



普通高等教育“十三五”规划教材  
电工电子基础课程规划教材

# 通信电子线路

■ 徐 勇 吴元亮 徐光辉 胡冰新 编著

 中国工信出版集团

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

普通高等教育“十三五”规划教材  
电工电子基础课程规划教材

# 通信电子线路

徐 勇 吴元亮 徐光辉 胡冰新 编著

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书按照教育部教指委课程教学基本要求编写,立足于通信电子线路基本理论,以工程应用为牵引,介绍通信系统领域各类典型功能电路的原理、指标性能与分析计算。全书共8章,主要内容包括:绪论、小信号调谐放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、调制与解调、频率合成与锁相环、通信系统整机合成、通信系统实例。本书提供配套电子课件、习题参考答案、程序代码、电路仿真文件等。

本书可作为高等学校通信、电子等信息大类专业相关课程的本科生教材,也可作为工程大类专业的选修课教材,还可供该领域的工程技术人员学习、参考。

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

通信电子线路 / 徐勇等编著. — 北京: 电子工业出版社, 2017.3

电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-30849-9

I. ①通… II. ①徐… III. ①通信系统—电子电路—高等学校—教材 IV. ①TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 017536 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王晓庆

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 14.5 字数: 419 千字

版 次: 2017 年 3 月第 1 版

印 次: 2017 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 39.90 元

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

质量投诉请发邮件至 [zlbs@phei.com.cn](mailto:zlbs@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: (010) 88254535, [wjy@phei.com.cn](mailto:wjy@phei.com.cn)。

# 前 言

本书是根据教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会审定通过的课程基本要求，结合工程应用类课程改革编写而成的专业基础课程教材。我们结合多年来的教学实践与近年来通信技术的最新发展，围绕“夯实理论基础，突出工程应用”、“保留经典电路，体现与时俱进”基本原则，在内容选取与表述方式等方面尝试了部分改革。

内容选取方面，加强应用性教学，补充实用辅助功能电路；补充小型集成化内容，增加通信系统芯片原理与应用；突出设计仿真，多个章节增加基于 Multisim 的功能电路虚拟仿真。

表述方式方面，借鉴国外部分优秀教材经验，借助字体变换突出重点、难点，强调“问题的提出、问题的分析与问题的总结”，增加本书可读性，力求使本书不仅适用于教师教学，更适用于学生自学。全书编写力求符合教学规律、适应教学特点。

本书立足于通信电子线路基本理论，以工程应用为牵引，介绍通信系统领域各类典型功能电路的原理、指标性能与分析计算。本书着眼新一代人才培养目标，突出读者主体意识，创新教学模式、加强读者知识体系的整体构建，提升读者提出问题与解决问题的能力，培养读者应用创新能力。本书编写注重基本原理与工程实践的紧密结合，以无线通信射频前端系统为应用背景，结合设计实例介绍各单元电路的结构与原理、功能与性能。

全书共 8 章。第 1 章绪论，第 2 章小信号调谐放大器，第 3 章高频功率放大器，第 4 章正弦波振荡器，第 5 章调制与解调，第 6 章频率合成与锁相环，第 7 章通信系统整机合成，第 8 章通信系统实例。本书可作为高等学校通信、电子等信息大类专业相关课程的本科生教材，也可作为工程大类专业的选修课教材，还可供该领域的工程技术人员学习、参考。

本书第 1、3、6、8 章由徐勇编写，第 4、7 章由吴元亮编写，第 5 章由徐光辉编写，第 2 章由胡冰新编写，徐勇对第 2、5 章部分内容进行了修改补充。全书由徐勇负责统稿与编审。

本书提供配套电子课件、习题参考答案、程序代码、电路仿真文件等，请登录华信教育资源网 (<http://www.hxedu.com.cn>) 注册下载。

由于编写与审定时间仓促，加之编者水平有限，书中难免会有缺失和错误之处，恳请广大读者批评指正，发现任何问题请不吝指正。

作 者

2017 年 3 月

# 目 录

第1章 绪论	1	2.6 晶体管高频等效模型及其电路分析	35
1.1 引言	1	2.6.1 晶体管高频等效模型	35
1.2 通信系统组成与分类	2	2.6.2 单级调谐放大器高频等效模型分析应用	36
1.2.1 通信系统组成	2	2.7 频率升高对电路稳定性的影响	39
1.2.2 通信系统分类	3	2.7.1 反向传输导纳的主要危害	39
1.2.3 无线通信系统典型案例	4	2.7.2 降低反向传输导纳影响的主要方法	40
1.3 电磁频段划分与应用	5	2.8 集中选频调谐放大器简介	42
1.4 通信系统噪声	6	2.9 高频小信号调谐放大器 Multisim 仿真	46
1.4.1 噪声来源	6	2.9.1 LC 并联谐振回路	46
1.4.2 半导体噪声简介	7	2.9.2 共射组态甲类放大器	48
1.4.3 噪声度量	9	2.9.3 单级调谐回路放大器	49
1.4.4 减小电路噪声的常用方法	10	本章小结	50
1.5 课程主要内容与特点	11	习题	50
习题	12	本章参考文献	53
本章参考文献	12	第3章 高频功率放大器	54
第2章 小信号调谐放大器	13	3.1 引言	54
2.1 引言	13	3.2 高频线性功率放大器	55
2.1.1 什么是调谐放大器	13	3.2.1 A类高频功率放大器	55
2.1.2 调谐放大器结构与主要性能指标	14	3.2.2 B类高频功率放大器	57
2.2 LC 谐振回路工作原理	15	3.2.3 C类高频功率放大器	59
2.2.1 LC 并联谐振回路	15	3.2.4 C类高频功率放大器倍频应用	61
2.2.2 LC 串联谐振回路	19	3.3 高频功率放大器实用辅助电路	62
2.2.3 负载与信号源对谐振回路的影响	20	3.3.1 直流馈电电路	62
2.2.4 谐振回路的接入方式	21	3.3.2 匹配电路	66
2.3 单级调谐放大器	25	3.3.3 功率合成电路	70
2.3.1 低频宽带放大器基本特性回顾	25	3.4 高频开关功率放大器	78
2.3.2 小信号调谐放大器	26	3.4.1 D类高频功放	78
2.4 调谐放大器级联	30	3.4.2 E类高频功放	80
2.4.1 直接多级级联调谐放大器	31	3.5 高频功率放大器设计实例与仿真	82
2.4.2 参差调谐多级放大器	31		
2.4.3* 双调谐放大器	33		
2.5 频率升高对调谐放大器的影响	33		

