

新世纪电子信息课程系列规划教材

# 现代无线通信系统与技术

XIANDAI WUXIAN TONGXIN XITONG  
YU JISHU

主 编 王贤君



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

新世纪电子信息课程系列规划教材

# 现代无线通信系统与技术

主 编 王贤君  
参 编 何一鸣 俞伟钧 张立臣  
        黄海龙 孙宏章 陈洲峰

东南大学出版社  
· 南 京 ·

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了现代无线通信技术的历史与现状、无线通信系统原理、信号传输理论基础、无线电波信号的传播、无线通信天线、无线通信扩频技术、蜂窝移动通信原理、GSM 移动通信技术、CDMA 移动通信技术、数字微波通信、数字微波通信系统主设备、本地多点分配业务、多信道多点分配业务。

本书力求反映应用型本科的要求和理工类专业的教学特点,内容力求由浅入深,循序渐进,通俗易懂,基本概念和基本知识准确清晰,叙述简明扼要,尽量避免繁琐的数学推导,并且特别注意以形象直观的形式配合文字表述,重点突出,以帮助读者掌握现代无线通信技术的主要内容。

本书可适应不同层次的读者选用,既可用做高等学校理工类本科教材,也适用于各类工程技术人员参考、阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代无线通信系统与技术/王贤君主编. —南京:东南大学出版社,2009.5

(新世纪电子信息课程系列规划教材)

ISBN 978-7-5641-1646-0

I. 现… II. 王… III. 无线电通信—高等学校—教材 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 061873 号

### 现代无线通信系统与技术

---

出版发行 东南大学出版社

出版人 江汉

社 址 南京市四牌楼 2 号

邮 编 210096

---

经 销 江苏省新华书店

印 刷 南京京新印刷厂

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 9

字 数 222 千字

书 号 ISBN 978-7-5641-1646-0

印 次 2009 年 5 月第 1 次印刷

版 次 2009 年 5 月第 1 版

印 数 1—3500

定 价 20.00 元

---

(凡因印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话:025-83792328)

# 前 言

根据 2003 年 1 月由教育部组织、全国高等学校教学研究中心在黑龙江工程学院主持召开的“21 世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题审定会的有关精神,在原高等学校通用的《现代通信技术》的基础上,根据理工类应用型本科专业的特点,编写了本书。

本书内容共三篇:第一篇主要介绍无线信号传输理论基础,包括无线通信系统原理、信号传输理论基础、无线电波信号的传播、无线通信天线、无线通信扩频技术;第二篇主要介绍蜂窝移动通信网络技术,包括蜂窝移动通信原理、GSM 移动通信技术、CDMA 移动通信技术;第三篇主要介绍数字微波通信技术,包括数字微波通信、数字微波通信系统主设备、本地多点分配业务、多信道多点分配业务。

为了使读者能全面、系统地掌握现代通信技术的系统知识,达到教育部对应用型本科的要求,在编写本教材时,根据应用型本科的特点,力求由浅入深,循序渐进,通俗易懂,基本概念和基本知识准确清晰,现代无线通信知识的叙述简明扼要,尽量避免繁琐的数学推导。

