图4.1。

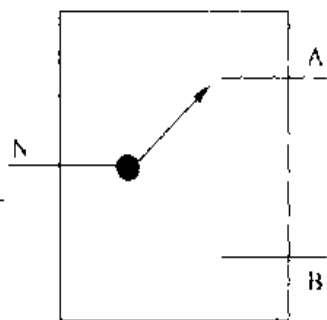


图4.1 单极双掷开关方框图

4.1.2 开关的功能和性能

1. 功能

开关完成读者所想像的工作：它们改变射频信号的路径，就像火车铁轨的转辙器。参考图 4-1，除非在最后被转到轨道 B，否则一个顺着轨道 N 传输的射频信号将被引导至轨道 A。一个有趣且需要注意的事情是，一些开关可以双向工作。任何在两个方向上工作得很好的器件通常被称为双向的。如果在图 4-1 中的开关是双向的，那么两个火车（射频信号）能同时从轨道 A 和 B 过来，但是只有一个连到 N 的能通过。所有开关都是有源设备（也就是说它们需要一定的功率来实现功能）。

2. 性能

当设计射频开关时，射频工程师需要注意两个关键性能参数。第一个重要的性能参数是损耗。射频开关有两种不同的损耗。在图 4-1 的例子中，一个射频信号从 N 到 A 将会经历一些损耗。从 N 到 A 的路径是低损耗路径，射频信号所经历的损耗叫做插入损耗（记得插入损耗吗？）。在射频开关的（闭路）低损耗路径中插入损耗是 1dB 或者更小。另一方面，如果 N 点信号想到达 B，将不会成功，因为从 N 到 B 的路径是开路，所以是高损耗路径。可以这样想，开路同样也有插入损耗（只是比闭路的要高）。但是，射频工程师终归是工程师，感到有必要把这个开路中的“高”插入损耗称为绝缘。开关中的绝缘可以被看成是开路的插入损耗。射频开关中的绝缘由许多因素决定，但是最小的有用绝缘大约是 20dB。

几乎在每种情况下，射频工程师总想要设计出有尽可能低的插入损耗和尽可能高的绝缘的开关。同射频中的其他器件一样，射频开关也可制成有超级低插入损耗和（或）超级高绝缘（这取决于价格）。

另一个重要的性能参数就是转换速度，它可以用来测量开关从一个位置转换到另一个位置所需要的时间。通常地，对于一定价钱及给定使用开关的类型，射频工程师需要尽可能快的转换速度。

4.1.3 开关的类型

1. 机电开关

在射频系统中，有两种基本类型的开关：机电的和固态的。机电开关类似于食堂里控制灯的墙壁开关。在机电开关中，控制信号在交换过程中引起接触，改变物理位置。机电开关的优点就是它们可以处理高功率射频信号，因为它们的插入损耗很低，而且绝缘很高。由于这个原因，它们经常用于射频测试设备中。相比之下，关于机电开关的其他性能都是坏

的。它们又大又沉,转换速度慢,损耗又高(此外,它们还很可怕)。机电开关的转换速度在毫秒数量级(千分之一秒),这在射频世界中是永恒的。图4-2展示了3个机电开关。



图4-2 机电开关,Dow-Key微波公司提供

2. 固态开关

另一种开关是固态开关,这意味着这种开关的核心是某种半导体设备。和机电开关不同,当这种开关转换时,在固态开关内没有东西真正动。这使它们工作非常快,尽管它们不能像机电开关那样处理大信号。固态开关的转换时间是纳秒级的(十亿分之一秒)。固态开关如图4-3所示,它由二极管或晶体管做成,读者将会在第5章半导体中学到这些。为什么有两个选择?因为二极管开关的插入损耗很低,而晶体管做成的开关速度极快。

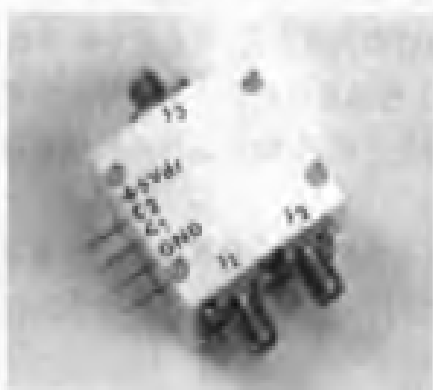


图4-3 固态开关,JFW企业提供

3. 电极和射程

所有的射频开关按照电极和射程分为不同类型(听起来像奥运会)。参考图4-1,开关中央的大圆点称为电极。电极就是连接开关活动部分的铍链。一个开关可以有一个或多个电极。本质上说,每个电极代表开关内一个分离的开关,但是,单个开关内不同电极不是独立的,它们同时进行转换。

射程是开关可以转换的不同位置。在图 4-1 中,开关可以被掷在两个不同的位置 A 和 B,因此开关是两掷开关。事实上,图 4-1 中的开关称作单极双掷开关。一个开关可以有任意的掷程。一个 10 掷的开关可以有 10 个位置转换,从 A 到 J。一个双极双掷(DPDT)开关的方框图如图 4-4 所示。注意到,它有两个电极(大圆点),每个电极可以两掷(位置),因此,是双极双掷。

这里有个有趣的问题。如果双极双掷开关缩写成 DPDT,图 4-1 中的单极双掷开关将怎么缩写? SPDT。还有个复杂的,单极四掷开关怎么缩写? SP4T。我认为我已经把这个讲透了,因此我想读者可以推测出任何读者未来可能遇到的开关的缩写,这还是值得的。

你知道吗?

有一种射频开关叫做单极单掷(SPST),这意味着开关有一个输入(单极)且只有一个输出(单掷)。这引出了问题,当 SPST 开关没有接到一个输出上,而射频信号加到输入上了,信号将往哪里走? 信号被反射,这就是为什么 SPST 开关只用在低功率应用中。

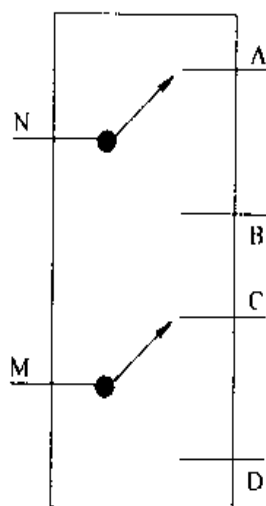


图 4-4 双极双掷开关方框图

4.1.4 系统应用

射频系统中的开关在哪里? 假设一个蜂窝电话想用它的天线既接收又发送。电话将使用 T/R 开关,天线连接到 N 路径,接收机连到 A 路径,发射机连到 B 路径,如图 4-5 所示。而且,每次信号进入时(对方在说话),将天线转换到接收机路径上,每次信号出去时(读者在说话),将它转换到发射机路径上。

T/R 开关不仅能很好地工作,而且省去了再用一根天线,而且那恰恰就是许多手机工作的真实情况。

任何既连到发射机又连到接收机的开关如图 4-5 那样,被称为发射接收开关,或简称 T/R 开关。

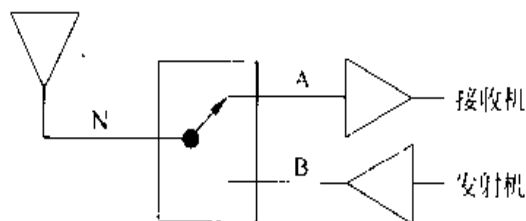


图 4-5 位于天线、发射机和接收机之间的 T/R 开关

4.2 衰减器

4.2.1 方框图

衰减器方框图见图 4-6。

4.2.2 衰减器的功能

衰减器就是反放大器。通用衰减器的方框图如图 4-6 所示。很难相信的是,有时在无线系统中补丁信号太大,这就需要引入衰减器。通过衰减使信号变小。读者可以回忆一下前面的章节,衰减是插入损耗的结果。衰减和插入损耗是等价的。衰减器允许射频工程师在电路中安装一个已知量的插入损耗。

表面上看,一个大的信号在左侧进入衰减器,在右边以一个更小的信号离开。其他的信号跑到哪里去了?读者现在应该知道了:热量。这就是为什么衰减器总是伴随着最大的功率比率。它说明了在衰减器不熔化的情况下能处理的最大的射频输入功率。衰减器也可以由图 4-7 所示的方框图说明。

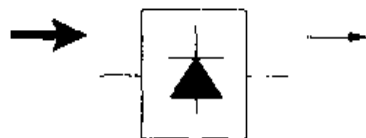


图 4-6 通用衰减器的方框图

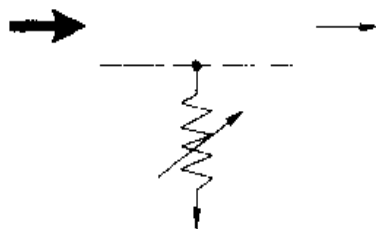


图 4-7 通用衰减器的另一种方框图

为了证明一般射频工程师的复杂个性,在一些射频系统中放大器后立刻跟随一个衰减器。现在谈谈工程师的犹豫不决。他们不能决定是否需要一个更大或更小的信号。其实这样做有电路方面的合理原因,但是其解释超出了本书的范畴,而且可以简单认为射频工程师就是很令人费解的。

4.2.3 衰减器的类型

1. 固定衰减器

衰减器可以分为两种类型:固定的和可变的。正如名字所暗示的,固定衰减器,使信号经受固定量的损耗,以 dB 来度量。有时固定衰减器被称为常量衰减器。一个典型的固定

衰减器可能会表现出 3dB 的插入损耗,因此是 3dB 衰耗器。在这个例子中,出来的信号是进去信号的一半大小(-3dB 等于除以 2)。一对固定同轴衰减器如图 4-8 所示。注意到它们就像金属圆柱块,这就是它们的本质。固定衰减器是无源器件。



图 4-8 固定同轴衰减器, JFW 企业提供

2. 电压可变衰减器

另一种衰减器叫做可变衰减器。可变衰减器允许射频工程师在任何时候通过使用外部控制,来控制确切的衰减(插入损耗)量。有两种不同类型的可变衰减器:电压可变衰减器(VVA)和数字衰减器,两者都是有源器件。

电压可变衰减器在给定衰减范围内变化衰减,受外部控制电压控制(我猜那是为什么称它为电压可变衰减器的原因)。例如,一个 VVA 可以标注为衰减范围是 $2\text{dB} \sim 30\text{dB}$,这意味着通过变换控制电压,可以得到从 2dB 到 30dB 的任何连续插入损耗。如果需要的话,它甚至可以调整到 π 衰减(3.14dB)。VVA 被用在系统中需要插入损耗的地方,通常用在和反馈的连接中。

3. 数字衰减器

另一种可变衰减器是数字衰减器。不像 VVA 的单输入控制,数字衰减器有多个输入控制,每个控制不同的衰减值。最容易的理解就是把数字衰减器看成是一束固定衰减器,它们都在一排,可以在任何时候换进电路或者换出电路。精妙之处在于每个随后的“固定”衰减器是前面衰减器的两倍衰减值。快速看一下图 4-9 将会把事情解释清楚。

一个射频信号在左侧进入数字衰减器,在它从右侧出去之前,通过了 4 个固定的衰减器。如果信号通过的每个衰减器处于开启状态,每个衰减器就产生显示的衰减值;如果衰减

器处于关闭状态,衰减的值是零。每个衰减器通过各自的控制行 ABCD 进行开关。这样信号经历的总衰减可以从衰减器全关掉时的 0dB 变到全开启时的 30dB。但是注意到,衰减值并不是连续地从 0dB 变到 30dB。它不能够在两个端值之间取任意值,只能是通过 4 个衰减器的不同组合的相加。例如,衰减 20dB 是可能的(通过关掉 2dB 和 8dB 衰减器,打开 4dB 和 16dB 衰减器);但是,哎呀, π dB 的衰减是不可能的。要想得到一个衰减值需要一个 VVA。