3.5.1 C类功放理论分析与设计	82	4.8 正弦波振荡器 Multisim 仿真	126
3.5.2 C类功放原型电路设计仿真	83	4.8.1 Hartley 振荡器	126
3.5.3 C类功放电路的实用完善	84	4.8.2 Colpitts 振荡器	128
3.5.4 C类功放2次倍频器设计仿真	85	4.8.3 Clapp 振荡器	129
本章小结	85	4.8.4 Seiler 振荡器	130
习题	86	本章小结	131
本章参考文献	87	习题	131
<b>第4章 正弦波振荡器</b>	<b>88</b>	本章参考文献	133
4.1 引言	88	<b>第5章 调制与解调</b>	<b>134</b>
4.2 反馈式振荡器	89	5.1 引言	134
4.2.1 反馈式振荡器基本原理	90	5.2 振幅调制原理	134
4.2.2 反馈式振荡器平衡条件	91	5.2.1 普通调幅波	135
4.2.3 反馈式振荡器起振条件	92	5.2.2 抑制载波双边带调幅波	137
4.2.4 反馈式振荡器稳定条件	94	5.2.3 抑制载波单边带调幅波	138
4.3 三点式 LC 振荡器	96	5.3 调幅电路	139
4.3.1 三点式 LC 振荡电路组成原则	96	5.3.1 调幅信号的生成原理	139
4.3.2 电容反馈三点式振荡器	98	5.3.2 调幅电路产生	141
4.3.3 电感反馈三点式振荡器	101	5.3.3 高电平调幅简介	142
4.4 高稳定度的 LC 振荡器	103	5.4 振幅解调电路	144
4.4.1 电容反馈三点式振荡器的频率 稳定度定量分析	103	5.4.1 包络检波电路	144
4.4.2 串联改进型电容反馈三点式 振荡器	103	5.4.2 乘积型同步检波电路	147
4.4.3 并联改进型电容反馈三点式 振荡器	104	5.5 角度调制原理	149
4.5 振荡器的频率稳定度	105	5.5.1 调频及其数学表达式	150
4.5.1 频率准确度和稳定度	105	5.5.2 调相及其数学表达式	150
4.5.2 频率稳定度的定性分析	106	5.5.3 调角波频谱与有效频带宽度	151
4.5.3 提高频率稳定度的主要措施	107	5.5.4 调角信号频谱与调制信号的 关系	153
4.6* 石英晶体振荡器	108	5.6 调频信号的产生	155
4.6.1 石英谐振器及其特性	108	5.6.1 调频电路性能指标	155
4.6.2 石英谐振器频率稳定度高的 原因	112	5.6.2 直接调频	156
4.6.3 石英晶体振荡器电路	113	5.6.3 间接调频	158
4.7 压控振荡器	117	5.6.4 频偏拓展	160
4.7.1 VCO 的主要性能指标	117	5.7 调频波的解调	161
4.7.2 变容二极管压控振荡器	118	5.7.1 斜率鉴频器	161
4.7.3 晶体变容二极管压控振荡器	121	5.7.2 脉冲计数式鉴频器	163
4.7.4 集成电路正弦波压控振荡器	122	5.8 调制解调的 Multisim 仿真	164
4.7.5 负阻式压控振荡器	123	5.8.1 振幅调制与解调的 Multisim 仿真	164
		5.8.2 频率调制与解调的 Multisim 仿真	167

本章小结 .....	168	7.2.1 调幅发射机 .....	192
习题 .....	169	7.2.2 调频发射机 .....	193
本章参考文献 .....	170	7.3 射频接收机 .....	194
<b>第6章 频率合成与锁相环</b> .....	171	7.3.1 射频调谐接收机 .....	194
6.1 频率合成概述 .....	171	7.3.2 单次混频超外差式射频接收机 .....	195
6.2 频率合成主要技术指标 .....	171	7.3.3 二次混频超外差式射频接收机 .....	196
6.3 锁相环 .....	173	7.3.4 零中频射频接收机 .....	198
6.3.1 锁相环简介 .....	173	7.3.5 混频原理和混频器电路 .....	199
6.3.2 锁相环主要技术指标 .....	174	7.4 混频干扰及其抑制方法 .....	206
6.3.3 单芯片集成锁相环 .....	175	7.4.1 阻塞干扰 .....	206
6.3.4 单芯片集成锁相环典型产品分类与应用 .....	177	7.4.2 交叉调制和互相调制干扰 .....	206
6.4 频率合成常用方法 .....	180	7.4.3 混频干扰 .....	207
6.4.1 直接模拟频率合成 .....	180	本章小结 .....	210
6.4.2 直接数字频率合成 .....	181	习题 .....	210
6.4.3 锁相环频率合成 .....	181	本章参考文献 .....	211
6.4.4 混合频率合成 .....	182	<b>第8章 通信系统实例</b> .....	212
6.5 锁相环型频率合成器 .....	183	8.1 引言 .....	212
6.5.1 锁相环型频率合成器工作原理 .....	183	8.2 SSB 通信电台实例 .....	213
6.5.2 锁相环型频率合成器典型设计案例与应用 .....	186	8.2.1 收发通道电路 .....	215
本章小结 .....	189	8.2.2 频率合成单元 .....	216
习题 .....	190	8.2.3 射频功率放大单元 .....	217
本章参考文献 .....	190	8.3 单芯片 2.4GHz 频段无线收发信机实例 .....	217
<b>第7章 通信系统整机合成</b> .....	191	本章小结 .....	221
7.1 引言 .....	191	习题 .....	221
7.2 射频发射机 .....	191	本章参考文献 .....	221