本书注意以形象直观的形式配合文字表述,重点突出,以帮助读者掌握关键技术并全面理解现代无线通信的内容。

本书每章都附有相关的习题,以帮助读者更多地了解相关知识。

本书由王贤君任主编,何一鸣、俞伟钧、张立臣、黄海龙、孙宏章、陈洲峰任参编。本书由王贤君定稿、由钱显毅主审。

为了方便教师教学和与作者交流,本书作者将向使用本书的教学单位提供 PPT 及相关教学资料,联系方式 wangxianj@czu.cn。

由于作者水平有限,书中难免有错误或不足之处,敬请广大读者批评、指正。

王贤君

2008 年 11 月

# 目 录

## 第一篇 无线信号传输理论基础

<b>1</b>	<b>无线通信系统原理</b> .....	(1)
1.1	无线通信简史 .....	(1)
1.1.1	无线通信的起源 .....	(1)
1.1.2	蜂窝移动电话的发明 .....	(1)
1.1.3	全球蜂窝移动通信网络 .....	(1)
1.2	无线通信的基本概念 .....	(2)
1.2.1	单工通信和双工通信 .....	(2)
1.2.2	无线通信网络 .....	(3)
1.3	信号和噪声分析 .....	(3)
1.3.1	信号的调制 .....	(3)
1.3.2	噪声 .....	(3)
1.3.3	信噪比 .....	(4)
1.3.4	噪声系数和噪声温度 .....	(4)
1.4	频率域信号分析 .....	(5)
1.4.1	数学基础——傅里叶集 .....	(6)
1.4.2	信号的有限带宽 .....	(6)
1.4.3	噪声功率谱密度 .....	(6)
1.5	无线电频谱 .....	(7)
1.5.1	无线通信领域的频谱 .....	(7)
1.5.2	信号的带宽约束 .....	(8)
1.5.3	频谱资源的再利用 .....	(9)
	习题 1 .....	(9)
<b>2</b>	<b>信号传输理论基础</b> .....	(10)
2.1	信号的概念 .....	(10)
2.1.1	时域 .....	(10)
2.1.2	频域 .....	(11)
2.1.3	比特率与带宽的关系 .....	(12)
2.2	信号的传输 .....	(12)
2.2.1	模拟数据和数字数据 .....	(12)
2.2.2	模拟信号和数字信号 .....	(13)
2.2.3	模拟信号和数字信号的传输 .....	(14)

2.3	信道容量 .....	(14)
2.3.1	尼奎斯特带宽 .....	(15)
2.3.2	香农公式 .....	(15)
2.4	无线电信号传输媒质 .....	(16)
2.4.1	地面微波传输 .....	(16)
2.4.2	卫星微波传输 .....	(17)
2.4.3	广播无线电波 .....	(18)
2.4.4	红外线电波 .....	(18)
2.5	信号传输的多路复用技术 .....	(18)
	习题 2 .....	(21)
<b>3</b>	<b>无线电波信号的传播</b> .....	(22)
3.1	无线电波在自由空间的传播 .....	(22)
3.1.1	无线电波的传播方式 .....	(22)
3.1.2	无线电波的基本性质 .....	(22)
3.1.3	自由空间的传播损耗 .....	(23)
3.1.4	自由空间条件下的收信电平 .....	(24)
3.2	地形对电波传播的影响 .....	(25)
3.2.1	在平滑地面上的电波传播 .....	(25)
3.2.2	在球形地面上的电波传播 .....	(27)
3.3	大气对电波传播的影响 .....	(29)
3.3.1	大气对电波的吸收 .....	(29)
3.3.2	雨雾引起的电波衰减 .....	(29)
3.3.3	大气引起电波发生折射 .....	(30)
3.4	电波传播中的衰落特性 .....	(33)
3.4.1	电波传播衰落的基本概念和性质 .....	(33)
3.4.2	平衰落及其瑞利分布统计特性 .....	(34)
3.4.3	频率选择性衰落 .....	(36)
3.5	抗衰落技术 .....	(40)
3.5.1	概述 .....	(40)
3.5.2	空间分集技术 .....	(41)
3.5.3	频率分集技术 .....	(44)
3.5.4	自适应均衡技术 .....	(45)
3.5.5	智能天线技术 .....	(47)
	习题 3 .....	(49)
<b>4</b>	<b>无线通信天线</b> .....	(50)
4.1	概述 .....	(50)
4.2	简单天线 .....	(50)
4.2.1	半波偶极天线 .....	(50)
4.2.2	辐射电阻 .....	(51)
4.3	天线的特性 .....	(52)

4.3.1	天线的辐射图 .....	(52)
4.3.2	天线的增益和方向性 .....	(54)
4.3.3	天线的波束宽度 .....	(55)
4.3.4	前后向增益比 .....	(55)
4.3.5	主波瓣和副波瓣 .....	(56)
4.3.6	有效全向辐射功率和有效辐射功率 .....	(56)
4.3.7	天线的阻抗 .....	(57)
4.3.8	极化 .....	(57)
习题 4 .....		(57)
<b>5</b>	<b>无线通信扩频技术 .....</b>	<b>(58)</b>
5.1	扩频技术原理 .....	(58)
5.2	跳频扩频技术 .....	(58)
5.2.1	跳频的原理和方法 .....	(58)
5.2.2	采用多相频移键控的跳频扩频 .....	(60)
5.2.3	跳频的扩频增益 .....	(61)
5.3	直接序列扩频技术 .....	(61)
5.4	码分多址技术 .....	(62)
5.4.1	码分多址的基本原理 .....	(62)
5.4.2	直接序列扩频的码分多址 .....	(63)
5.4.3	码分多址扩展序列的生成 .....	(64)
习题 5 .....		(64)