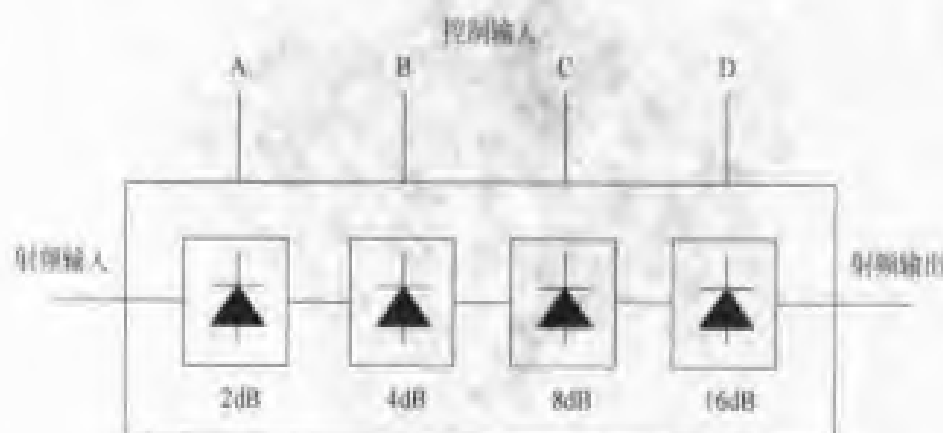


图 4-9 数字衰减器方框图

数字衰减器可以被同类型的在计算机内的信号控制,这就是为什么当射频工程师想在电路中编程衰减量时使用数字衰减器。一个数字衰减器如图 4-10 所示。从外部看不到什么,但是内部却是非常复杂的电路。同时,比较图 4-10 的数字衰减器和图 4-8 中的固定衰减器。它们看起来区别很大,很难想像它们都是衰减器。



图 4-10 数字衰减器,Mini-Circuits 公司提供

各种类型的衰减器的主要参数就是准确性。无论是固定的还是可变的,衰减值不仅要求量的确切值,而且衰减值不能随时间、温度或其他因素改变。

4.3 分配器和组合器

4.3.1 方框图

分配器方框图见图 4-11。

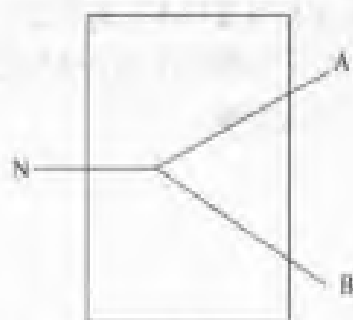


图 4-11 两路功率分配器方框图

4.3.2 分配器和组合器的功能

分配器负责信号分配。表面上看,一个信号顺着路径 N 游荡(看图 4-11),信号功率的一半顺着路径 A,而另一半顺着路径 B。信号被分成了两部分。它的形状保持不变,但是功率减小了。分配器也叫做功率分配器。

分配器可以被分成两个或更多个部分。4 路的功率分配器还有路径 C 和 D,原始信号的 $1/4$ 功率进入每条路径。分配器在所有的输出中,均匀地分配输入信号。

如果反过来,两个不同的信号通过路径 A 和 B,那么信号在路径 N 将成为两个信号的组合。读者认为射频工程师管这个反向分配器称作什么? 组合器。一个双路功率分配器(组合器)如图 4-12 所示。所有的功率分配器和组合器都是无源器件。



图 4-12 双路功率分配器,TRM 有限公司提供

4.3.3 系统应用

为什么需要分配器?可能是无线系统在同-一个地方需要使用两个相同的发射机(不要问为什么)。两个发射机需要两套东西,包括两个功率放大器、两个混频器、两个信号源等。如果单独使用一个振荡器,它的输出分成两部分(通过分配器)。一个信号送到一个混频器,另一个信号送到另一个混频器。假定分配器比振荡器便宜,这就减少了硬件的成本。在射频系统中,当射频工程师想把相同的信号发往不同的地方时,就使用分配器。

组合器和分配器以及其他大部分无源器件的关键性能参数是插入损耗。插入损耗越低,信号通过器件的能量就越多。这是好事。

4.4 耦合器

4.4.1 方框图

耦合器方框图见图 4-13。

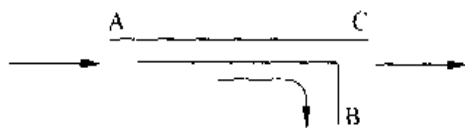


图 4-13 定向耦合器方框图

4.4.2 耦合器如何工作

为了理解耦合器是如何工作的,我将用品酒来进行类推。在买一瓶昂贵的葡萄酒时,读者需要品一下样品。样品不需要很多,读者就可以知道自己是否需要享受整瓶酒。这就是耦合器工作的原理:仅仅替换掉样品酒,对射频信号取样。

表面上,一个信号在 A 点进入耦合器(如图 4-13),通常到达 C 点。此外,当它从 A 到 C,信号的一小部分被虹吸掉,在 B 点被取出来,B 点称作取样端口。B 点信号是取样信号。对取样信号做些什么呢?要做许多事情。

想像一下射频信号有颜色。假如目标是要从天线发射一个橙色的信号。在信号辐射出来之前,在天线前放置一个耦合器来对信号进行采样。只要样本是橙色的,就万事大吉。但是如果耦合器采样的信号变成了红色怎么办?在这时,采样会告诉电路的其他部分准备黄色,这恰恰就是耦合器的作用。一个耦合器对一个射频信号采样,如果有什么不对的地方,返回时就告诉其他器件进行改变。如果读者用心了,就会认出来这可解释为反馈。在射频

系统中耦合器经常用作反馈电路的一部分。一个定向耦合器如图 4-14 所示。耦合器是无源器件。



图 4-14 定向耦合器, TRM 有限公司提供

4.4.3 耦合器的类型

1. 定向和双向耦合器

上面讨论的耦合器是定向耦合器,这意味着它有一个采样端口,只在一个方向工作。定向耦合器的堂姐妹是双向耦合器。双向耦合器在两个方向上工作,有两个采样端口(由于射频的离奇本质,需要分离的采样端口来采样相反方向传播的波)。

另外可以把定向耦合器看成是双路的分配器,其中功率被不均匀分配:99%的功率到达输出,1%到达采样端口。

除了插入损耗,定向耦合器的关键性能参数是耦合准确性。为了使耦合器工作正常,必须确切地知道从采样端口出来的信号量,不能随着频率、时间、温度或其他因素变化(影响因素不能太多)。

2. 正交耦合器

就在读者认为已经掌握了耦合器这个领域时,射频工程师们又发明了一个全新类型的耦合器,称作正交或兰格耦合器,也称作正交混合。不像定向耦合器带有采样端口,正交耦合器几乎和双向功率分配器完全一样。它们的输出功率在两个输出间被均分。兰格耦合器的方框图如图 4-15 所示。

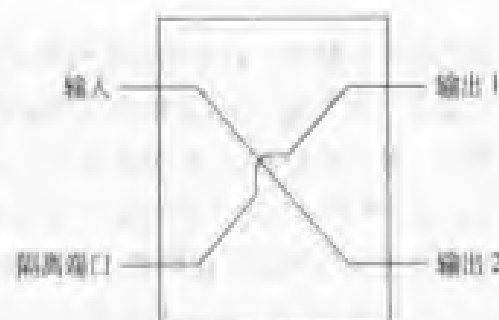


图 4-15 兰格耦合器方框图

在正交耦合器和双向功率分配器间一定有些区别,对吧?是的,这也正是射频的精妙之处,但对它的进一步描述超出了本书的范围;这并不会阻止我来解释它。在双向功率分配器和正交耦合器间的区别就是在正交耦合器中两个输出是反相的(如果不明白这是什么意思,

循环器是如何工作的? 建立在电磁定律基础上, 循环器结合磁铁和一种特殊类型的材料即铁素体来完成这奇特的功能(铁素体是磁场里的一种材料)。现在读者在社交谈话中随意地说出铁素体这个词, 可以给朋友留下深刻的印象。



图 4-17 隔离器和循环器, Nova 微波公司提供

4.5.3 系统应用

在射频系统中, 循环器用在哪里? 回头想刚才的那个例子, 开关是用来连接天线和收发机的。如果开关被换成图 4-18 中的循环器将会怎么样?

如图 4-18 所示, 依照循环器的规则, 任何从天线进来的信号顺着循环器的特定路线到达预定的接收机。任何从发射机出来的信号顺着循环器的特定路线到达预定的天线。最后, 从接收机出来的信号, 等一下, 不应该有任何信号从接收机出来。循环器就像一个智能开关, 不必实际去转换什么。顺便提及一下, 循环器是无源器件。

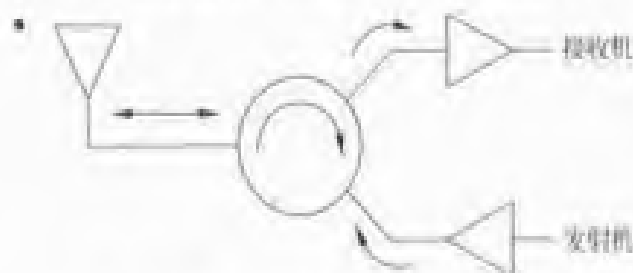


图 4-18 天线、接收机和发射机之间的循环器

4.5.4 隔离器

有一种特殊类型的循环器, 其中 3 个端口中只有 2 个可使用, 称作隔离器。事实上, 第三个(没使用的)端口被充入一块某种材料(称为电阻或负载), 惟一的目的是分散热量。它被称为负载的原因是它使电路断开。回顾一下关于匹配的讨论, 如果电路是开路, 射频能

量将被反射回去。负载不是使能量反射回来,而是接收射频能量,然后将其全部转化为热量。好了,我解释了我对循环器的认识,但是隔离器有什么用途呢?

回到匹配的讨论上,当两个射频器件连接在一起,一些射频能量将泄漏。事实上,它并没有泄漏出去,而是从它来的地方反射回去。想像一下发射机中的那点,在那点上功率放大器连到天线上。功率放大器输出很大能量,其中一些能量反射回放大器。功率放大器就像是学校里的暴徒,它们可能输出 50W,如果有 2W 或 3W 反射回来,它们就会哭着去找原放大器。有的会由此发生爆炸。

图 4-19 表示了一个放置在天线和功率放大器(在发射机里)之间的隔离器。在这种情况下,从功率放大器出来的大部分高功率射频信号到达天线,并且以不可见波输出。但是,有一小部分从天线反射到功率放大器。但是在信号到达功率放大器引起损耗之前,信号由隔离器引导进入负载,在那里信号被无损害地以热量形式驱散。隔离器通过将反射能量与射频设备隔离,来保护射频设备免受反射射频能量损害。图 4-17 的左侧为隔离器。