# 第1章 绪 论

## 内容关键词

- 通信、通信电子线路、通信系统
- 通信频段划分、通信系统噪声

## 内容提要

本章首先引入通信、通信系统与通信电路基本概念，回顾了通信系统的发展历史，概括了通信系统的基本组成与分类，介绍了目前常用的通信频段划分与应用领域。本章最后总结实际通信系统中存在的噪声种类并提出减小噪声的常用方法。

结合开课伊始的课程简介，本章内容教学安排建议为2学时。

## 1.1 引 言

什么是通信？为何要通信？

通信是将信息从一个地方传输到另外一个地方，现代通信多用电信号完成这种传递过程。用于完成这种通信过程的电路称为通信电子线路，以下简称通信电路。

通信所传递的信息有多种不同的形式，如语音、音乐、图像与数据文字等多种形式。根据所传递信息的不同，现代通信可以分为传真、电报、普通电话、可视电话与数据等多种方式，从更广义角度来看，广播、电视、雷达、导航与遥控遥测等均属于通信范畴。

最早具有现代意义的通信是从有线电报开始的，1837年，摩尔斯（Samuel Morse）发明了电报，设计了摩尔斯电码，开创了现代通信的新纪元。摩尔斯利用电磁感应在一个简单的、由一根长线构成的简易收发机之间以“点”（接通电路时间较短）、“划”（接通电路时间3倍于“点”的时间）和“空”（断开电路）形式传递信息的装置，制作了第一个电子通信系统——电报机，如图1-1所示。1876年，贝尔发明了电话，如图1-2所示，可以实现将语音信号变为电信号沿导线传送。早期的电报和电话都是沿导线传送信号的，这就是以金属导线为传输媒介的简单有线通信方式。

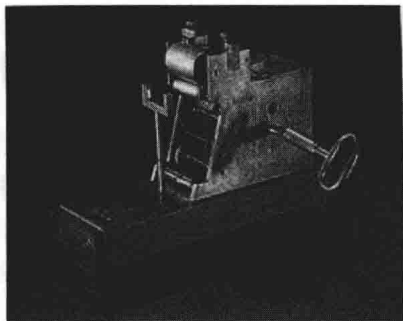


图 1-1 摩尔斯电报机



图 1-2 贝尔电话

1873年，麦克斯韦（James Clerk Maxwell）提出了电磁辐射理论，得出了电磁场方程，从理论上



证明了电磁波的存在，为无线电通信奠定了理论基础。1887年，赫兹（H. Hertz）用实验技巧证实了电磁波的客观存在，并且证明了电磁波在自由空间的传播速度与光速相同，并具有反射、折射、驻波等与光波相同的性质，由此拉开了众多科学家努力研究利用电磁波传递信息问题的序幕，无线通信开始走向历史前台，其中著名的有英国的罗吉（O. J. Lodge）、法国的勃兰利（Branly）、俄国的波波夫与意大利的马可尼（G. Marconi）等，其中贡献最大是意大利的马可尼。1895年，马可尼首次在几百米的距离用电磁波进行通信并获得成功，1901年又首次完成了横渡大西洋的通信。从此无线电通信进入了实用阶段。但这时的无线电通信设备是：发送设备用火花发射机、电弧发生器或高频发电机等；接收设备则是用粉末（金属屑）检波器。直到1904年，弗莱明发明电子二极管之后，人类才开始进入无线电电子学时代。

1907年，李·德·福雷斯特发明了真空电子三极管，用它可组成具有放大、振荡、变频、调制、检波、波形变换等重要功能的电子线路，为现代千变万化的电子线路提供了核心器件。电子管的出现成为电子技术发展史上第一个重要里程碑。

1948年，肖克莱等人发明了晶体三极管，它在节约电能、缩小体积与减小质量、延长寿命等方面远远胜过电子管，因而成为电子技术发展史上第二个重要里程碑。晶体管在许多方面取代了电子管的传统地位而成为极其重要的电子器件。

20世纪60年代开始出现半导体集成电路，通过几十年的发展，取得了极其巨大的成功。中、大规模乃至超大规模集成电路的不断涌现，已成为电子线路特别是数字电路发展的主流，对人类进入信息社会起到不可估量的推动作用。这是电子技术发展史上第三个重要里程碑。

1955年皮尔斯（Perice）提出了利用人造卫星实现全球通信的设想，1957年苏联发射成功第一颗人造地球卫星，1960年美国利用ATLAS卫星首次实现卫星广播，从而开辟了卫星通信的新领域。20世纪60年代与70年代又出现了光纤通信与计算机通信，80年代出现移动通信，90年代出现全球定位GPS系统，进入21世纪后，又陆续出现无线高速宽带Wi-Fi通信、智能手机通信、太赫兹通信等，从而使得通信速度更为快捷、通信内容更为丰富。