## 第二篇 蜂窝移动通信网络技术

<b>6</b>	<b>蜂窝移动通信 .....</b>	<b>(66)</b>
6.1	蜂窝移动通信网络结构 .....	(66)
6.1.1	概述 .....	(66)
6.1.2	蜂窝式网络组织 .....	(66)
6.1.3	频率复用 .....	(67)
6.1.4	容量的增加 .....	(68)
6.2	蜂窝移动通信系统的工作原理 .....	(68)
6.2.1	蜂窝式移动电话系统的原理 .....	(68)
6.2.2	移动电话呼叫流程 .....	(69)
6.3	移动通信网络信号的传播和覆盖 .....	(70)
6.4	越区切换 .....	(71)
6.5	功率控制 .....	(72)
6.5.1	开环功率控制 .....	(72)
6.5.2	闭环功率控制 .....	(72)
6.6	话务容量设计 .....	(72)
6.6.1	无线话务量模型 .....	(72)
6.6.2	无限信息源和呼损清除模型 .....	(73)

习题 6 .....	(74)
<b>7 GSM 移动通信技术</b> .....	(75)
7.1 概述 .....	(75)
7.1.1 第一代和第二代蜂窝移动通信系统 .....	(75)
7.1.2 频分多址和时分多址技术 .....	(75)
7.1.3 时分多址的主要设计参数 .....	(76)
7.2 GSM 的网络结构 .....	(76)
7.2.1 移动终端 .....	(77)
7.2.2 基站子系统 .....	(77)
7.2.3 网络子系统 .....	(77)
7.3 GSM 的信道和时隙 .....	(77)
7.3.1 时分多址帧格式 .....	(78)
7.3.2 GSM 的语音编码 .....	(79)
7.3.3 GSM 的数据编码 .....	(79)
7.3.4 慢跳频技术 .....	(79)
7.3.5 时延均衡 .....	(79)
7.4 GSM 的信令体系 .....	(79)
习题 7 .....	(80)
<b>8 码分多址移动通信技术</b> .....	(82)
8.1 概述 .....	(82)
8.1.1 码分多址蜂窝系统的优点 .....	(82)
8.1.2 码分多址蜂窝系统的缺点 .....	(82)
8.1.3 Rake 接收原理 .....	(82)
8.1.4 软切换 .....	(83)
8.2 码分多址的无线信道 .....	(83)
8.2.1 IS-95 的前向链路 .....	(84)
8.2.2 IS-95 的反向链路 .....	(85)
8.3 第三代移动通信系统 .....	(86)
8.3.1 概述 .....	(86)
8.3.2 IMT-2000 的无线接口 .....	(87)
8.3.3 宽带码分多址的链路设计 .....	(88)
8.3.4 CDMA2000 1X EV-DO 系统 .....	(88)
习题 8 .....	(90)

### 第三篇 数字微波通信技术

<b>9 数字微波通信和数字微波通信系统</b> .....	(91)
9.1 数字微波通信 .....	(91)
9.1.1 无线电波的频段划分及微波通信的常用频段 .....	(91)
9.1.2 微波的传播特性 .....	(92)



9.1.3	数字微波通信的特点	(92)
9.1.4	数字微波通信的分类	(93)
9.1.5	地面微波中继通信的应用	(94)
9.2	数字微波通信系统	(95)
9.2.1	数字微波通信链路的构成	(95)
9.2.2	数字微波通信系统的组成	(96)
9.2.3	数字微波通信系统的性能指标	(97)
	习题 9	(98)
<b>10</b>	<b>数字微波通信的主设备</b>	(99)
10.1	发信设备	(99)
10.1.1	发信设备的构成	(99)
10.1.2	发信设备的主要性能指标	(100)
10.1.3	微波振荡源	(101)
10.1.4	上变频器	(102)
10.1.5	线性功率放大器	(103)
10.2	收信设备	(104)
10.2.1	收信设备的构成	(104)
10.2.2	收信设备的主要性能指标	(104)
10.2.3	微波低噪声放大器	(105)
10.2.4	微波收信混频电路	(106)
10.3	微波通信的天馈系统	(107)
10.3.1	微波通信天线和馈线系统	(107)
10.3.2	微波通信天线的技术要求	(108)
10.3.3	微波通信天线的类型	(112)
10.4	微波通信的干扰和噪声	(113)
	习题 10	(114)
<b>11</b>	<b>本地多点分配业务</b>	(115)
11.1	概述	(115)
11.2	LMDS 系统的结构、特点和应用	(115)
11.2.1	LMDS 系统的结构	(115)
11.2.2	LMDS 系统的特点	(117)
11.2.3	LMDS 系统的应用	(117)
11.3	LMDS 系统的频率分配	(118)
11.3.1	分配的基本原则	(118)
11.3.2	工作频段	(118)
11.3.3	频段配置	(118)
11.3.4	频段带宽的选择	(119)
11.4	LMDS 系统的技术分析	(121)
11.4.1	双工方式	(121)
11.4.2	复用/多址方式	(121)