隔离器和循环器的主要性能参数是插入损耗。射频工程师希望插入损耗尽可能小,只有很小一部分信号损耗(以热量形式),大部分的信号达到目的地。

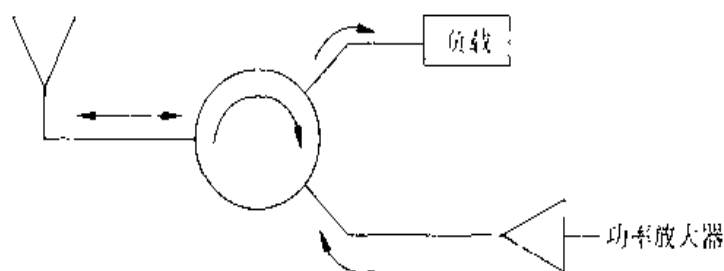


图 4-19 功率放大器和天线之间的隔离器

4.6 变换器

4.6.1 方框图

变换器方框图见图 4-20。

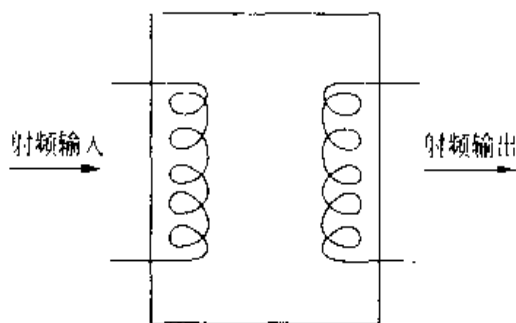


图 4-20 变换器方框图

4.6.2 变换器的功能

在关于匹配的讨论中,提到了对于所有的器件有一个标准的输入和输出的大小,是 50Ω 的阻抗。当一个设备的输出和另一个设备的输入阻抗都是 50Ω 时,两个设备就直接连起来,稍微有些不匹配(泄漏)是可以容忍的。但是,有时一个设备的输入或输出和 50Ω 相差很远,却又和另一个正好有 50Ω 输入的设备相连接,将导致严重的不匹配(泄漏)。在这种情况下需要一个匹配电路,所以采用变换器。它可以将错误的阻抗(可能是 100Ω)转换成正确的阻抗(50Ω)。这样带有错误阻抗的设备可以被利用起来。变换器就是由阻抗匹配电路代表的实际设备,在图 2-6 中用图形表示。变换器的方框图如图 4-20 所示。

回顾一下与花园里的软管类比,想像着试图将两个大小不同的软管连在一起。为了使大软管适应小软管,需要在两个软管中放置变换器,这正是射频变换器的功能。两个小的表面安装变换器,如图 4-21 所示。如果读者仔细观察,读者可以看到电线卷成一圈,这就是图 4-20 曲线所代表的。

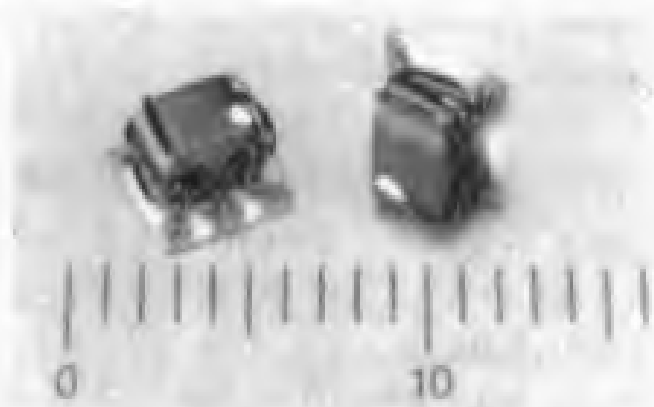


图 4-21 表面安装变换器,Coilcraft 有限公司提供

你知道吗?

在射频世界,前缀“trans”使用太频繁,所以射频工程师缩写成字母“X”。所以,变换器一词缩写成 xformer,发射机缩写成 xmitter,依此类推。现在读者可以将射频 xlate 转换成英语。

阻抗比

正如读者可以想像的,有许多错误的阻抗输出,所以有各种不同的变换器。变换器的主要性能参数是它的阻抗比。阻抗比指示变换器可以将什么样的错误阻抗变成正确的。如果阻抗比是 $2:1$,那么变换器可以将 100Ω 变换成 50Ω 。因此,当错误阻抗是 100Ω 时,应该使用一个 $2:1$ 的变换器。

变换器还有其他用途,但是它们更多地依赖于电子器件的精细。为了本书,最简单的办

法是将其忽略。在射频世界中,变换器经常被用来转换阻抗,这是思考它们的最好方式。

4.7 检测器

4.7.1 方框图

检测器方框图见图 4-22。

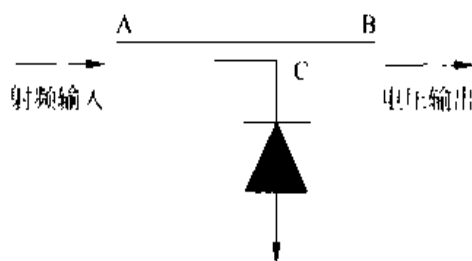


图 4-22 检测器方框图

4.7.2 检测器的功能

检测器的方框图如图 4-22 所示。如果读者认为一个检测器看起来像是一个耦合器和衰减器之间的十字架,那就对了,但是这不会对读者有什么帮助。检测器主要是功率到电压的变换器。射频功率从 A 点进入,从 B 点出来的是和射频功率成正比的电压。

使用检测器代替耦合器的原因是有一些检测设备和非射频器件,非射频器件不能直接处理功率但是可以处理电压。在这些例子中,使用检测器来将射频功率转化为电压,然后将电压送到其他地方(在射频系统内或是一片检测设备),这样可以基于电压作一些判断。

如果读者想知道检测器看起来像什么,看看图 1-8 的固定衰减器。它们看起来几乎一模一样。事实上,就连射频工程师有时也会将它们弄混,这可以作为电路趣闻。

4.8 移相器

4.8.1 方框图

移相器方框图见图 4-23。

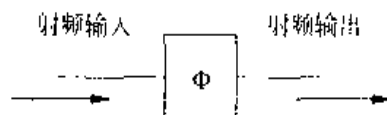


图 4-23 移相器方框图

4.8.2 移相器的功能

读者的耐心现在将会得到回报。这里读者将会学到“反相”是什么意思。首先,读者要知道正弦波有一个相位。正弦波的相位用度数来度量,一个完整的周期覆盖 360° 。参见图 1-2,从 A 点到 E 点就是 360° 。

在移相器中(它的方框图如图 4-23 所示),输入信号作为参考信号,输出信号随着输入信号改变相位。想像在一个测试设备上看两个信号,输入信号在上,输出信号在下,如图 4-24 所示。如果移相器改变输出 0° (没有相移),两个正弦波将恰好互相重合(在图的左侧)。在这种情况下,两个信号“同相”。当相移增加到 90° 时,从检测设备上看输出信号将左移四分之一波长(图形的右侧)。这两个信号相差 90° 。

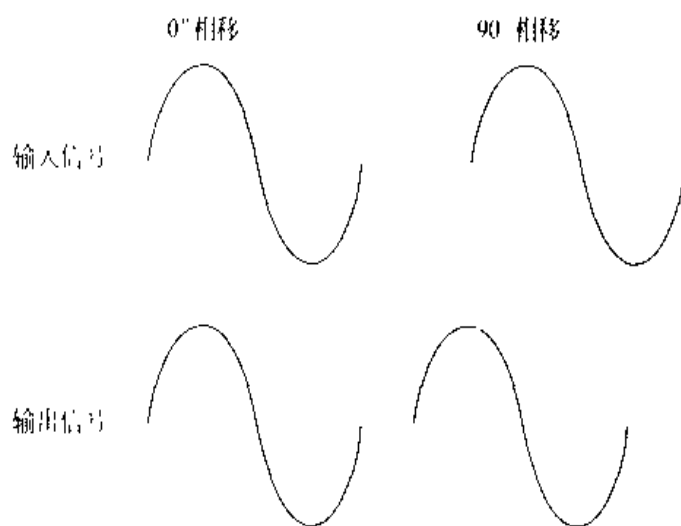


图 1-21 移相器举例

由于许多很显然的原因,能根据另一个信号准确控制一个信号的相位是很有用的,这就是移相器的由来。移相器是可变的或是固定的。在可变移相器中,相位可以根据外部控制连续变化。当测试射频电路或使用反馈(读者知道这是什么)时,经常需要用可变移相器来优化射频电路的性能。一个固定移相器有一个设置值,普遍使用 90° 或 180° 。移相器可以是有源的或无源的,就像许多其他射频器件,移相器通常由二极管做成。

你知道吗?

在移相器方框图中间的符号是希腊字母 Φ 。全世界的射频工程师都用 Φ 来表示相位,在射频世界中,还使用其他希腊字母,如 λ 代表波长, ω 代表频率。读者可能会认为只有联谊会学院才用希腊字母。

4.9 相位检测器

如果相位改变不能被检测出来,改变射频信号的相位偏移就没有什么好处。这就是检测器的由来。一个相位检测器有两个输入和一个输出(没有相位检测器的方框图的原因是,它通常是一个写着“相位检测器”的盒子)。两个不同的正弦波作为两个输入,输出的是一个和相位差成正比的电压值。

相位检测器不同于前面章节讨论的检测器。前面提到的检测器将一个射频信号转换成等效电压,因此相位检测器将两个正弦波的相位差转换成等效电压。

相位检测器可以用于解调过程中将数字信息与射频载波分离。相位检测器是由什么做成的?最简单的相位检测器就是双平衡混频器,RF和LO端口是输入,IF端口是(电压)输出。

4.10 器件回顾

这里回顾一下第3和第4章所学过的器件。表4-1通过类型和功能可以快速回顾。

表 4-1 器件回顾

器 件	有源/无源	主 要 功 能
天线	均有	转化为无线波和从无线波转化过来
放大器	有源	使信号变大
滤波器	无源	通过频率分离信号
混频器	均有	增加/减少信号的频率
振荡器	有源	产生理想的正弦波
开关	有源	改变信号传播方向
衰减器	均有	使信号变小
分配器	无源	分裂信号
组合器	无源	将信号加到一起
耦合器	无源	以不平等比例分裂或增加两个信号
循环器	无源	在三个器件中控制信号流向

第 5 章 电路和信号

本章将把所有讨论过的器件联系起来。介绍 3 种用于制造射频器件的电路技术：离散、混合以及 MMIC。它们的区别很显著，在特定情况下选择某特定器件的原因也很明确。下面将从性能和成本的角度来讨论这 3 种技术。此外，本章将讲述 3 个不同器件的互联方案：电缆、波导和迹线。并再次指出，为什么选择一种器件而不是其他的原因。

本章还将介绍给读者两种不同的电路哲学：集总元件和分散元件。可以用这两种方式来实现一些射频器件。选择哪一种依赖于想要使用的频率。

本章将详细讲述射频半导体器件，包括用于射频电子器件的原始材料和所有射频硬件中的两个主要器件：二极管和晶体管。同时还包括对集成电路的讨论，当比较其他选择时，还讨论各自的优缺点。

本章将讲述复杂的调制原理，在无线通信中调制是指信息信号与载波信号的联合。还将讨论主要的调制技术以及它们的变体。读者会认识到数字技术在调制方案发展中的角色，这些调制方案在当今最成熟的无线系统中非常流行。

5.1 半导体

5.1.1 材料和器件

1. 固态技术

由于半导体技术的发展，无线通信才开始真正地起飞。半导体技术的另一个名字叫固态技术。把它称为固态技术的原因是半导体是一种固态材料（它可以区别于液态技术，在液态技术中电子器件由巧克力牛奶做成）。另一种很快就消亡的技术，叫电子管技术。在电子管技术中，所有的电子材料在真空中产生。电子管技术的一个例子就是在 20 世纪 60 年代的电视机中所用的真空电子管。许多老的电子管实际上就是射频放大器。在那些电子管中，当射频信号漂移在电子管的真空中时，射频信号就被放大了。

真空电子产品除了个别以外（比如非常高的功率要求），不再用于射频通信。并不是老的电子管不能完成半导体的功能，只是半导体有两个非常吸引人的特性，而这些特性是电子管不具备的：半导体可以做得很小，而且很便宜（更不必说当读者把它们掉在地上时，它们不会碎）。

2. 硅和砷化镓

制造射频器件主要有两个半导体材料：硅(Si)和砷化镓(GaAs)，也称为“gas”。一般来说，GaAs 用于高频应用。如果一些射频器件使用了 GaAs，可能是硅在预定高频率的工作性能不好。在做选择时，射频工程师通常会选择硅器件而不是 GaAs，因为硅更便宜。