大规模集成电路的出现和计算机技术的迅速发展，对通信技术的发展起到了极其重要的推动作用，使得通信设备更加小型化、轻量化，质量更加可靠，待机时间更长，现代通信技术正朝着更高水平快速发展。

## 1.2 通信系统组成与分类

### 1.2.1 通信系统组成

通信系统一般包括以下5个部分：信源、发送设备、信道、接收设备和信宿，如图1-3所示。



图 1-3 通信系统组成框图

#### 1. 信源

信源是指待发送的各种信息，包括语音、文字、图像与数据等，通过相应的转换装置（如话筒、

计算机、摄像机等)转换为电信号后送至发送设备,信源可以是模拟信号,也可以是数字信号,通常在整个通信系统中称之为基带信号。

## 2. 发送设备

发送设备的作用是将基带信号转换为适合在相关信道中传输的信号。基带信号一般不适合直接在信道中传输,因此需要利用发送设备对其进行转换以便适合远程传输,发送设备的作用就是将基带信号装载至适合高速、远距离传输的高频信号上,这个过程被称为“调制”。

电路中调制的任务是将不易于远程传输的低频信息“装载”到适于远程传输的高频振荡载波上去,让载波携带信息传送给受信者。这种信息“装载”调制的过程可以比做实际生活中物品装载到高速列车的过程,不妨做个比喻,将其称之为信息传送的“上车”过程。

## 3. 信道

信道又称为传输媒介,如自由空间、电缆、光缆等,不同信道有不同的传输特性,人们把以自由空间作为传输信道的通信称为无线通信,把以电缆、光纤等作为传输信道的通信称之为有线通信。

## 4. 接收设备

接收设备的作用是将信道传送来的信号进行接收和处理,以恢复成与发送信号相一致的信号。接收设备的作用就是将基带信号从适合远距离传输信息的高频信号上卸载下来,这个过程被称为“解调”。基带信号在调制、传输与解调过程中,会产生损耗和受到干扰,因而会产生失真,良好的通信系统需要努力减小这种失真。

解调电路的任务是将“装载”在高频信号上的低频信息“卸载”下来,以便送至后级恢复输出。这种信息“卸载”解调的过程可以比做物品从高速列车上卸货的过程,不妨也做个比喻,将其称之为信息传送的“下车”过程。

## 5. 信宿

信宿是将接收设备输出的信号还原成信息原来形式的装置,如扬声器、显示器与计算机等。

由此可见,各种通信系统的信源与信宿是基本相同的,通信系统的不同主要区别在信道的不同,以及由此带来的发送设备和接收设备的差别,但是信号在发送设备和接收设备中的变换和处理过程是基本相同的。

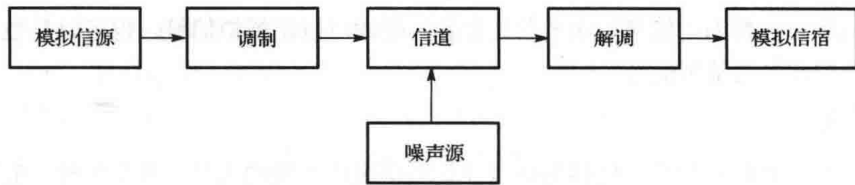
## 1.2.2 通信系统分类

由于依据与方法不同,通信系统有着众多的分类标准。根据传输信道的不同,可以分为有线通信和无线通信。根据调制信号的不同,可以分为模拟通信和数字通信,调制信号为模拟信号的称之为模拟通信,调制信号为数字信号的称之为数字通信。按照调制方式的不同,模拟通信又可以分为调幅、调频和调相三种类型,数字通信又分为振幅键控、频率键控和相位键控等类型。

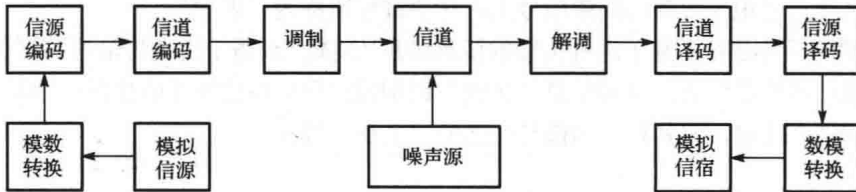
数字通信是通信系统的重要发展方向之一,其中数字软件无线电技术是今后的重要研究方向,数字通信系统框图与模拟通信系统框图的主要构成与区别如图 1-4 所示。

数字通信系统传输的是数字信号,与模拟通信系统相比,数字系统在发送与接收端分别增加了模数与数模转换模块,另外数字通信系统为了进一步提高信号可靠性与保密能力,往往在发送端与接收端分别增加信源与信道加解密模块。

尽管数字通信系统是未来通信系统发展方向,但是模拟通信依旧是数字通信的基础,模拟通信的系统概念与调制解调技术依然十分重要,本教材将以模拟通信系统硬件电路为重点,尤其以模拟无线通信系统为典型案例,介绍系统组成的各个模块与工作原理。



