

第1章 绪论

内容关键词

- 通信、通信电子线路、通信系统
- 高频电子线路、模拟通信原理
- 通信频段划分与应用、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，最后总结了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。本章重点如下。

- (1) 通信系统的核心理念调制与解调，掌握什么是调制，为什么要调制，如何调制。
- (2) 模拟无线通信系统的组成，明确课程后续章节展开学习的目标。
- (3) 通信系统回避不了的噪声问题，噪声来源、分类与消减方法。

通信电子电路又称为高频电子电路、射频电子电路，相比于低频电子电路（模拟电子电路）而言，主要在更高频率应用领域探讨硬件电路基本功能电路的分析与设计，所以不同功能电路的用途、性能指标与设计分析是重点。在国外一些教材中，也有将通信电子电路课程内容与数字通信原理合编成一本教材的，如著名的《现代电子通信》（Jeffrey S. Beasley 著，第九版，科学出版社），与“数字通信原理”教材对应，从内容上讲，通信电子电路又可称为“模拟通信原理”，所以课程中模拟调制与解调，包括幅度调制与解调、频率调制与解调对应的理论与硬件实现方法也是重点。

结合开课初始的课程简介，再适当拓展集成电路与单芯片通信系统发展现状与趋势，本章内容教学安排建议为2学时。

本章知识点导图如图1-0所示，其中灰色部分为需要重点关注并掌握的内容。

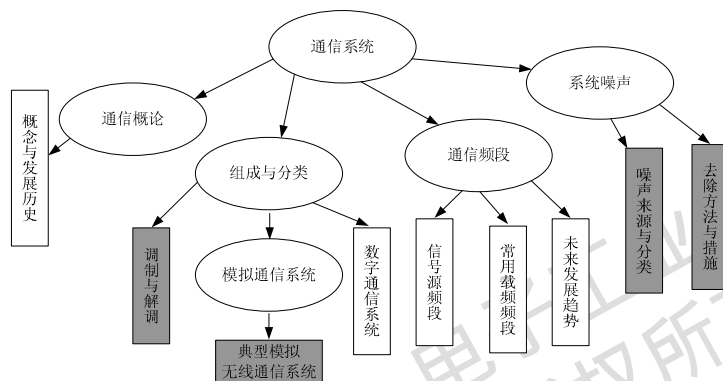


图 1-0 本章学习思维导图

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、图像与文字等。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，从更广义的角度来看，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。

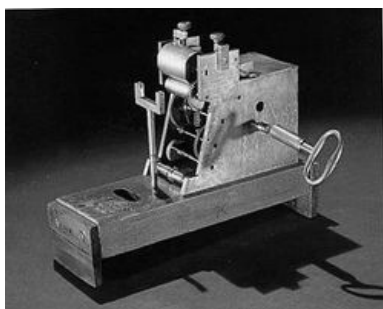


图 1-1 摩尔斯电报机



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，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，其中贡献最大的是意大利的马可尼。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：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·德弗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的里程碑。

1948年,肖克莱等发明了晶体三极管,它在节约电能、缩小体积与减小质量、延长使用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的里程碑。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,经过几十年的发展,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的里程碑。

1955年约翰·罗宾森·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年代出现全球定位系统(GPS),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 通信系统的组成与分类

1.2.1 通信系统的组成

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

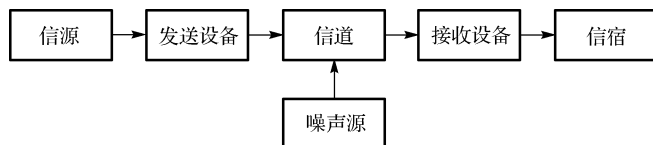


图 1-3 通信系统组成框图

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为基带信号。

2. 发送设备

发送设备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”到适合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”调制的过程可以比作实际生活中物品装载到高速列车的过程,将其称为信息传送的“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为有线通信。

4. 接收设备

接收设备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一致的信号,其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”解调的过程可以比作物品从高速列车上卸货的过程,将其称为信息传送的“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。

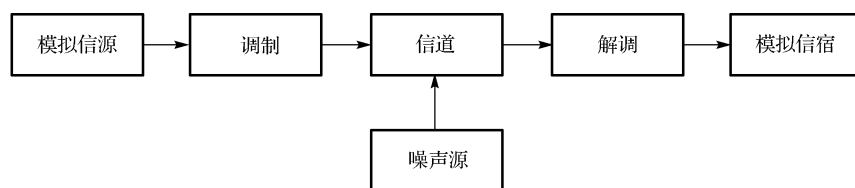
1.2.2 通信系统的分类

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为模拟通信,调制信号为数字信号的称为数字通信。按照调制方式的不同,模拟通信又分为调幅、调频和调相 3 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。