3. 更新更奇异的材料

有两种让射频世界震动的新材料，它们是锗化硅(SiGe)和磷化铟(InP)。SiGe 发展的动力是手持移动电话。直到最近，手机的输出功率放大器几乎都是由 GaAs 做成的。但是 SiGe 不仅比 GaAs 有更好的线性性能，而且更有效率。高效率可以转化为更长的电池寿命。当 SiGe 可以像普通硅器件一样便宜时，我们将期待在下一代移动无线器件中看到更多的 SiGe 器件。

InP 后面的驱动力就是高频率，可以工作在毫米波频率(大于 40GHz)。在高频时 InP 在所有材料中有最低的噪声性能。InP 还可以用来做在毫米波频率的功率放大器，但是，和 SiGe 不同，目前 InP 制造费用仍然相对比较昂贵。

4. 二极管和晶体管

在射频世界只有两种基本的半导体：二极管和晶体管。读者可能会认为只有两种基本的半导体材料将使事情非常简单，但是要知道有许多不同的二极管和晶体管，它们都有不同的用途。表 5-1 列出了用于射频系统中最流行的二极管。

表 5-1 射频二极管和晶体管类型

二极管类型	晶体管类型
PIN	MOSFET&MESFET
Schottky	Bipolar
Gunn	HBT
Inpatt	HEMT&PHEMT
Tunnel	JFET
Varactor	LD MOS

在看到有这么多不同二极管和晶体管类型而感到压抑的时候，读者要理解它们的主要区别是：它们是如何构造的以及它们是用什么材料做成的。所有的二极管几乎完成同样的功能，但是因为它们构造不同，所以在不同领域各有更高的电子性能。例如，Schottky 二极管速度快，PIN 二极管能处理大功率。晶体管也是同理。表 5-1 指出的大多数二极管类型是由硅或 GaAs 制成的，而晶体管是由硅或 GaAs 或两种材料混合制成的。

例如,读者可以买到由硅或 GaAs 制成的 PIN 二极管(至于读者为什么需要就超出了本书的范围)。每一种都有它的优点,但是单凭经验就可以知道:硅的频率更低, GaAs 的频率更高。现在有了更新更奇特的材料,读者还可以买到由这种材料制成的二极管。

晶体管变幻莫测。正如二极管一样,晶体管可以由不同材料制成,但是和二极管不同的是,当材料类型改变时,晶体管的类型也发生改变。这将在下面详细讨论。

5.1.2 二极管

在射频世界中,二极管用于许多不同器件,但是它们主要用于三种器件:开关、混频器和可变电压衰减器(VVA)(如果想知道在方框图中二极管的样子,请看图 4-6 中显示的衰减器上古怪形状)。如果 Schottky 二极管速度快而 PIN 二极管可以处理大功率,那么当开关需要快速时,应该使用哪种二极管? 如果它需要处理大功率怎么办?

正如 3.6 节所提到的,大多数振荡器使用某种材料来决定振荡器的频率。这种技术适用于低射频。对于高射频(大于 10GHz),材料的选择受到限制,所以振荡器经常使用二极管来决定振荡器的频率。在振荡器中, Gunn、Tunnel、Impatt 二极管都用来产生这些高的射频频率,尤其是 Impatt 用来产生超高射频(大于 100GHz)。

变容二极管可以看成是可变二极管,用于压控振荡器(VCO)。回忆一下第 3 章, VCO 是输出频率在一定范围变化的振荡器。可变的原因就是它用了—个可变二极管(变容二极管)来决定它的频率(所有这些材料都很有用)。

5.1.3 晶体管

晶体管在射频中广泛使用,从低噪声放大器,到大功率放大器,再到开关、衰减器、混频器、振荡器。晶体管是射频的主力,晶体管由两种不同的方法制成。它们或者做成双极型晶体管(BJT)或者称作双极,或者做成场效应晶体管(FET)。读者需要知道这两种结构的区别是双极在材料突然改变时有连接点,而 FET 没有。这两种普通晶体管类型的方框图如图 5-1 所示。

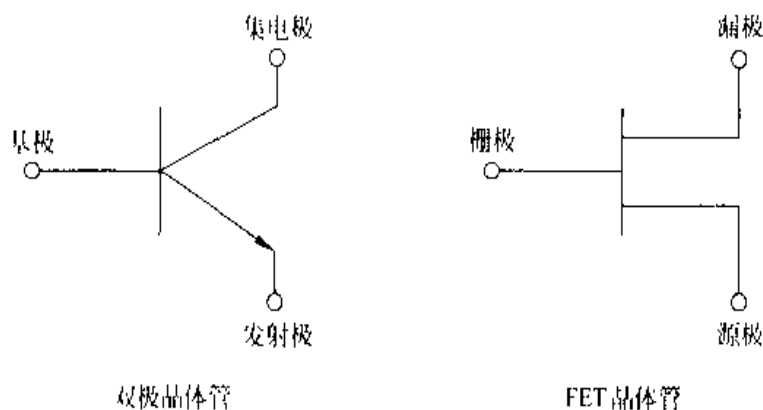


图5-1 双极和场效应晶体管(FET)的电路描述

1. HBT 晶体管

现在有一种新型的双极晶体管叫做异质结双极晶体管或 HBT。最初,BJT 晶体管仅仅由单一材料做成,通常是硅。但是一些物理博士在某些地方发现如果用多种材料做一个 BJT,可以改善它的性能。来看看 HBT,简单地说,一个 HBT 就是由多种材料制成的 BJT。所以一个由硅制成的 BJT 称作 BJT,由 GaAs 制成的 BJT 称作 HBT。正如上面提到的,当材料改变时,晶体管类型改变。

2. 晶体管的用途

这里有一个规则:如果有增益,就至少有一个晶体管。所有固态放大器使用一种晶体管。为了产生大增益,放大器需要两个或更多的晶体管。

用在射频中的最低频率(低于 1GHz)晶体管是 MOSFET,它代表金属氧化物半导体场效应晶体管(读者可以猜猜这是 BJT 还是 FET?)。直觉应该告诉读者 MOSFET 是由硅制成的(提示:低频),而且它们主要用于高功率放大器(HPA)。

当频率在 1GHz 以上时,射频工程师在双极性晶体管和 MESFET 中选择,MESFET 代表金属半导体场效应晶体管。正如读者已经知道的,BJT 由单一材料制成,通常是硅。类似地,MESFET 通常由 GaAs 制成。哪种晶体管类型更好?如果考虑成本,那么(硅)BJT 更好,因为它们更便宜。如果从另一角度考虑,晶体管需要工作在特定的高频,那么(GaAs)MESFET 更好。另一点考虑是,在晶体管类可以使用的频率上,双极性晶体管用来产生比 MESFET 更多的射频功率,而 MESFET 提供更低的噪声系数(NF)。总而言之,双极型更便宜而且产生更高的功率,而 GaAs 的 MESFET 成本更高,但是当在高频传输低噪声系数时它工作得很好。

有一种新型的 FET 晶体管,称为 LDMOS,它代表横向扩散金属氧化物半导体(我没有整理这部分材料)。一些年轻聪明的射频工程师发现,如果一个 MOSFET 制作稍有不同,它就可以在高于 1GHz 频率下工作。读者认为这些 LDMOS 晶体管用在哪里?如果读者说在 1GHz 以上的高功率放大器中,那么可以奖励一下自己。

3. HEMT 晶体管

这有一个新的晶体管家族,尤其是为超高频应用所设计的,如 HEMT 和 PHEMT,它们分别代表高电子移动晶体管和假 HEMT(读者猜猜找到一个知道“假晶”的人之前,要问多少人?)。HEMT 晶体管就是增加了一层超快半导体材料,如 InP 的 MESFET(当材料改变时,这是另一个晶体管类型改变的例子)。

想像一下普通 MESFET 中的电子就像在普通的高速公路上行驶的汽车(限速 55MPH)。HEMT 晶体管就是 MESFET,只是电子有自己的 InP 高速公路。如果电子可以运行得更快,那么晶体管就可以在更高的频率工作。HEMT 晶体管尤其适合高频、低噪

声的应用。

需要注意：当我说某些晶体管在更高频工作而其他的不行时，我的意思是说某些晶体管在更高频工作得好，而其他的工作性能不好，即便是在技术上它们都可以在更高频工作，但功率、增益和噪声系数这些电参数的下降表明了较差的性能。

5.1.4 集成电路(MMIC)

后来，一些聪明的工程师想到，如果一个放大器需要3个晶体管、两个二极管和其他一些电子器件，为什么不把所有这些好东西放到一个单一的半导体(硅或者GaAs)片上呢？这样做有很多好处，包括低成本和更小的规模。当多于一个器件的电子器件(晶体管、二极管等)融合到一片半导体上时，称它为集成电路(IC)。

现在射频工程师不把他们的器件称作集成电路，害怕人们会把它们与其他集成电路混淆，比如个人电脑里的奔腾微处理器。射频工程师把它们称为单片微波集成电路或MMIC。

前面讲过的大部分器件可以做成MMIC。MMIC并不是一个特殊的器件，它是用来制造器件的技术。例如，使用一堆晶体管来做一个放大器被称作IC放大器，而使用一堆晶体管来做一个开关被称作IC开关。

MMIC 性能

如果一个器件可以做成MMIC，就会比用其他方法做得更小更便宜(每单位)，为什么不把所有的器件都做成MMIC？MMIC有两个缺点。首先，既然它们包括半导体制造过程，如果只需要几个这样的器件，这些器件将非常昂贵。所以，只有当产品需求很大，使最初研发MMIC的投资很合理时，才会使用MMIC技术。其次，通常MMIC的性能(主要参数)比由分立器件做的器件性能要差。当器件由分立晶体管(或二极管)做成时，性能是最优的，如在低噪声放大器中的低噪声，在高功率放大器中高功率。当性能要求不是很苛刻而要求成本很低时，就使用MMIC。

快速回顾一下，射频世界里有两个主要的半导体材料：硅和砷化镓。硅和砷化镓用于制造两个基本的器件：二极管和晶体管。射频器件可以用两种方法来制造：将分立的二极管和晶体管结合起来或者使用集成电路(MMIC)的形式。

你知道吗？

有一类特殊的射频MMIC称作ASIC，它代表专门的应用集成电路。ASIC只是定制的MMIC，用于完成一个专门的任务，通常针对一个顾客。因为它们是定制的，ASIC必须用于大批量生产，以降低设计费用。手机很适合使用ASIC。事实上，一些人相信手机的成本会更低，在不久的将来，手机内部将只有一个单一的器件：ASIC。

5.2 电路技术

5.2.1 集总和分散电路

射频器件经常由几个不同的称为离散器件的电子器件组成。例如,当一个射频放大器是一个射频器件时,它由几个分立的电子器件组成,如二极管、晶体管,还有3个大的电阻、电容和电感。电阻、电容和电感是体形小且便宜的无源电子器件,用来形成电子信号,这些器件用在每个电路的组合中。

当电子器件组合起来,在一个预定区域完成指定功能时,就形成了一个电路。在射频世界里,电路设计有两种体系:集总元件电路和分散电路。

集总元件电路和分散电路在它们的设计中都使用相同的半导体器件(晶体管、二极管和MMIC)。不同的是它们所用的无源器件的本质,尤其是那3个大的器件,以及其他器件,如变换器和耦合器。

1. 集总元件电路

在集总元件电路设计中,电容和电感是看得见、摸得着的实物。真实电容和电感的样本如图5-2所示。在集总元件设计中,耦合器只是变换器(我告诉读者它们只是用于其他事情)。

2. 分散电路

分散电路很有趣。回顾一下1.1节,射频世界的信号通过导线传输,在电路中传播,导线通常是一个印刷电路板(PCB)或其他衬底上很小很薄的一片金属(称作迹线)。在射频频率中这些金属发生了有趣的事情:它们开始作为分立器件工作。在分散电路中,射频工程师可以用非常特殊的方式形成金属迹线,使得它们工作起来就像电容、电感、变换器甚至耦合器,这就是为什么在纯分散电路中,唯一的真实器件是半导体,其他的只是一束奇形怪状的金属迹线。图5-3表示了分散电路的例子。图左侧小区域的电路迹线形成了一个耦合器,看上去有点不同于集总元件(变换器)耦合器(把它和图4-21比较)。