(a) 模拟通信系统框图



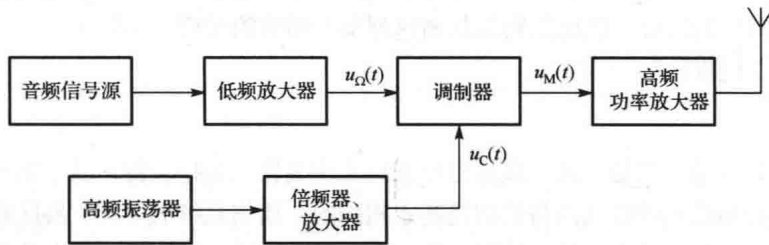
(b) 数字通信系统框图

图 1-4 模拟与数字通信系统框图

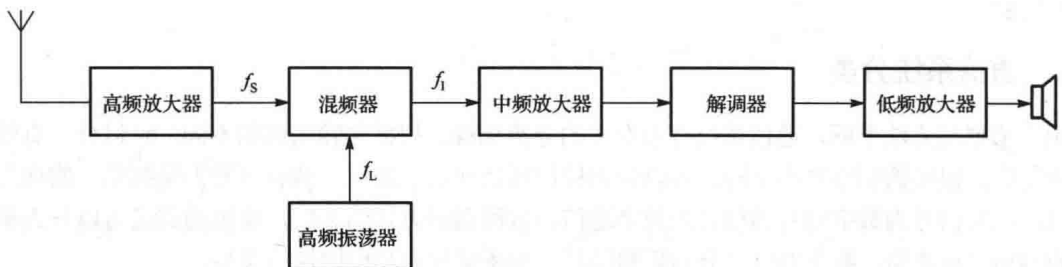
下面将以无线通信系统为例，简要介绍无线通信系统的各个功能模块。

### 1.2.3 无线通信系统典型案例

无线通信系统的种类和形式繁多，但是其基本功能电路大同小异。下面将以无线话音通信为典型案例，用以说明无线发送设备与接收设备的基本组成和工作过程。图 1-5(a)与(b)分别为无线话音通信发送设备和接收设备框图。



(a) 发送设备框图



(b) 接收设备框图

图 1-5 无线话音通信系统基本组成框图

## 1. 无线通信发送系统

如图1-5(a)所示，话音信号首先经音频信号源模块（如麦克风）完成声电转换，经放大调理后的信号  $u_{\Omega}(t)$  对高频载波信号  $u_c(t)$  完成调制，调制生成的信号  $u_M(t)$  最后经高频功率放大后送至天线发射。

根据装载低频信息的方式不同，常用的调制方式被划分为调幅（Amplitude Modulation, AM）、调频（Frequency Modulation, FM）与调相（Phase Modulation, PM）这三种形式。

## 2. 无线通信接收系统

在图 1-5(b)所示无线通信系统接收设备中,从接收天线收到的高频已调波信号  $f_s$  首先经高频放大器完成噪声滤除与信号调理放大功能,然后在混频器中与本地高频振荡器输出信号  $f_L$  实现差频运算,将高频已调波转化为中频已调波  $f_i$ ,以便更加适合后级电路处理并提高电路稳定性,中频已调波放大调理后由解调器实现信号的解调,恢复输出音频调制信号,最后送至低频放大器完成音频功率放大,由扬声器完成电声转换恢复语音。

对应不同的三种调制方式,调幅、调频和调相对应解调过程有所不同,分别称之为检波、鉴频与鉴相。调制与解调的电路结构及其工作原理是本门课程的重点,后续将在专门章节中详细介绍。

## 1.3 电磁频段划分与应用

电磁波的频率是一种重要的不可再生资源,对电磁波的波长或频率进行分段,分别称之为波段或频段。自由空间中,电磁波的波长  $\lambda$ ,传播速度  $C$  与频率  $f$  的关系为:

$$C = f \cdot \lambda \quad (1-1)$$

电磁波的频段划分如图 1-6 所示,其中应用于通信领域的无线电波、红外线与光波只是电磁波波段的很小一部分。各种不同通信频段信号的产生、放大和接收方法不尽相同,传播能力与方式也不同,所以分析方法与应用范围也不同。图中关于频段、传播方式与用途的划分是相对而言的,相邻频段间没有绝对的界限。

根据不同电磁波传播规律的特点,国际上有专门的机构——国际无线电咨询委员会 (CCIR) 将频率划分为如表 1-1 所示。

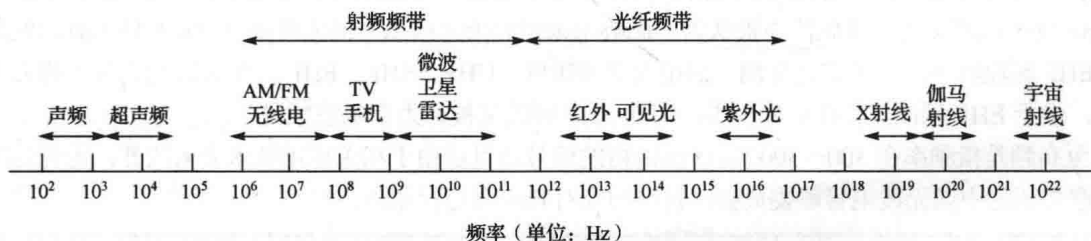


图 1-6 电磁波频段划分

表 1-1 常用通信频段划分

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称
超长波	$10^7 \sim 10^6$ m	30~300Hz	ELF (极低频)
	$10^6 \sim 10^5$ m	300Hz~3kHz	VF (语音频率)
	$10^5 \sim 10^4$ m	3~30kHz	VLF (甚低频)
长波	$10^4 \sim 10^3$ m	30~300kHz	LF (低频)
中波	$10^3 \sim 10^2$ m	0.3~3MHz	MF (中频)
短波	$10^2 \sim 10$ m	3~30MHz	HF (高频)
米波	10~1 m	30~300MHz	VHF (甚高频)
分米波	10~1 dm	0.3~3GHz	UHF (特高频)
厘米波	10~1 cm	3~30GHz	SHF (超高频)
毫米波	10~1 mm	30~300GHz	EHF (极高频)
亚毫米波	10~1 dmm	300~3000GHz	THF (至高频)