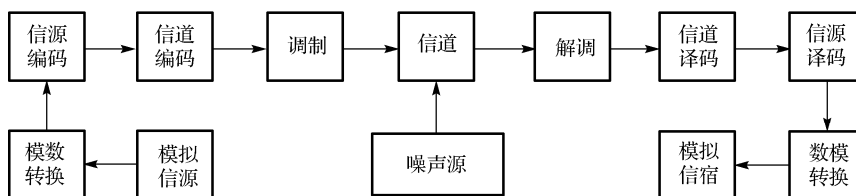
数字通信是通信系统的重要发展方向之一,其中数字软件无线电技术是今后的重要研究方向,数字通信系统框图与模拟通信系统框图的主要构成与区别如图 1-4 所示。

数字通信系统传输的是数字信号,与模拟通信系统相比,数字通信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的发展方向,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,本课程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



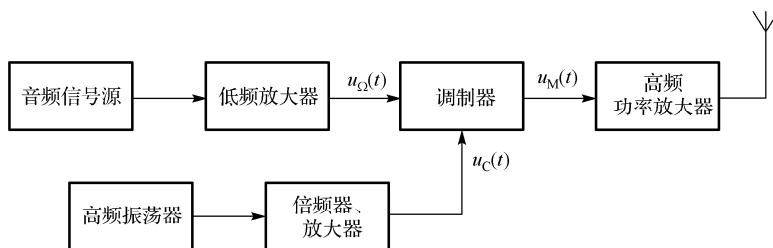
(b) 数字通信系统框图

图 1-4 模拟通信与数字通信系统框图

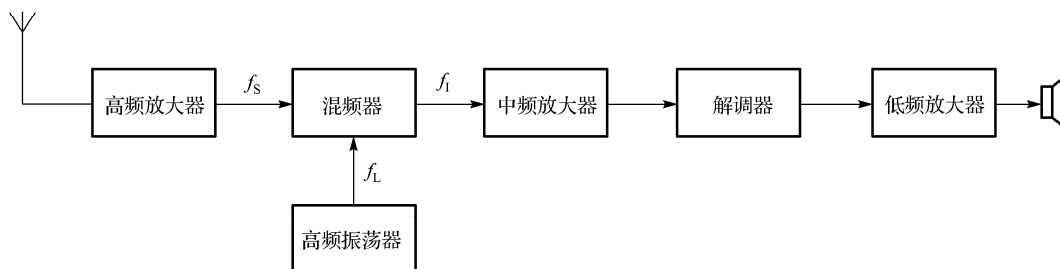
下面将以无线通信系统为例，简要介绍无线通信系统的各个功能模块。

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。下面以无线话音通信为典型案例，用来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)与图 1-5(b)所示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

在图 1-5(a)中，话音信号首先经音频信号源模块（如麦克风）完成声电转换，经放大调制后的信号 $u_{\Omega}(t)$ 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)3种形式。

2. 无线通信接收系统

在图 1-5(b)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,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3种调制方式,调幅、调频和调相对应的解调过程有所不同,分别称为检波、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,分别称为波段或频段。自由空间中,电磁波的波长 λ ,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一小部分。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 1-6 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。

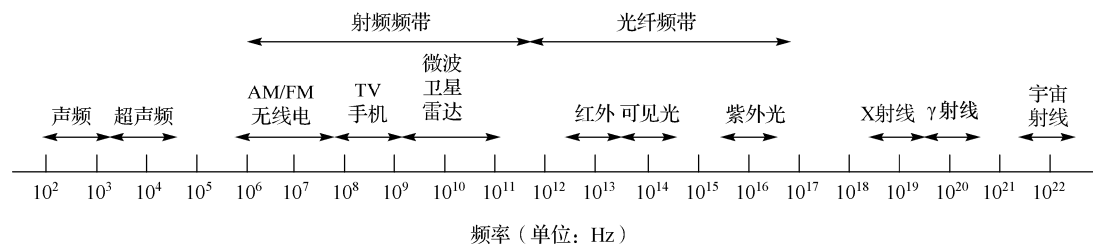


图 1-6 电磁波频段划分

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)对频率进行了划分,如表 1-1 所示。

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 (话音频率)
	$10^5 \sim 10^4$ m	3~30kHz	VLF (甚低频)
长波	$10^4 \sim 10^3$ m	30~300kHz	LF (低频)