当设计电路时,如何在电路系统中做选择?虽然各自有优缺点,但是做决定通常很简单。在射频世界中,频率越高,器件越小,反之亦然。如果电路在低的射频频率工作,那么器件将会相对比较大。如果器件需要更大,在分散设计中实现器件功能的电路迹线的大小和形状将会非常大。当低于一定频率时(所有这些都是在说)唯一的电路选择是集总元件设计。相反,在高于一定频率时,惟一合理的选择就是分散电路设计。在二者之间读者选择一个。

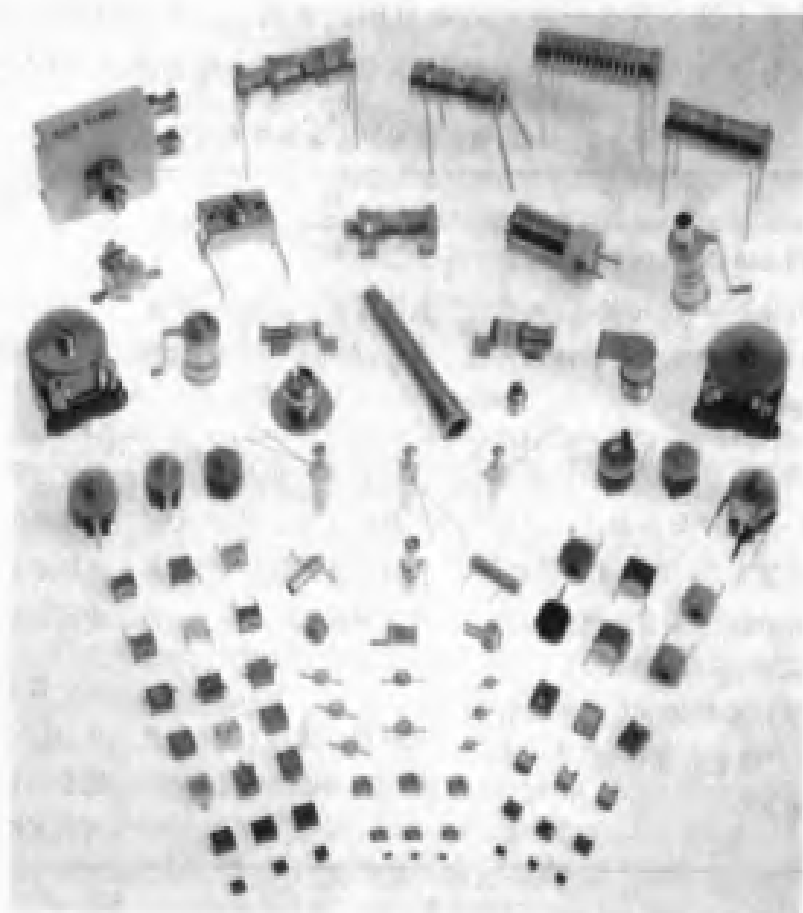


图 5-2 集总元件电容和电感, SpragueGoodman 电子有限公司提供

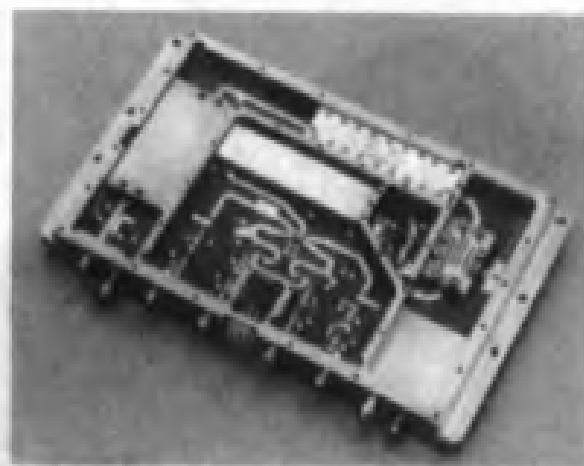


图 5-3 分散电路, JCA 科技公司提供

5.2.2 分立、混合和 MMIC 电路选择

一旦选择(规定)了一种电路系统,下一个选择就是使用哪种电路技术。这次要从 3 个不同的电路技术中选择:分立、混合(也称作 MIC,微波集成电路)或 MMIC(单片微波集成

电路)。表 5-2 说明了这 3 种选择及它们各自的优缺点。每种类型的例子如图 5-4(a)、图 5-4(b) 和图 5-4(c) 所示。图 5-4(b)(MIC) 包括了封装和裸露的碎片半导体。

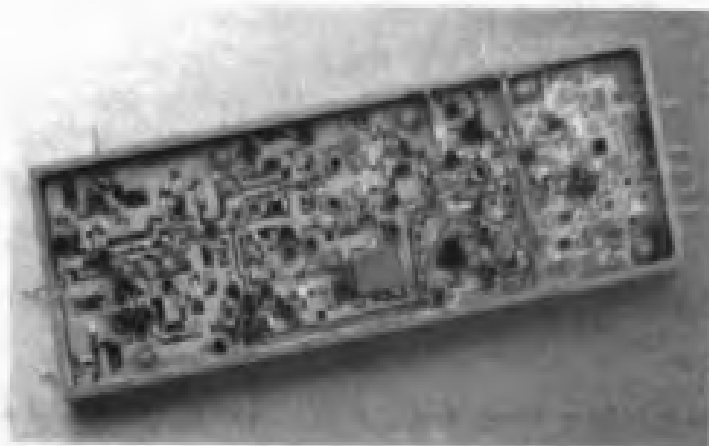
表 5-2 分立、混合和 MMIC 电路技术比较

技 术	描 述	优 点	缺 点
分立	在印刷电路板(PCB)上,融合了半导体器件(二极管、晶体管和 MMIC)和集总无源器件作为独立封装分立器件	利用现存分立器件;快速设计;高功率的优越性能	占用大量空间;高频性能下降;大批量时昂贵
混合(MIC)	在陶瓷衬底上融合了封装的和“芯片”的半导体器件(二极管、晶体管和 MMIC)、无源器件(集总和分散)和金属迹线	比分立器件更小且具有更好的高频性能;在大批量时比分立器件便宜;超高频特性	数量小时制造昂贵;比分立技术设计周期长;比分立技术需要处理更多细小问题和解决更多麻烦
MMIC	在单片半导体上融合半导体器件(二极管和晶体管)和分散无源器件	比其他方法都小;在大批量生产时比较便宜	在小数量生产时非常昂贵;很长的设计周期;和混合方法比起来性能上有所下降

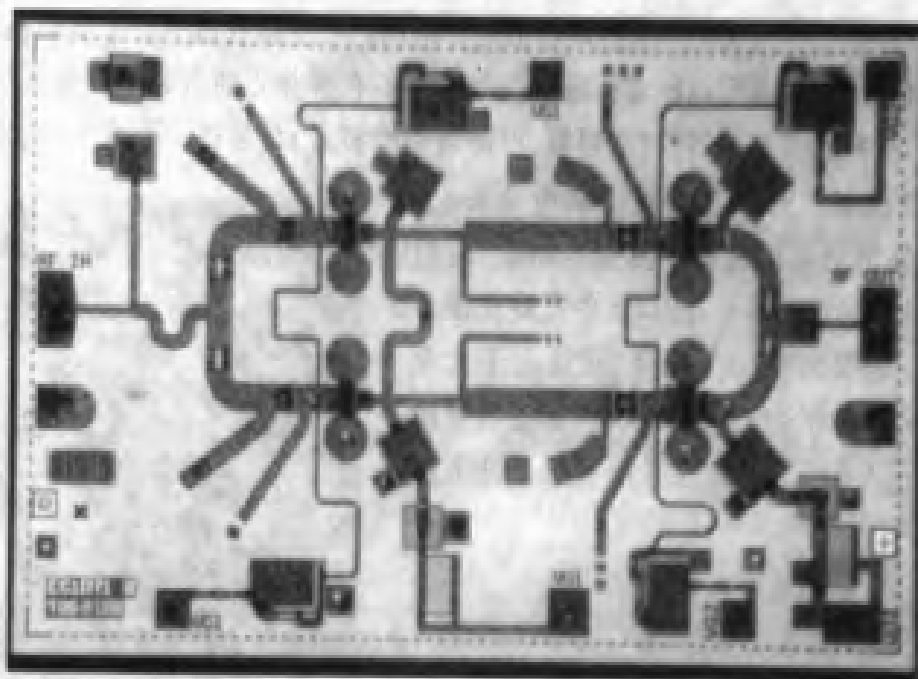


(a) 分立电路,Alpha 企业提供

图 5-4 分立、混合和 MMIC 电路



(b) 混合电路, Micro Networks 提供



(c) MMIC, TeQint 半导体公司提供

图 5-4(续)

你知道吗?

现在将分立器件放置到射频印刷电路板(PCB)上的主要方法是表面安装技术(SMT)。在 SMT 中,分立器件焊接到 PCB 的表面。现在这看起来很平常,但是在早先的电子生产中,使用一种称为穿通技术的工艺,在这种工艺中,分立器件穿过 PCB 板子上的小孔。所以即使 SMT 没有什么优点,至少它无需钻孔了。

你知道吗?

现在使用的最新的 MIC 称作低温共烧陶瓷,或简称为 LTCC。LTCC 就像 PCB (带多层迹线)一样,只是它是由陶瓷制成,而不是塑胶合成物。LTCC 允许 MIC 做得很小,在高频器件中使用很理想。

5.2.3 组件

有一些射频制造商以此为生:通过把多于一种的射频器件组合起来,完成多于一种的射频功能,封装成一个包。当一盒射频“材料”完成多于一个基本功能时,比如混频器或单一放大器,这盒材料称为一个组件。

你知道吗?

有时一个组件也称为一个子系统。现在这两种描述中没有技术上的差别,但是卖子系统的公司比卖组件的公司销售更高的价钱。那就是营销。

作为组件的例子,参见图 3-1 的接收机的方框图。一个接收机有一个混频器,混频器由振荡器供给信号,混频器后跟随滤波器。如果某些有事业心的射频工程师认为这很有商业意义,他们会将所有 3 个器件(混频器、振荡器和滤波器)封装进一个盒子,把它称为混频器-振荡器-滤波器组件。至少对于制造商来说,关于组件的好消息是因为组件复杂地制造,他们可以高价销售。但是,另一方面,组件需要花很多时间去开发,需要大量的工程师,并且由于太专业,常常只有单一的客户。因为这些,制造组件被认为是冒险的生意。当然,这并没有阻止许多制造商去尝试。

5.2.4 空穴

制造射频器件还有最后一种方法。不像其他技术(分立、混合以及 MMIC),空穴类型器件不使用导线传输射频信号。取而代之,射频信号在空穴器件内像波一样移动。

空穴电路是一种空的由金属制成的容器,射频信号在内部碰撞。空穴技术是一种相当老的射频技术,许多不同的射频器件可以被制成空穴器件,如耦合器、振荡器甚至放大器。当一个放大器是空穴类型时,称为行波管放大器或 TWT(或缩写为 TWT)(这是有意义的,带有在管形空穴中行进之波的放大器应该称为行波管放大器)。TWT 如图 5-5 所示。



图 5-5 行波电子管, Lixton 电子设备公司提供

使用空穴器件只有一个原因：高功率。当射频工程师需要放大一个大信号，比任何晶体管能放大的还要大时，他们使用空穴放大器(TWT)。当他们需要耦合一个高功率信号或滤除一个高功率信号时，使用空穴器件。直到最近，所有手机基站的输出滤波器都是空穴滤波器(猜猜为什么?)，因为基站的输出功率相对较高(空穴滤波器也碰巧有高级的滤波特性，这些特性是蜂窝发射机所要求的，但是这是另一码事)。