极低频 (Extremely Low Frequency, ELF) 是 30~300Hz 范围内的信号, 包含工业交流电 50Hz、低频遥测信号及海洋声呐信号等。

话音频率 (Voice Frequency, VF) 是 300Hz~3kHz 范围内的信号, 包含人类的话音频率。通常使用的电话信道带宽就是 300Hz~3kHz, 称之为话音频率。

甚低频 (Very Low Frequency, VLF) 是 3~30kHz 范围内的信号, 其包含人类听觉频率的高端。VLF 用于某些特殊的政府或军事通信及海军潜艇通信、导航等。

低频 (Low Frequency, LF) 是 30~300kHz 范围内的信号, 主要用于船舶导航、航空导航与电力通信。

中频 (Middle Frequency, MF) 是 0.3~3MHz 范围内的信号, 主要用于商业、调幅 AM 广播 (535~1605kHz)。

高频 (High Frequency, HF) 是 3~30MHz 范围内的信号, 通常该频段又称为短波段 (Shortwave Band), 多数的无线电通信均使用这个频段, 这其中包括军用通信、商业通信与业余无线电台均在使用。

甚高频 (Very High Frequency, VHF) 是 30~300MHz 范围内的信号, 常用于军用超短波电台、商用调频 FM 广播 (88~108MHz) 及商业电视广播。

特高频 (Ultra High Frequency, UHF) 是 0.3~3GHz 范围内的信号, 该频段主要应用包括商业电视广播、手机移动通信、雷达与导航, 部分微波通信与卫星通信也在使用该频段。1~300GHz 频段通常被称之为微波频率, 故 UHF 的频率高端属于微波频段。

超高频 (Super High Frequency, SHF) 是 3~30GHz 范围内的信号, 是微波与卫星通信主要应用的频段。

极高频 (Extremely High Frequency, EHF) 是指 30~300GHz 范围内的信号, 随着通信技术的迅速发展, 该频段也逐步开始应用于通信领域。如近年来逐渐兴起的汽车雷达频率从 24GHz 逐步变为 77GHz 宽带频率, 另外该频段与被认为“影响未来世界十大技术”的太赫兹 (THz) 技术频段低端重合, EHF 频段较多应用于雷达探测、射电天文等领域。UHF、SHF、EHF 三个频段通常又被称为微波频段, 由于 EHF 频段波长在毫米范围, 因此 EHF 频段又被称为毫米波频段。

至高频是指频率在 300~3000GHz 范围内的信号, 目前由于相关应用技术尚未成熟, 无论是国际电信联盟还是中国无线电管理委员会, 目前均未对其应用进行划分。

#### **【注意】 “话音频段”与“音频频段”的区别。**

业界目前定义的“音频频段”, 其频率范围一般是指 20Hz~20kHz, 之所以远大于“话音频段”范围 300Hz~3kHz, 是因为该频率范围包含了除人类能够发音之外的众多其他频率, 如各种音乐声、动物与昆虫发出的声音等。通常我们所用的音频功率放大器, 如智能手机音频放大器的频率范围均要求覆盖音频频段 20Hz~20kHz。

## 1.4 通信系统噪声

### 1.4.1 噪声来源

噪声是指落入信息通道内的任何不需要的信号, 干扰与失真从定义与度量的角度均可以并入噪声的范畴。图 1-7 显示了一个无噪声正弦波与存在噪声的同一正弦波信号。

为了方便分析噪声, 通常将通信系统的噪声分为相关噪声与非相关噪声两大类。无论通信信号是否出现都会存在的噪声称为非相关噪声, 如大气噪声与工业干扰等; 当且仅当通信信号出现时才会出

现的噪声,称为相关噪声,如有用信号的失真和无用信号的干扰等。下面将首先介绍非相关噪声,相关噪声将在后续章节的通信系统整机合成中再行介绍。

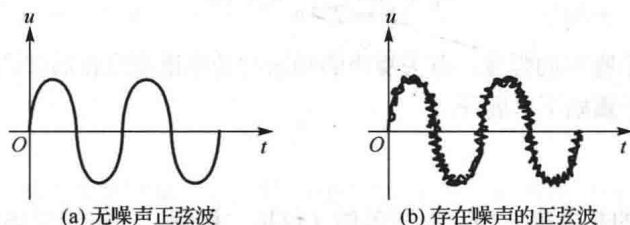


图 1-7 正弦波有无噪声时的影响

非相关噪声主要分为外部环境噪声与半导体内部噪声两大类。外部环境噪声主要是指系统所在环境产生的噪声,主要来源有大气噪声、宇宙噪声和工业噪声。半导体内部噪声主要是通信系统中半导体器件本身特性所带来的噪声。

### 1. 外部环境噪声

大气噪声是指大气中各种电扰动所引起的干扰。这种干扰主要来自两种因素。一种是大气静电干扰,如雷雨、闪电等。静电干扰的主要特点是干扰频率分布范围宽、能量的大小与其频率成反比,30MHz以上的频率,这种大气干扰噪声的影响不再明显。另一种大气干扰是地球大气电离层的衰落现象,短波通信经常受其影响,并且随季节与昼夜的变化而变化。

宇宙噪声是来自地球大气层以外的电信号噪声,它由银河系、河外星系及太阳等天体产生,通常分为宇宙射线和太阳电磁辐射两种,即宇宙噪声和太阳噪声。

工业噪声主要是指人类工业活动产生的噪声,如电力线、电车、电源开关、点火系统等,这类干扰来源分布很广泛。工业干扰信号的频谱很宽,它从极低的频率开始,一直延伸到几十甚至几百兆赫兹的特高频频段。