---

11.4.3	调制方式	(122)
11.4.4	组网方式	(122)
11.4.5	抗雨衰影响的措施	(122)
11.5	典型 LMDS 系统	(123)
11.5.1	概述	(123)
11.5.2	系统的组成	(123)
<b>12</b>	<b>多信道多点分配业务</b>	<b>(125)</b>
12.1	概述	(125)
12.2	MMDS 系统的结构、特点和应用	(125)
12.2.1	MMDS 系统的结构	(125)
12.2.2	MMDS 系统的特点	(127)
12.2.3	MMDS 系统的应用	(127)
12.3	MMDS 系统的频率分配	(128)
12.3.1	工作频段	(128)
12.3.2	频段配置	(128)
12.4	MMDS 系统的技术分析	(129)
12.4.1	双工方式	(129)
12.4.2	调制方式	(129)
12.4.3	复用/多址方式	(129)
12.5	典型 MMDS 系统	(129)
12.5.1	概述	(129)
12.5.2	系统的结构	(130)
12.5.3	系统的特点	(132)
	参考文献	(133)

# 第一篇 无线信号传输理论基础

## 1 无线通信系统原理

### 1.1 无线通信简史

#### 1.1.1 无线通信的起源

无线通信比有线通信的起步稍晚一些。1901年,发明家马可尼把长波无线电信号从英国传送到加拿大,实现了横跨英吉利海峡和大西洋的通信。这些成功使无线电被广泛用于船只与船只之间以及船只与海岸之间利用莫尔斯电码进行的通信。一个世纪以来,无线通信技术的发展为人类带来了收音机、电视、移动电话和通信卫星。

第二次世界大战大大地刺激了无线通信技术的发展,其中包括可以在战场上携带的报话机可以说是今天的移动电话的远祖。战后,移动式无线通信系统得到快速发展,并且很快从军用转为民用。1957年,美国民用无线通信系统得到了推广应用。

#### 1.1.2 蜂窝移动电话的发明

世界上第一个蜂窝无线服务系统于1979年在日本安装,紧随其后是1983年的北美服务系统。蜂窝电话系统与先前的无线电话服务系统相比,有一个很大的不同,就是它的每个发射器的功率被故意设计得相当小,使得它的覆盖面也小,被称为“蜂窝”。许多小蜂窝的便用,使得频率可以在小范围内得到重复使用。当然,移动电话可以在进行交谈时从一个蜂窝移动到另一个蜂窝。实际上,这种切换(蜂窝交替)在一次谈话中可以发生好几次。由于计算机技术的发展,我们能够跟踪并完成所有这些切换,才有了今天实用的蜂窝电话系统。

最初的蜂窝电话系统使用的是模拟调频发射方式,不过现在使用的是更高保密性和带宽效率更高的数字调制移动电话系统。

#### 1.1.3 全球蜂窝移动通信网络

现代的蜂窝网络不再是单一的,由国际电信联盟开发制定的全球移动联网的无线通信网络标准,主要有20世纪80年代欧洲的全球移动通信系统(GSM)以及90年代初北美的码分多址(CDMA)无线通信系统。21世纪初,国际电信联盟制定了第三代全球移动通信标准IMT-2000,主要内容包含三大技术标准,即欧洲的宽带码分多址(WCDMA)技术标准、北美的CDMA2000技术标准、中国的时分-同步码分多址(TD-SCDMA)技术标准。三大技术标准各领风骚,即将组建全球宽带移动通信网络,构建一个覆盖全球的无线通信世界。

## 1.2 无线通信的基本概念

最基本的无线通信系统由发射器、接收器和通常作为无线连接的信道组成,如图 1.1 所示。由于无线电不能直接使用如人类语音那样的低频,因此需要在发射器中将传递的低频信息加到高频载波信号上,这个过程叫做调制。通过调制也可以使多个信息信号共用一个无线信道,只要对每个信息信号使用不同的载波频率即可。调制的逆过程叫做解调,它是在接收器中进行的,目的是恢复出原始信息。