5.3 调制

5.3.1 调制的概念

调制是一个数学上复杂的学科，因为很容易在所有的公式中混淆，它很难量化解释。幸运的是，从表面上很好理解，下面就从这方面讲讲。

早先，我把一个数字信号描述成“骑在射频的背上”。调制是信息信号(模拟或数字)骑在射频信号(载波)背上的方式。这是通过取出射频信号，将信息信号添加到射频信号上的结果。将信息信号叠加到射频(载波)信号称为调制，完成叠加的设备叫做调制器。在射频系统，射频首先被调制然后通过发射机从天线出去。在信号到达接收机之后，上述过程将是相反的。接收信号解调(射频载波去掉)，只剩下信息信号。

为使调制形象化，可以将寄信想像成无线通信。信封是射频(载波)，里面的信是信息。为了得到从A点到B点的信(信息)，将信放进信封(信号被调制)，然后投进邮筒。一旦信封到达，将信封打开(射频被去除)，瞧，信(信息)从A点运到了B点。当无线传输信号时，发送两个信号：射频载波(信封)和信息信号(信)。将这两个联合起来称为调制。

读者可以回顾一下第3章，每个信源(振荡器)的目标就是产生一个理想的正弦波，这就是射频。需要一个理想正弦波的原因，就是调制器通过对射频信号进行小的修改，将信息信号叠加在射频信号上。如果射频信号不够理想，瑕疵将会错误地被理解成是不需要的修改(信息)。

调制器和解调器通过特殊的方式改变射频信号的某些方面，完成它们的功能。从技术上说，人们不认为它们是真正的设备或器件，而认为是子系统，是两种或更多种器件的组合。

5.3.2 调制的类型

在当今的无线通信世界，人们确实使用许多不同类型的调制(每天还在创造着更多类型)。好消息是所有调制形式可以归为3种通常类型的一种：幅度调制(AM)、相位调制(PM)和频率调制(FM)，频率调制用于调频广播。从无线通信的早期算起，AM和FM是已存在的调制方法中的古老形式。PM是新生一代，在现在的(先进的)数字无线通信系统中

使用得最频繁。

AM 和 FM 首先出现的原因是,在无线通信的初期,需要完成 PM 的精密数字芯片没有出现。数字无线通信和 PM 的发展是数字半导体集成电路技术进步的直接结果。

AM、FM 和 PM 描述了当理想正弦波接收信息信号而发生改变的 3 种方式。AM 改变正弦波的高度(随着时间流逝);FM 改变正弦波的频率(随着时间流逝),保持幅度不变;PM 改变连续正弦波的相位。这些变化都包含着信息。

1. 幅度调制

AM 改变理想正弦波射频载波的幅度,如图 5-6 所示。图 5-6 的左侧显示了一个未调制正弦波是如何出现的。注意,正弦波重复很多次。图 5-6 的右侧显示了当正弦波进行幅度调制后出现的变化。注意,虽然还是正弦波,频率不变(连续波的间隔不变),但是每个连续波的幅度(高度)变化了。从正弦波到正弦波,幅度改变,但是频率不变。如果读者用手指在右侧信号的顶部追踪,会注意到它遵循正弦波的路径,这不是巧合。

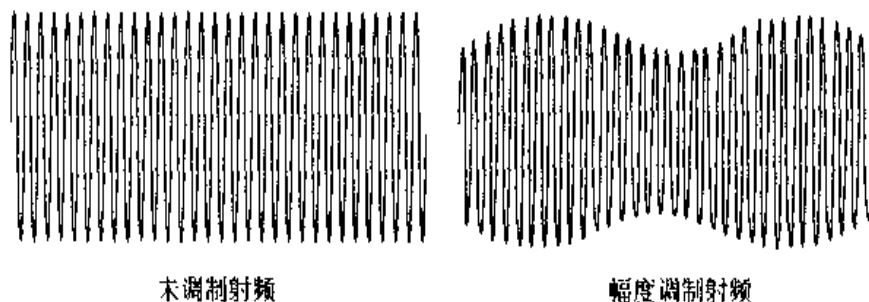


图 5-6 未经调制和已调幅的射频载波

AM 比其他调制方法使用的时间都长,主要是因为它很容易实施。不幸的是,这种实施的简单性是要付出代价的。所有射频信号传播时都会加入噪声。正如第 3 章所提到的,噪声在(射频载波)正弦波中是瑕疵。这些瑕疵经常在幅度中随机地改变。所以当噪声改变射频载波的幅度时,射频系统并不知道这些改变是否是预期的(是调幅的结果),还是非预期的(是噪声的结果)。所有这些意味着 AM 信号非常容易受到噪声干扰而失真。

图 5-6 所示的 AM 是模拟类型调幅。在模拟调幅中,系统用模拟信号调制射频载波(如正弦波)。本质上说,它将一个正弦波叠加在其他正弦波上,如图 5-6 所示。调幅已经使用了很长时间,直到最近才有所改变。

2. 二元幅移键控

新一代的调幅,在本质上是数字的,称为二元幅移键控(BASK)。模拟调幅将模拟(正弦波)信号叠加到射频(正弦波)载波,和它不一样的是 BASK 将数字信号(图 1-3 的信号)叠加在射频(正弦波)载波上(如图 5-7)。注意射频载波的形状如何模仿数字信号的形状。

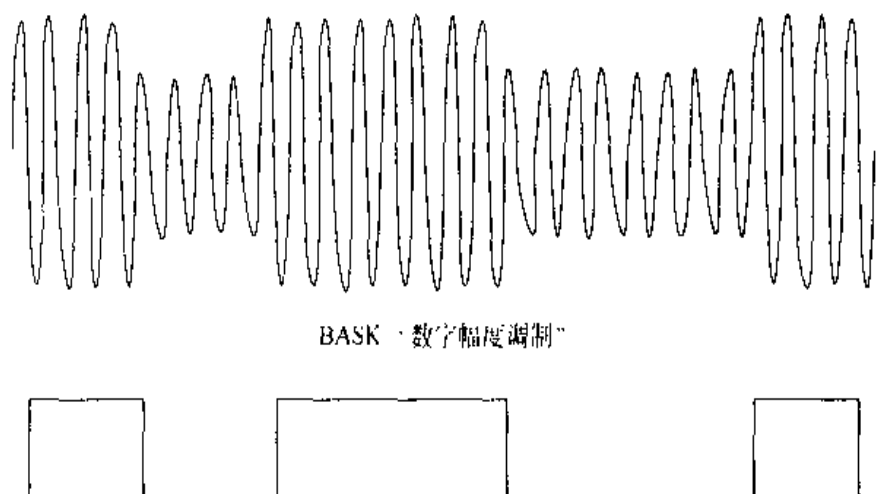


图 5-7 二元幅移键控(BASK)

BASK 不像模拟 AM 对噪声那么敏感。BASK 信号仍然容易受到噪声在幅度上的随机改变的影响,但是由于射频系统的智能性,它只是区分高和低,在两个幅度(高或低)上的微小变化不会引起系统误解为另一个信号。在当今的数字无线系统中,BASK 仍在使用,因为它不易受到噪声的影响。

顺便说一下,无论何时当读者听到“键移”这个词,应该想到两件事。首先,它包括将数字信号调制到射频载波上;其次,这些变化在本质上是离散的,与连续(在模拟 AM 中)相反。

3. 频率调制

FM 是使理想正弦波变化的第 2 种方法(如图 5-8),在这种情况下请注意,幅度保持不变(从未调制到调制),但是频率改变(连续正弦波的间隔改变)。频率的改变(随着时间)包含信息,比如手机中人们的声音(很难相信,但却是真的)。

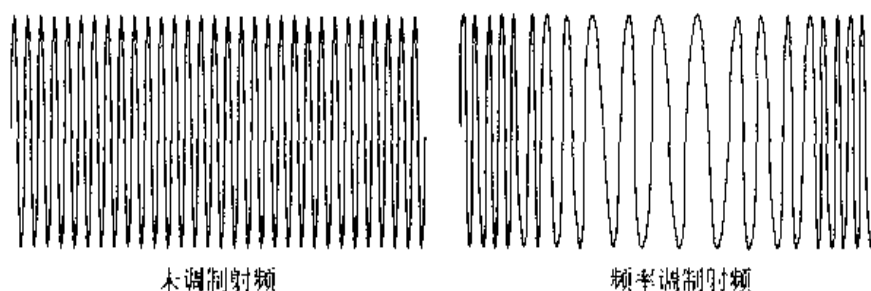


图 5-8 未经频率调制和已经频率调制的射频载波

由于世界正在数字化,读者一定已经猜到了,有一种为数字信息信号服务的频率调制类型。确实如此,我们称它为频移键控(FSK)。FSK 使用两个完全不同的频率代表 1 和 0。它依赖于输入数字比特流,在两个频率之间转换。使用什么精密硬件在两个频率之间转换?

请看关于合成器的 3.6.5 节。

FM 并不像 AM 那样对噪声那么敏感,这就是它产生的原因。AM 信号、FM 信号仍然易受到噪声在幅度上的随机改变的影响,但是由于 FM 系统的智能性只注意频率上的改变,系统不管幅度上的改变。在读者开始认为 FM 听起来像一顿免费的午餐时,你要很清楚有另一种噪声影响信号的频率,但这是另一码事。

4. 相位调制

PM 是改变理想正弦波的第 3 种方法。大部分无线发送的数字信息通过相位(或其他派生的方法)对射频载波进行调制。

正如以前在 4.8 节提到的,正弦波(射频信号)有一个伴随的相位。正弦波的相位用度数来度量,完整的一圈是 360° (见图 5-9)。相移总是用其他信号作参照。图 5-9 表示了相对于参考信号的 4 个不同相移的结果。注意, 0° 相移与参考信号完全相同(应该如此), 180° 相移是参考信号的镜像, 90° 和 270° 互为镜像。事实上,任何相差 180° 的相移都互为镜像。本质上说,每个 90° 的相移将正弦波左移四分之一。

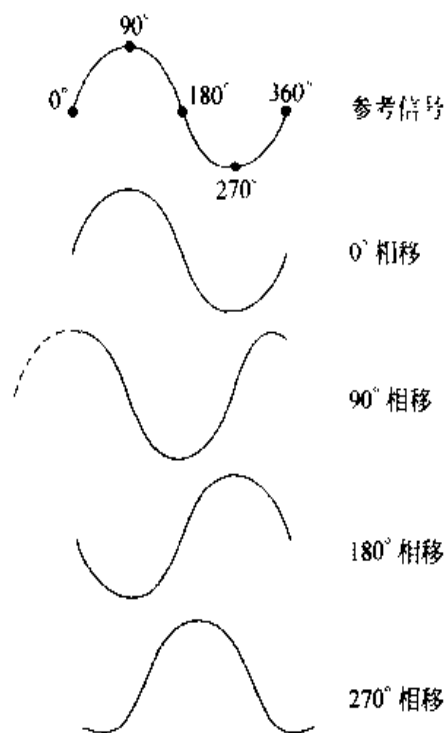


图 5-9 相移的形象化描述

你知道吗?