### 2. 半导体内部噪声

内部噪声主要由通信系统内部半导体器件产生,如电路中的电阻是无源器件噪声源,而二极管、三极管及场效应管则是有源器件噪声源。这些噪声源所产生的噪声可以分为热噪声、散弹噪声、分配噪声与闪烁噪声等。其中散弹噪声、分配噪声与闪烁噪声是有源器件产生的,而热噪声在无源与有源器件中均会产生。

## 1.4.2 半导体噪声简介

### 1. 电阻噪声

电阻是具有一定阻值的导体,其内部存在着大量做杂乱无章运动的自由电子。自由电子的运动强度由电阻的温度决定,温度愈高,运动愈强烈,只有当温度下降到绝对温度零度时,运动才会停止。这种电子的运动方向和速度是无规则随机的,且随时间不断变化,此起彼伏,习惯上把这种由于热运动产生的噪声称为热噪声。

电阻热噪声是随机起伏的噪声,其电压(或电流)的瞬时值与平均值均无法计量,人们一般用噪声均方值(瞬时值平方后再取平均)来评估噪声功率,其表示在 $1\Omega$ 电阻上所消耗的噪声平均功率,即

$$\bar{P}_n = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P_n(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u_n^2(t)}{R} dt = \frac{\overline{u_n^2}}{R} \Big|_{R=1\Omega} = \overline{u_n^2} \quad (1-2)$$

由此得

$$\overline{u_n^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_n^2(t) dt \quad (1-3)$$

有时也用均方根表示噪声的强度。有关噪声的频谱与功率谱密度在后续课程“数字通信原理”中将有详细介绍，本书限于篇幅不再展开。

## 2. 有源器件噪声

除了无源器件电阻的热噪声之外，有源器件（包括二极管、三极管与场效应管）内部产生的噪声也是一个重要的噪声来源。在大多数通信系统电路中，有源器件噪声往往比无源电阻热噪声强烈得多。有源器件的噪声主要分为 3 种：电阻（有源器件内部存在寄生电阻）热噪声、散弹噪声、闪烁噪声。

### (1) 电阻热噪声 (Thermal Noise)

该噪声由器件内部的寄生电阻产生。理论和实验证明：晶体二极管中，热噪声是由二极管的等效电阻  $r_d$  决定的，其噪声电压的均方值为

$$\overline{u_n^2} = 4kTr_d B \quad (1-4)$$

式中， $k$  为玻耳兹曼常数， $T$  为温度， $B$  为频带宽度。

晶体三极管中，电子不规则的热运动同样会产生热噪声。由于三极管的集电极与发射极掺杂浓度高，寄生电阻相对较小，所以集电极与发射极产生的噪声可以基本忽略，三极管的热噪声主要由基极电阻  $r_{bb'}$  产生，其噪声电压的均方值为

$$\overline{u_n^2} = 4kTr_{bb'} B \quad (1-5)$$

场效应管中由于沟道有电阻，并且沟道电阻主要是由漂移电流形成的，因而 MOS 场效应管噪声主要是由沟道电阻的热噪声形成的。MOS 场效应管的漏极噪声模型可以表示为

$$\overline{i_{nd}^2} = 4kT\gamma g_{d0} B \quad (1-6)$$

式中， $\gamma$  为加权系数，线性区为 1，饱和区略有减小， $g_{d0}$  为  $U_{ds} = 0$  时的共源输出电导。由以上公式可知，有源器件的电阻热噪声正比于温度  $T$  与频带宽度  $B$ 。

### (2) 散弹噪声 (Shot Noise)

在有源器件中，电流是由无数载流子的定向迁移形成的。由于各种载流子的速度不尽相同，使得单位时间内通过 PN 结的载流子数目有所起伏，因而引起通过 PN 结的电流在某一个平均值上做不规则的起伏变化，人们把这种噪声干扰现象比拟成靶场上大量射击时子弹对靶心的偏离，故称之为散弹噪声。

理论分析与实验证明，PN 的正偏与反偏均会产生散弹噪声。如晶体三极管中，发射结与集电结均会产生散弹噪声，发射结的散弹噪声主要取决于发射极电流  $I_e$ ，集电结的散弹噪声主要取决于集电结反向饱和电流  $I_{co}$ ，由于  $I_e$  远大于  $I_{co}$ ，所以三极管发射结产生的散弹噪声起主要作用，其噪声电流的均方值为

$$\overline{i_n^2} = 2qI_e B \quad (1-7)$$

式中， $q$  为电子电量， $B$  为带宽。

由式 (1-7) 可见，散弹噪声与带宽成正比，属于白噪声，另外，散弹噪声与电流的大小成正比，而前面所提到的热噪声与电流大小无关，这是两者的主要区别。

### (3) 闪烁噪声 (Flicker Noise)

这种噪声的产生机理一般认为是由于器件加工过程中表面处理不善或存在缺陷造成的, 其噪声的强度还与半导体材料的性质和外加电压大小有关。例如, MOS 场效应管栅极等效噪声模型近似可由以下公式给出

$$\overline{u_n^2} = \frac{K}{C_{ox} S} \cdot \frac{1}{f} \quad (1-8)$$

式中,  $K$  是一个与加工工艺有关的常量,  $C_{ox}$  为 MOS 管单位面积栅氧化层电容,  $S$  为 MOS 管导电沟道面积。

由式 (1-8) 可以看出, 这种噪声是低频噪声, 其噪声功率与工作频率成反比, 频率越低, 噪声功率越大, 所以该噪声又被称为  $1/f$  噪声。

## 1.4.3 噪声度量

### 1. 信噪比

噪声的有害影响一般是相对于有用信号而言的, 脱离了信号的大小而只讲噪声的大小意义不大。因此常用信号和噪声的功率比来衡量一个信号的优劣, 该比值即被定义为信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR), 即在指定频带内, 同一端口信号功率与噪声功率的比值