(续表)

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称
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	$10 \sim 1$ m	30~300MHz	VHF (甚高频)
分米波	$10 \sim 1$ dm	0.3~3GHz	UHF (特高频)
厘米波	$10 \sim 1$ cm	3~30GHz	SHF (超高频)
毫米波	$10 \sim 1$ mm	30~300GHz	EHF (极高频)
亚毫米波	$10 \sim 1$ dmm	300~3000GHz	THF (至高频)

极低频 (Extremely Low Frequency, ELF) 是指频率在 30~300Hz 之间的信号, 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) 是指频率在 300Hz~3kHz 之间的信号, 包含人类的话音频率。通常使用的电话信道带宽就是 300Hz~3kHz。

甚低频 (Very Low Frequency, VLF) 是指频率在 3~30kHz 之间的信号, 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) 是指频率在 30~300kHz 之间的信号, 主要用于船舶导航、航空导航与电力通信。

中频 (Middle Frequency, MF) 是指频率在 0.3~3MHz 之间的信号, 主要用于商业、调幅 AM 广播 (535~1605kHz)。

高频 (High Frequency, HF) 是指频率在 3~30MHz 之间的信号, 通常称为短波段 (Shortwave Band), 多数的无线电通信均使用该频段, 其中包括军用通信、商业通信与业余无线电台。

甚高频 (Very High Frequency, VHF) 是指频率在 30~300MHz 之间的信号, 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) 是指频率在 0.3~3GHz 之间的信号, 该频段主要应用于商业电视广播、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) 是指频率在 3~30GHz 之间的信号, 是微波与卫星通信主要应用的频段。

极高频 (Extremely High Frequency, EHF) 是指频率在 30~300GHz 之间的信号, 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。例如, 近年来逐渐兴起的汽车雷达频率从 24GHz 逐步变为 77GHz, 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 3 个频段通常被称为微波频段, 由于 EHF 频段波长在毫米范围内, 因此 EHF 频段又被称为毫米波频段。

至高频是指频率在 300~3000GHz 之间的信号, 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”, 其频率范围一般为 20Hz~20kHz, 之所以远大于“语音

频段”的范围 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 所示为同一正弦波有无噪声时的信号。

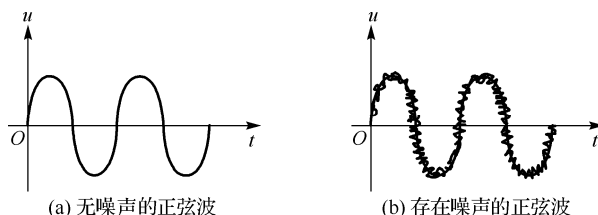


图 1-7 同一正弦波有无噪声时的信号

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介绍。

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, 其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。对于 30MHz 以上的频率, 这种大气干扰噪声的影响不再明显。另一种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。

宇宙噪声是指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, 通常分为太阳噪声和银河系噪声。

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

半导体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在有源器件中产生的，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，温度越高，运动越强烈，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的，且随时间不断变化，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 1Ω 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将在后续章节中详细介绍。

2. 有源器件噪声

除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）

电阻热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，因此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, γ 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 和频带宽度 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不同, 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作靶场上大量射击时子弹对靶心的偏离, 故称为散弹噪声。

理论分析与实验证明, PN 结的正偏与反偏均会产生散弹噪声。例如, 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} , 因此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 为频带宽度。

由式 (1-7) 可以看出, 散弹噪声与频带宽度成正比, 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)

闪烁噪声的产生机制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 为一个与加工工艺有关的常量; C_{ox} 为 MOS 管单位面积的栅氧化层电容; 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

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

转化为分贝表示时, 有

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

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

$$NF(dB) = 10 \lg \frac{SNR_i}{SNR_o} = 10 \lg \frac{P_{Si} / P_{Ni}}{P_{So} / P_{No}} \tag{1-11}$$

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）可以看出，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。