读者可以从任何相移加上或减去 360° ,得到完全相同的相移。也就是说,两个正弦波改变 360° ,仍同相。例如,一个 270° 的相移等于 -90° 的相移。与此类似, 180° 和 -180° 一样。这就解释了为什么读者从没在射频课本里见到大于 360° 的相移,读者可能从没看过一本这样的书。

在数字无线通信里有许多不同类型的 PM。有这么多 PM 的原因是随着半导体技术的发展,不同的调制技术也发展了。用 20 年前的电子器件是不可能实现最新最好用的 PM 技术的。在数字无线通信中使用的一些非常流行的 PM 技术如表 5-3 所示。

表 5-3 常见相位调制类型

缩写	相位调制
MSK	最小频移键控
BPSK	二元相移键控
QPSK	正交相移键控
DQPSK	差分正交相移键控
GMSK	高斯最小频移键控

相移的真正目的是,通过选择性地相移连续正弦波,在射频载波上调制数字比特流。自然地,在射频信号到达目的地后,需要一种方法从相移中取出比特流。

这些相移是如何加到射频载波上,然后又如何从射频载波中取出来的?可以回顾一下第 4 章关于移相器和相位检测器的讨论。移相器通过一定量改变正弦波。在数字相位调制中,数字比特用来选择所需要的相移。一旦射频信号到达目的地,一个相位检测器就用来将信号的相位改变转化为电压。然后电压就轻松地转化为数字比特流。当今数字无线通信中最流行的两种相位调制是 BPSK 和 QPSK,下面我们来讨论一下。

正如名字所暗示的,二元相移键控(BPSK)有两种不同的可能相移: 0° 和 180° 。由于数字比特同样有两种不同的可能(0 或 1),BPSK 可以用来在一个正弦波上调制一个数字比特。 0° 相移代表 0, 180° 相移代表 1。图 5-10 上部代表在射频载波上使用 BPSK 调制数字比特流 01101 的结果。注意到无论何时当一个正弦波平滑地跟着另一个波的时候,没有相移,所以它代表 0。BPSK 在正弦波上调制一个数字比特,这很好,但是还有更好的方法。

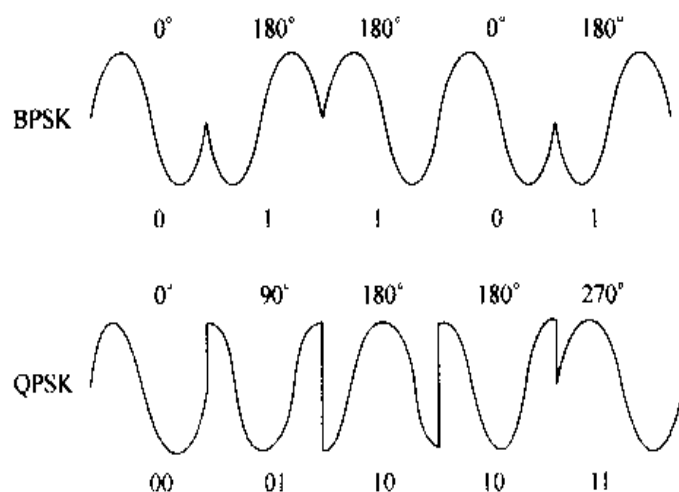


图 5-10 BPSK 和 QPSK 调制示例

如果读者猜到了正交相移键控(QPSK)有4个不同的可能相移,给自己一个奖励。它们是 0° , 90° , 180° , 270° 。组成QPSK的4个不同的可能相移可以从图5-9单独地看。由于QPSK有4种可能性,但是一个数字比特只有2种可能,所以QPSK可以在每个正弦波上调制2比特信息(我说过有更好的方法)。在这个例子中, 0° 相移代表比特00。与此类似, 90° 代表01, 180° 代表10, 270° 代表11。图5-10的下部表示了使用QPSK调制数字比特流0001101011的结果。有效的是,QPSK使射频载波的数据承载能力加倍了(与BPSK相比)。由于我们本质上都是无线数据的贪婪者,这对我们是件好事。

到现在为止,读者已经理解了相位调制,可能想知道为什么不把正弦波分成8份(45°)相移或者可能16份(22.5°)相移?那样不是会在每个正弦波上增加调制数字比特数吗?答案是肯定的。确实,减少了相移的量,绝对使在一个正弦波上增加了更多的调制数字信息比特,如在有线电视分布中,这也确实实现了。但是正如在第3章提到的,所有射频信号传播时都会引入噪声,虽然大部分噪声影响幅度,但是还有一种噪声影响相位。这种相位噪声通过不需要的射频载波相位偏移表现出来。只要这些不需要的相位偏移和调制的相位偏移相比很小,就可以保持数据的完整性。随着调制相位偏移变得越来越小(小于 90°),它们有与不需要的相位噪声混淆的危险,这就是为什么QPSK在(当今的)无线世界的相移中使用广泛的原因。

5. 正交幅度调制

现在知道了数字信息可以通过使用相位调制(QPSK,BPSK)和幅度调制被调制到射频载波上。所以读者可能想过,如果我们试图在每个正弦波上得到尽可能多的数字信息,为什么不把这两种方式联合起来呢?在今天的数字无线系统中最新使用的调制形式是正交幅度调制或QAM,它可以完成此功能(QAM是QPSK和AM的缩写形式)。

想知道一个QAM信号看起来像什么吗?可以参考图5-10下部的QPSK的例子。现在描述一下信号,交替的正弦波可以有两个不同幅度中的一个,就如图5-7那样。它看起来是一个相当复杂的信号,但是值得注意的事是它所包含的额外信息。QPSK的每个正弦波自身代表了两个数字比特。如果信号的AM部分有2个不同的幅度,那么还可以多代表1比特。所以在这个例子中,QAM信号可以包含3比特数字信息。现在,我们再看一下其他方面。

理论上,QAM可以用更小的相移来调制,多于两种可能的幅度可以将更多的数字信息填到每个正弦波上。这些QAM变量随着名字QAM-16,QAM-64等变化。但是正如读者可能已经推算出来的,这些调制通常限制在电缆应用中,因为电缆中噪声的影响被极大地减小了。

5.3.3 调制器和解调器

射频信号可以通过调制器进行调制,调制器是相当复杂的器件,但是它们可以用一个简

单的方框图来表示,如图 5-11 所示。

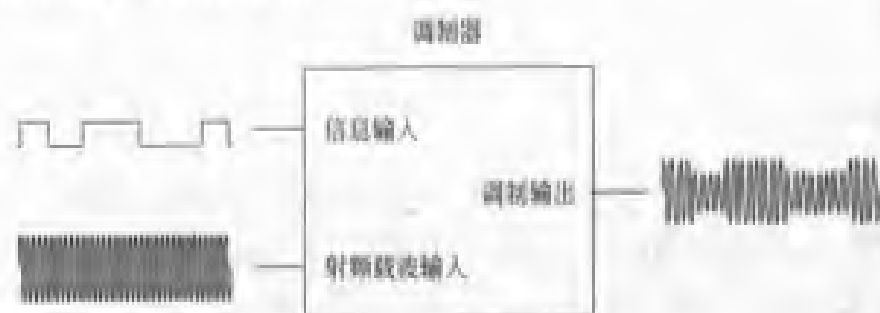


图 5-11 调制器方框图

在这个最简单的例子中,调制器有两个输入,一个输出。一个输入是信息,可以是模拟或数字形式。在图 5-11 中,信息是数字形式,另一个输入是射频载波(一个理想正弦波)。当调制器完成它的功能时,输出是两个信号的复合信号。这就是经过调制的输出信号,图 5-11 是 BASK 调制。解调器完成相反的工作:它们取出调制信号,把它分解成一个信息信号和一个载波信号。解调之后,载波就不再需要了,所以当信息信号被发送到系统中的其他地方以备其他用途时,载波信号就被忽视了。大多数时候调制器和解调器组合成一个单元,读者认为调制器和解调器的组合应称作什么?想一想。

使用什么器件来作调制器和解调器?读者可以继续前进,想像一下在射频世界中任何时候两个信号可以联合起来或分离开,在某些地方需要一个或两个混频器。此外,通常有一个振荡器和合成器,在调相的例子中,有移相器和相位检测器。根据在射频系统中它们的位置,调制器在发射机之前,解调器在接收机之后(见图 3-1 和图 3-2)。

你知道吗?

技术上说,“QAM 调制”是累赘的,因为 QAM 调制字面上的意思是正交幅度调制。“AM 调制”“FM 调制”也是同样。但是,通常我们都这么说,因为“QA 调制”听起来太傻。

5.4 传播

一旦一个射频信号进入天线,被转化成电流,它就需要从一个器件传播到另一个器件。这个承载电流的东西叫做导线,但是在射频世界里在接收机或发射机中将一个信号从一点传到另一点,有几种媒介。这些媒介由射频方框图或图表表示,它们可以归为 3 类:电缆、波导和电路迹线。

5.4.1 电缆

1. 电缆构造

射频信号传播的一种方法就是通过电缆。它很便宜,VCR 背部悬挂起来的电缆就是射频电缆的一个例子。射频电缆称为同轴电缆,内部导体被外部导体包围,这是一个奇妙的说法。为了形象化,可以将它描述成一个老式的木质铅笔(想想幼儿园)。如果它是一个同轴电缆,铅心就是中间的导体,丑陋的黄色外皮就是外部的导体,分开两个导体的木头被称作电介质。电介质对绝缘体来说是奇特的工程话题,绝缘体是一种不导电(传输射频信号)的材料。

使用两种导体的原因很简单。内部的导体传输射频信号,外部导体是用来屏蔽的,防止射频信号逃逸。需要外部包皮是因为中心导体认为它是一个天线,它试图将它携带的射频信号辐射到空间中去。外部导体阻止内部导体辐射(可以把它认为是同轴电缆的安全卫士)。图 5-12 展示了许多种同轴电缆。



图 5-12 同轴电缆,Tru 连接器公司提供

所有同轴电缆完成相同的目标:用最少的插入损耗,从一点到另一点得到射频信号。读者可以想像,没有免费的午餐,总要作出折中。同轴电缆越大(越沉),插入损耗越小,但是

电缆越贵而且也越来越难处理。大而沉的电缆不能在小东西上缠绕,这使得它们很难工作,更不要说它们非常沉。所以射频工程师在可以容忍的插入损耗限度内,使用最小的电缆。

在射频系统内,同轴电缆经常用做两个主要的模块接口。例如,电缆经常连到基站天线的底部,来传输来自天线的信号,信号顺着塔下来,进入有低噪声放大器(LNA)的屋子。

2. 电缆类型和名称

为了使事情变复杂,针对不同情况,射频工程师努力开发了几种不同类型的同轴电缆。

3种主要的同轴电缆通过如表5-4所示的外层进行区分。

表 5-4 同轴电缆类型

电缆类型	外 包 层	描 述
弹性	橡胶涂层包围着一个很细的金属防护物	非常有弹性,橡胶外包层用来保护很细的防护物
半弹性	细金属(辫状)防护物	比弹性电缆的柔韧性和承受力要差,但是便宜
半刚性	厚厚的实心金属防护物	比半弹性电缆弹性差些,但是承受力更强

不同大小的电缆需要如下的详细说明。一个半英寸直径的柔软电缆称作半英寸直径弹性电缆,但是现在读者已经知道了射频工程师习惯于采用简单的想法,然后将其复杂化。所以上面提到的电缆被称为RG-58。事实上,大部分同轴电缆称为“RG 什么”或其他。有许多不同的RG号,除非读者打算靠买同轴电缆为生,关于电缆的RG号,读者惟一需要知道的事情就是,除了几个例外,号码越小电缆的直径越大。所以RG-58比RG-114更大(更贵)。

你知道吗?