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P_n} \quad (1-9)$$

转化为分贝表示时, 有

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} \text{ (dB)} \quad (1-10)$$

信噪比越大, 信号质量越好, 信噪比的最小允许值与设备的接收灵敏度有关, 接收灵敏度越高, 信噪比的要求越低。另外当信号通过放大器放大后, 由于会引入电路噪声, 信噪比会逐渐减小。因此, 电路模块输出端的信噪比总是小于输入端的信噪比。

### 2. 噪声系数

信噪比虽然能够反映信号质量的好坏, 但是其反映不了电路模块对信号质量的影响, 也无法反映电路模块本身噪声性能的好坏, 因此, 人们常用电路模块 (放大器或其他线性网络) 前后信噪比的比值, 即噪声系数 (Noise Figure, NF) 来表示放大器的噪声性能。

噪声系数定义为线性二端口网络输入端信噪功率比与输出端信噪功率比的比值

$$\text{NF(dB)} = 10 \lg \frac{\text{SNR}_i}{\text{SNR}_o} = 10 \lg \frac{P_{Si} / P_{Ni}}{P_{So} / P_{No}} \quad (1-11)$$

噪声系数 NF 一般都用分贝 (dB) 表示, 是高频信号放大器特别是接收机天线之后的低噪声放大器 (Low Noise Amplifier, LNA) 的重要指标。由式 (1-11) 可见, 噪声系数表征了信号通过系统后, 系统内部噪声造成的信噪比恶化程度。噪声系数 NF 越低越好。

**【小结】** 如果系统是无噪声的, 无论系统的增益多大, 输入的信号和噪声都被同等放大, 输入/输出的信噪比应该相等, 相应的噪声系数为 1(0dB); 如果系统是有噪声的, 则噪声系数自然大于 1(0dB)。



### 1.4.4 减小电路噪声的常用方法

噪声对通信系统所造成不良影响的大小，主要用信噪比来衡量。信噪比越大，信号质量越好。提高信噪比可以从两个方面着手：一是提高信号强度，二是降低噪声。下面将简要介绍减小电路噪声影响、提高信噪比的通用方法。

#### 1. 优选低噪声器件

通过择优选择电路工作频段内噪声系数较小的低噪声器件，可以提高整个系统的抗噪声性能。特别是在通信系统前端电路中，一般接收机第一级小信号放大器均采用低噪声放大器（LNA），LNA 信号增益要求不高，但是对噪声抑制能力要求严格，其噪声性能的好坏直接影响整个系统的性能。例如，美国美信公司（Maxim）一款 LNA 产品 MAX2659 主要指标及电路框图如图 1-8 所示，其功率增益不高，但是噪声系数很低，非常适用于接收机射频前端信号放大。

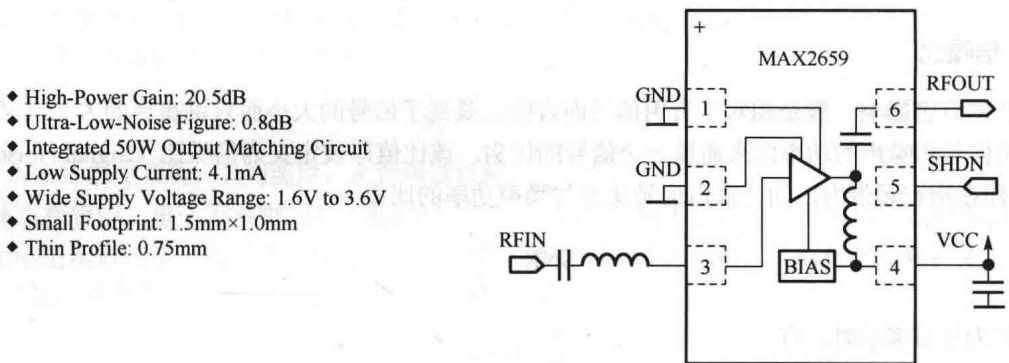


图 1-8 LNA 芯片实例

#### 2. 合理设定电路频率带宽

通信系统收发信机射频前端电路往往多处设置有不同频段的电路滤波器模块，用于信号频带之外噪声的滤除。滤波电路频带宽度的选择，既要考虑噪声的抑制（通频带尽量窄），同时又要考虑不会导致信号损失。

#### 3. 降低电路环境温度

半导体电路大多为热敏器件，随着电路工作温度的提高，半导体电路内部噪声会逐步增大，从而影响电路工作性能，因此需要考虑降低电路的环境温度。降低电路环境温度可以从两个方面着手：一是优选低压、低功耗器件，以此减小器件散热对电路性能的影响；二是增加散热装置，如机器内部增加散热片、增设散热风扇，或者使用空调保证机房环境温度常年稳定等措施。

#### 4. 优选电路方案

不同的电路方案结构，其抗噪声性能有所区别。例如，差分双端输入差分双端输出（简称双入双出），这种全差分电路结构，由于输入/输出端噪声可以相互抵消，具备优良的共模噪声抑制能力，往往被用在许多对噪声抑制要求较严格的场合，如图 1-9 中下半部分输入/输出全差分方案，由于更高的共模抑制比，其抗噪声性能要优于上半部分单入单出放大器方案。双入双出全差分电路方案的缺点是电路复杂度高、成本高，其设计思路正是以电路复杂度的提高换取噪声性能的改进。