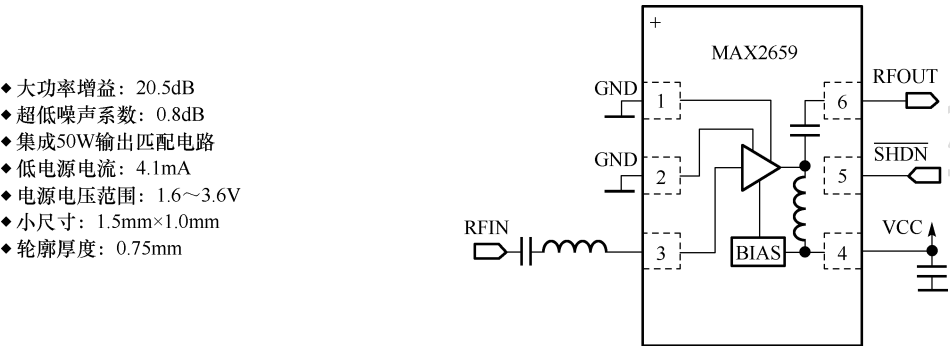


图 1-8 LNA 芯片实例

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 所示的下半部分输入/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。

5. 增加噪声屏蔽

在系统级与模块级设计上，往往还有一种较为常用的降低噪声的方法，就是增加屏蔽设计，常见的往往是电路功能模块屏蔽，也有系统整机屏蔽设计。图 1-10 所示为某款电台频率合成信号源模块，其电路完全被金属屏蔽外壳包裹，仅有输入/输出接口通过屏蔽线与外接模块连接，无论是信号输入/输出通路，还是电路模块本身，屏蔽外界噪声干扰的效果非常好。这种金属屏蔽方式设计，不但可以防止外界噪声对本模块的干扰，而且如果该模块自身为大功率电路，还可以用于防止其对外部其他模块电路的干扰。

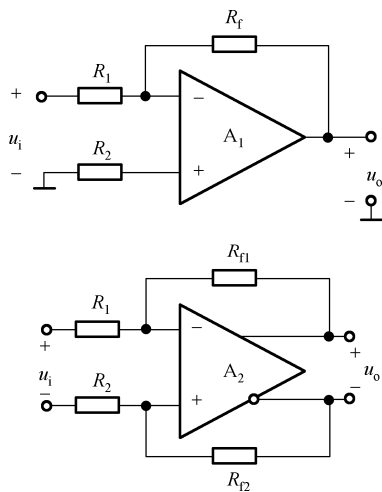


图 1-9 全差分输入/输出抗噪方案



图 1-10 某款电台频率合成信号源模块

1.5 课程主要内容与特点

本课程主要涵盖了通信系统收发信机的主要电路模块,包括小信号高频放大器、大信号高频功率放大器及收发公用模块,如高频正弦波振荡器、频率合成器与混频器等,发信机调制电路与接收机解调电路单独介绍。

内容设置方面,本课程一方面保留了部分经典的分立元器件构成的功能电路,这些电路尽管目前在实际使用过程中不常运用,但是其蕴含的经典分析方法与设计思想非常值得广大初学者学习效仿;另一方面,本课程较大幅度地增加了目前广为使用的集成电路功能模块的介绍与应用,通过介绍集成模块的内部电路框图、外部特性与典型应用电路,指导读者学习掌握基本的硬件电路分析与设计方法,提高读者学以致用用的实践能力。

通信电子电路课程对于通信大类专业的重要意义,以及在整个课程体系中的作用,编者这里还是想多说两句。在集成电路飞速发展的今天,基于分立元件设计为主体的通信电子电路课程到底要不要保留,众说纷纭,每个人都有自己的看法,但是本书认同两个观点:第一,通信电子电路内容确实需要向系统级方向改革延伸,不断推出新的电路方案与技术,同样一个功能电路,需要不断地技术跟踪引入新的方案。例如,随着物联网技术的发展,许多收发模块基于电路简化目的逐步更多采用了零中频发射与接收方案,而传统教材却是以超外差结构为主,所以通信电子电路系统级方案需要与时俱进,需要及时增补零中频一类的新方案并对比阐述清楚各自方案的优缺点。第二,经典分立元件构建的通信电路模块同样非常具有保留价值。大家知道,计算机软件开发中有一项称为“软件算法”的设计工作非常有价值,同样,在通信工程硬件设计过程中一样存在“硬件算法”。例如,从调制解调的数学理论基础到通信电子电路的硬件实现,存在着严格的数学公式推导到硬件实现电路的转化,整个过程对学生的数学理论基础、工程设计思维与前续电类基础功能电路的拓展理解与运用都非常具有价值,可以说通信电子电路课程是通信专业大学四年少有的几门专业基础课程,其能够将数学理论和多门专业基础课,如电路、信号、模电与数电等汇集在一起找到知识的应用场景,可以让学生真正体会学有所用的意义所在。