电缆的“RG”名称来自美国部队信号公司,这个公司在第二次世界大战期间发明了同轴电缆。RG代表无线电通信等级,也许是有助于将它们与能量电缆(熏牛肉三明治)区别开来。

5.4.2 连接器

电缆本身没什么作用,除非它们的末端是连接器,或者是一个更特殊同轴连接器。一个同轴连接器允许一个电缆连到另一个电缆上或一个器件上。所以,有两种不同的连接器:连到电缆上的和连到器件上的。没有这两种连接器,是不可能将电缆连到器件上的。电缆连接器和器件连接器的区别如图5-13所示。器件连接器是有四孔的轮缘。



图 5-13 电缆连接器和器件连接器, Tra 连接器公司提供

1. 电缆集中的连接器

在电缆中,连接器通过机械方式紧密地连到电缆的末端。一旦连接器连到一个电缆,它将成为电缆集(assembly)。射频工程师有时购买电缆集,有时购买普通(标准)电缆和单独的电缆连接器,然后亲自将每部分连起来。为什么他们选择自己做电缆集而不买已经做好的?当只需要几个电缆集时,将它们装配起来更便宜也更快。但是,当需要很多电缆集时,最好选择购买电缆集。

2. 连接器族

就像电缆一样,每个连接器的目标是一样的:最小的插入损耗。是的,虽然和电缆比起来,连接器的插入损耗很小,但是连接器确实有插入损耗。不同类型的连接器非常多。表 5-5 只是一个射频同轴连接器族的抽样,几乎所有的连接器族都有适于电缆和器件的连接器。作为通常规则,一个族的连接器不会和另一个族的连接器匹配。

为什么有那么多不同的连接器族?有两个原因。首先,一些连接器族在物理尺寸上很大,而其他连接器很小。正如以前提到的,如果需要一个小直径的电缆集,那么选择一个小直径的电缆,小直径电缆将连接器的选择限定在可用的小连接器族内。如果电缆需要承载高功率的射频信号,就需要大直径的电缆,所以需要大连接器。

第二个原因是演变。连接器设计者经常改进连接器,或者降低插入损耗,或者使连接器

表 5-5 RF 同轴连接器族

SMA	SSMA	1.4mm	K
SMB	SMC	SMT	SSMT
BNC	TNC	SMP	SSMP
N	7-16	OSP	OSSP
SC	7mm	OSX	Type 43
3mm	2.4mm		

更便于使用。每次对一个已经存在的连接器类型进行显著的改善,一个新的连接器族便诞生了。

你知道吗?

更流行的一种射频连接器类型是 BNC,如表 5-5 所示。在 19 世纪 40 年代初期,一个 3 人(Bayonet,Neill,Councilman)小组开发了以提供安全接口和简易锁闭机制为直接目的的连接器。为了感谢这 3 个人对这项技术的发展所作的贡献,新的连接器命名为 BNC。

3. 适配器

由于有这些不同的连接器族,结果有趣的事发生了。有时射频工程师被迫将带有一个连接器的电缆连到另一个带有不同连接器族电缆或器件,这是不能完成的(没有横木)。适配器使它们步调一致。适配器,也称作同轴适配器,是短小的双边连接器,一边是一个族的连接器,另一边是其他族的连接器。适配器便于连接带有不同族连接器的两个射频物体。各种同轴适配器如图 5-14 所示。



图 5-14 同轴适配器,Amphenol 公司提供

你知道吗?

需要3个适配器(3个公母结合)来兼容每种连接器族组合。这意味着采取 3×231 或693种不同的适配器来兼容表5-5中所示的所有不同的连接器族。现在读者知道为什么一些射频公司花大量的时间来生产适配器了吧。

5.4.3 波导

射频传播的另一种方式是靠波导传播。波导是更老的技术,它们很贵(和电缆比起来),用于军事或高功率应用。波导在当今的商业无线系统中几乎不再使用,因为它们太大并且太贵。但是波导仍然在使用。图5-15显示了几片波导。



图5-15 波导, A·Alpha 波导公司提供

波导本来就是带有矩形交叉部分的管子,用于从一点到另一点传输射频信号。关于波导有趣的事情是,不像电缆在导体上传输射频信号,波导以看不见的波形式传播射频信号。波导仅仅是用来承载波,并控制它们传播的方向。

如果波导是老的技术,它们又大又贵,为什么或在哪里使用它们?我忘记提及关于波导的是,它们几乎没有插入损耗,这就是为什么它们用于高功率射频系统的原因。

5.4.4 电路迹线**1. 混合和印刷电路板**

信号在射频系统中传输的最后一种方法是在金属迹线上,金属迹线安装在某种电介质的顶部(还记得电介质吗?)。如果迹线碰巧是陶瓷的,并且器件是未包装的芯片,那么电路称为混合电路或MIC(微波集成电路)。如果电介质材料碰巧是某种特殊的塑料合成物,并

且器件全是包装器件,那么电路称为印刷电路。一个印刷电路也称为一个印刷电路板(PCB)和一个分立电路。请看图 5-4(a)和图 5-4(b)。

你知道吗?

奇特的塑料合成物材料用于优化射频印刷电路板,在电路中产生出最小的插入损耗(总是一件好事)。这些塑料合成物称作 FR4,PTFE,Duroid™。

2. 带状线、微带线和共面波导

射频电路的金属迹线可以用几种不同的方式布置。有 3 种流行的方式:带状线、微带线和共面波导。

带状线只以电路的形式来模仿同轴电缆。共面波导只以电路的形式来模仿波导,而微带线并没有试图模仿什么,它仅是一个射频电路。所有这 3 个版图方案都有它们各自的优点和专门的用途。图 5-16 显示了 3 个版图方案的一个代表性的视图。深色区域是金属迹线,浅色区域是电介质材料。

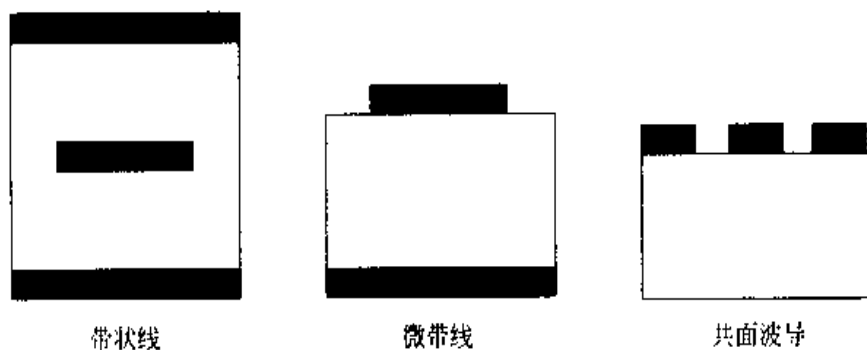


图 5-16 带状线、微带线和共面波导的模断面视图

如果仔细观察图 5-16,读者可以看到带状线的交叉部分与同轴电缆(中间是导体,外部是防护物)的交叉部分有点相似。如果仔细看共面波导的交叉部分(读者迅速喝五分之一杯的威士忌酒),读者还是不能看到和真实波导的任何相似之处,因为它们根本就不相似。共面波导可能看上去不像一个真正的波导,但是它确实像波导那样工作。不信可以问任何一个射频工程师。

快速回顾一下,在射频系统中射频信号传播有 3 种方式:电缆、波导和电介质材料上的金属迹线。依据电介质的类型有两种不同类型的射频电路。如果电介质是陶瓷的,那么电路就是混合型的(MIC)。如果电介质是塑料合成物,那么电路就是印刷电路板(或 PCB)。在射频电路上有 3 种流行放置电路迹线的方式:带状线、微带线和共面波导。最后所有不同介质的目标是相同的:用最少的插入损耗将射频信号从一点传到另一点。

第3部分 射频系统

第6章 传统技术

回想一下,其实无线通信技术出现时间很短暂。本章主题是:短期发展起来的无线技术。本章仅选择4种传统技术做介绍:广播、雷达、卫星通信和点到点微波。就这4种技术而言,系统设计和技术方面都有很大不同。被选中的3种是RF技术多种应用的典型代表。

同FM无线电广播和电视一样,出现于20世纪20年代初的AM无线电广播,是广播技术的典型应用。广播技术是唯一一种从一点到多点无线传输信息的射频应用,它并不关心目的接收机的响应。广播是单向技术(它并不阻止人们在他们的电视前捧腹大笑)。最近,使用不同无线技术的通信对广播产生了冲击,它就是卫星服务(也在本章讨论)。

20世纪30年代末兴起的雷达技术,是一种很有趣的射频通信形式。它不同于其他无线通信形式,雷达不是通过调制将信息加载到RF载波上来工作,而是通过环境将信息强加到RF载波上,信息就包含在RF载波的微小变化中。很快读者可以学习到,这些微小变化能包含雷达所跟踪物体的很多信息。

今天,几乎到处使用雷达:地面、空中和太空。廉价的RF电子器件的实用性使得雷达技术用在很多惊人的新领域。廉价雷达对汽车工业影响最大。不久的将来,所有汽车将安装使用雷达技术,并作为未来汽车的标准特征(据我所知,目前还没有在汽车上装配导弹的计划)。

20世纪60年代初期卫星通信出现。但它早在20世纪40年代就被提出来了,不过必须等待支持它的技术出现,它才能真正可行。卫星可用于单向和双向通信。如果读者曾给在夏威夷的人打过电话(从所在州以外),呼叫很可能需要卫星中转。如果读者曾在不同时区看过实时体育直播,那个信号也需要卫星中转。

本章将简单介绍点到点微波通信,它最初用于长途电话服务中,长途电话服务最终导致AT&T的瓦解。同时还提及一个很重要的概念“多径”,它对所有无线通信都很重要。

通过本章学习,读者会看到这4种无线系统的共同主题。会注意到,美国由联邦通信委员会(FCC),其他地方由国际电信联盟(ITU)来为每一应用分配频率。同时读者会看到,如何用本书前几章所讨论的基本RF模块的组合来简单地描述每一无线应用。本章还讨论频率在每一系统中所担当的角色。在各种情况下,用最新技术设计的系统充分利用了每个特殊的系统频率分配。

本章目的在于,帮助读者理解最基本的概念,了解所熟悉的无线系统的工作方式。在每一实例中,都会给读者跟踪传播信号的机会,使读者清楚其中的变化。一旦理解了这4种系统的基本原理,将会对无线系统如何工作有了一个大概的认识。今天,大多数复杂的无线技术,诸如多普勒雷达、低地球轨道卫星,只不过是这4种基本系统的改进和精炼。

6.1 广播

6.1.1 广播的概念

1. 特性

广播只不过是这样一个 RF 系统,该系统通过一个广阔的地理区域传输它的信号,并且有目的地送给广大听众。广播属于一对多系统,即一个发送者多个接收者。同时也意味着,没有为接收方提供与发送方直接的通信。3种被广泛接受的广播应用是 AM 无线电广播、FM 无线电广播和电视。

在美国,所有广播形式都有一个共同点:它们都要得到联邦通信委员会(FCC)的批准,并在特定频带内工作(频带是由它的上边频和下边频惟一定义的频率范围)。FCC 是热心的组织,它将这些频带划分成更小频带,称为信道,因此,不同广播公司可以传输不同的娱乐节目。

2. 约束

为遵从 FCC,广播公司传送它们节目时必须在3个约束内操作。第1个约束是频率。正如前面所提到的,给每个广播公司分配一个信道(频率范围),它们只能在这个信道内传送 RF 能量。为了维护秩序,其他任何人禁止在这个频率范围内发送广播。广播是在发送机输出端需要滤波器的典型例子。

其次,广播公司必须遵守地域约束。授权一个无线电台在旧金山范围内发送广播信号,就没有必要给它在奥克兰发送信号的权限。在一些极端情况下,广播公司必须裁剪它们辐射的 RF 能量,来遵守地域界限。如果读者还能回忆起有关天线方向图的讨论,天线能被设计成在一个定义好的几何图形范围内辐射 RF 能量。不过很少需要很复杂的方向图(如三叶草形)。调整成圆形或椭圆形是经常使用的窍门。

广播公司在分配给它们的地域范围内的最高点安置它们的发送天线,来确保对所有接收者来说都能是视距(line of sight)。假设一个广播公司所在区域的最高点恰好在区域的最北点。再进一步假设,这个最北点连接某一广播公司所在传输区域的南边(在相同频率上工作)。在这种情况下,需要第一个广播公司辐射 RF 能量严格控制在向南的方向(见