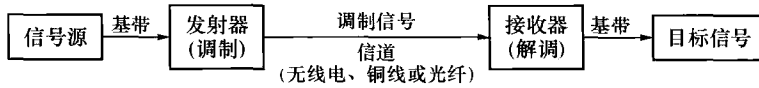


图 1.1 通信系统的原理

### 1.2.1 单工通信和双工通信

图 1.1 所示的是单工通信系统,通信只有一个方向,即从发射器到接收器。广播系统即属此例,只不过它的每个发射器可对应许多个接收器。

我们学习研究的大多数系统都是双向通信,除非特别申明以外。双向通信就是可以双向同时进行信息交换,称为全双工通信。普通的电话即是全双工通信的例子,当两个人通话时,它们可以同时说话和聆听对方说话,尽管这种情况并不经常发生。图 1.2 所示为全双工通信系统原理。

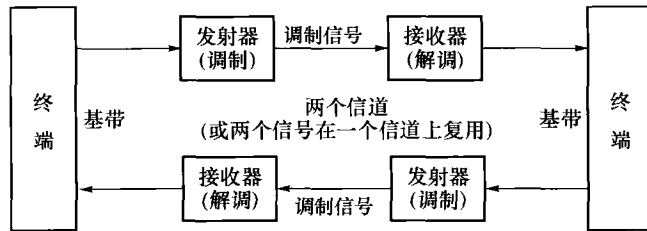


图 1.2 全双工通信系统原理

有些双向通信不要求在两个方向上同时进行通信,称为半双工通信。通过无线电台、步话机等进行交谈即是半双工通信的例子,操作员按下按钮开始说话,然后释放按钮开始接听。半双工系统由于使用同一信道进行双向通信,因此节省了带宽。由于它将一些电路部件用在收发器中,既用于接收也用于发射,所以价格也较低廉。不过,它牺牲了全双工通信所体现出的一些自然性。图 1.3 所示的就是半双工通信系统。

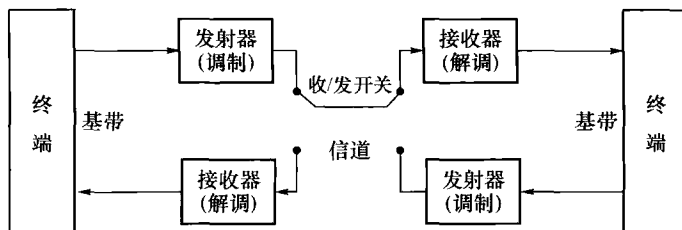


图 1.3 半双工通信系统原理

## 1.2.2 无线通信网络

以上给出的全双工和半双工通信系统仅用于两个用户之间的通信。但是有多个用户同时使用时,或者当两个用户相距遥远,彼此不能直接通信时,就需要其他形式的通信网络。网络可以有多种形式,最常用和最基本的无线通信结构可能是经典的星形网络,如图 1.4 所示。

位于该网络中央的集线器类似于中继器,它由发射器和接收器组成,它们在天线的位置选择上考虑了能够较好地将来自一个移动无线设备的信号中继到另一个移动无线设备。中继器也可以连接到有线电话或数据网。

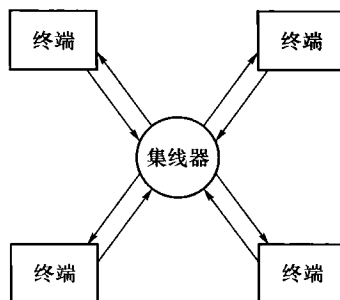


图 1.4 星形无线通信网络

## 1.3 信号和噪声分析

每个通信系统在许多方面都有不同的特点,但是有两个方面它们是一样的:一个是它们都有信号传输,用于承载有用信息;另一个就是它们都有噪声,产生于各个噪声源,并且进入系统,使信号变形,降低通信质量。保持一个足够高的信号与噪声之比,是通信系统设计工作的基础。这个信号与噪声之比称为信噪比(SNR),单位一般为分贝(dB),它是所有通信系统的一个很重要的指标。

### 1.3.1 信号的调制

假设需要将一个高频信号调制到一个低频基带信号上,正弦波的一般方程如下:

$$e(t) = E_c \sin(\omega_c t + \theta) \quad (1.1)$$

式中: $e(t)$ 为瞬时电压,为时间的函数; $E_c$ 为载波的峰值电压; $\omega_c$ 为载波频率(rad/s); $t$ 为时间(s); $\theta$ 为相位角(rad)。