从硬件角度讲,本课程主要讲解高频频段电子电路的设计技术,相对于低频电子电路而言,通信电子电路又称为高频电子电路;从通信系统调制与解调的角度讲,本课程主要讲解模拟调制与解调理论和硬件实现电路,如经典调幅与调频,相对于数字通信原理课程而言,通信电子电路又称为模拟通信原理,所以本课程承前启后的重要骨干作用不言而喻。

通信电子电路课程的教学,除了介绍经典电路模块知识,作为一门打开专业思维的专业入门课程,无论是教学还是自学,实施过程中都需要逐步锻炼科学的分析与设计电路的方法、理论和电路算法的实现,以及相同电路特性却完全两种不同甚至对立的应用设计思路。学习过程中需要不断拓展知识结构的理解,从如何分析与设计电路出发,逐步升级为多加探讨问题的来源与出发点、问题是否有更好的改进方法。

结合目前通信电子电路技术发展最新动态,每个章节适度引入了电子线路辅助设计软件 Multisim 设计案例,使得读者能够较为方便地完成各种功能电路的虚拟仿真验证,有利于提高读者的电路分析与设计能力。读者在理论学习之余,可以有兴趣地开展功能电路虚拟仿真设计实验,通过增补介于理论到实践之间重要的仿真实验环节,有利于读者理论学

习与实验操作相互促进,有利于读者知识体系的完整与动手能力的培养。另外,本课程还配套出版了对应的实验专用教材,力图打通从理论教学到虚拟仿真实验再到实物实验的完整环节,进一步形成理论与实践的闭环,提升学习效果,如图 1-11 所示。

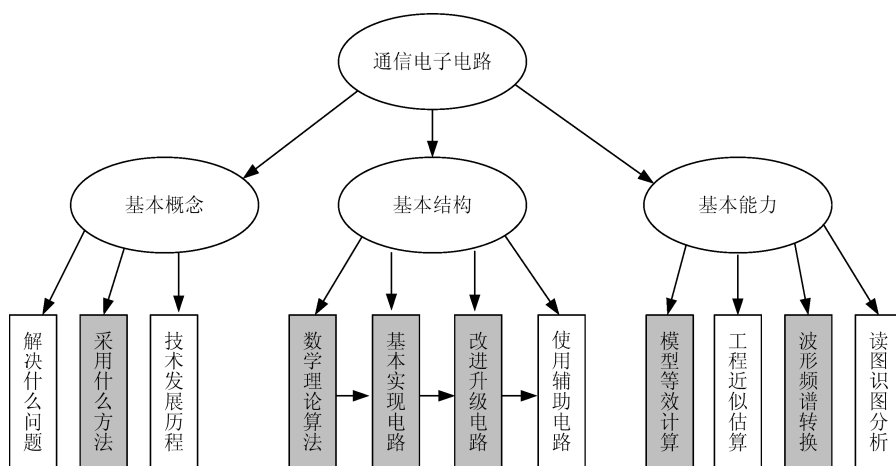


图 1-11 课程学习重点

【科学人物】 无线电之父：马可尼

伽利尔摩·马可尼 (Guglielmo Marconi): 无线电之父、企业家、诺贝尔物理奖获得者。

马可尼 1874 年 4 月出生于意大利的一个富商家庭,从小博览群书,特别是在电磁方面做了许多实验。因为母亲的祖籍是英国,他小时候经常随母亲漂洋过海,到英国走亲访友,途中他想念父亲,在船上经常遇到各种意外,又无法与陆地通信,感觉非常不方便,所以马可尼经常想:能否设计出一种方法,能够实现海上与陆地之间的人员通信,这个问题始终困扰与激励着他,最终促使他发明了无线电和电报。



马可尼从小对事情具有独立见解并具备良好的创新精神,对无线电的追求伴随着他的一生,促使他在成长中学以致用,使之成为公认的无线电之父。

习 题

1. 画出通信系统基本框图,并分别说明各模块的功能。
2. 画出无线通信收发信机电路基本框图。
3. 什么是调制?什么是解调?通信系统为什么要进行调制与解调?
4. 数字通信系统与模拟通信系统结构框图的主要区别是什么?数字通信系统相比于模拟通信系统的主要优势是什么?
5. 噪声主要有哪些种类?常用减小噪声的方法有哪些?
6. 结合模拟无线通信系统框图,简单估计无线收发信机应该有哪些主要性能指标?

本章参考文献

- [1] 张有光, 王梦醒, 赵恒, 等. 电子信息类专业导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [2] 顾宝良. 通信电子电路[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [3] 余萍, 李然, 贾惠彬. 通信电子电路[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

电子工业出版社有限公司
版权所有 盗版必究