从式(1.1)可以看出,一个正弦波只有幅值 $E_c$ ,频率 $\omega$ 和相位角 $\theta$ 三个可变参数。这三个参数可以两两或全部同时发生改变,例如,在数字通信中经常需要同时改变信号的幅值和相位角。

一旦决定改变或者调制正弦波信号,就会使该波形复杂化。这样,在信号中存在的就不止一种频率,因此就要占用带宽。

### 1.3.2 噪声

如果伴随信号的噪声太强,使得从发射器传到接收器的信号难以提取,则信号的发送就是失败的。所有的电子系统都会受到噪声的影响,而噪声的产生可以有许多噪声源,噪声的一个主要来源是热噪声。任何材料处于绝对温度以上时,其分子的随机运动会产生热噪声。系统运动时的热噪声功率与其带宽成正比:

$$P_N = kTB \quad (1.2)$$

式中: $P_N$ 为噪声功率(W); $k = 1.38 \times 10^{-23}$ (J/K),为波尔兹曼常数; $T$ 为绝对温度值(K); $B$ 为噪声功率带宽(Hz)。

这里的“带宽”指的是所观测到的噪声的频率范围。如果系统的带宽是无限的,则从理论上来说其噪声功率也将是无限的。当然,实际的系统不可能有无限的带宽。

**【例 1.1】** 温度为 25 °C 时的电阻器,与放大器的带宽为 50 kHz 的输入端相连接。问该电阻器提供给该放大器输入端的噪声是多少?

**解** 首先将摄氏温度(°C)转换为绝对温度  $T(K)$ ,

$$T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273 = 25 + 273 = 298 \text{ (K)}$$

代入式(1.2),得到:

$$P_N = kTB = 1.38 \times 10^{-23} \times 198 \times 50 \times 10^3 = 2.06 \times 10^{-16} \text{ (W)}$$

### 1.3.3 信噪比

对于任何一个通信系统来说,保持一个合理的信号功率与噪声功率之比是至关重要的。有两种显而易见的方法可以提高信噪比:增加信号功率,或减小噪声功率。增加信号功率如果超过了一定的限度,就会产生问题,这对于便携式和电池驱动的设备而言尤其如此。减小噪声功率就要求限制带宽,而且如果可能的话,还要减小系统的温度。系统的带宽必须足够大,以便能够把信号的带宽包括进去,但同时也不应过大。因此在给定功率和带宽的情况下,有些信号调制方案在发送信息方面就会比另一些方案更加有效。

### 1.3.4 噪声系数和噪声温度

对于复杂的系统而言,其噪声的温度不一定要等于系统的实际运行温度,可以更高,也可以更低。电子系统的噪声温度经常是以噪声系数来表示的。

噪声系数表述的是设备通过将噪声引入信号而使信噪比发生退化的程度。其定义如下:

$$k_{\text{NF}} = \frac{\text{SNR}_i}{\text{SNR}_o} \quad (1.3)$$

式中: $\text{SNR}_i$  为输入端的信噪比; $\text{SNR}_o$  为输出端的信噪比。

以上 SNR 均指功率之比,而不是 dB 值。如果设备为多级设备,其每一级都会产生噪声,但是第一级是最重要的,因为在第一级引入的噪声会在以后各级被放大。这种情况可用如下公式来表达:

$$k_{\text{NF1}} = k_{\text{NF1}} + \frac{k_{\text{NF2}} - 1}{A_1} + \frac{k_{\text{NF3}} - 1}{A_1 A_2} + \dots \quad (1.4)$$

式中: $k_{\text{NF1}}$  为系统总的噪声系数; $k_{\text{NF1}}$  为第一级的噪声系数; $k_{\text{NF2}}$  为第二级的噪声系数; $A_1$  为第一级的增益; $A_2$  为第二级的增益。

以上  $k_{\text{NF}}$  均指功率之比,而不是 dB 值。系统的噪声指数通常转换成 dB 的形式,公式如下:

$$k_{\text{NF}} \text{ (dB)} = 10 \log k_{\text{NF}} \quad (1.5)$$

将噪声系数转换成噪声温度:

$$T_{\text{eq}} = 290(k_{\text{NF}} - 1) \quad (1.6)$$

式中: $T_{\text{eq}}$  为等效噪声温度(K); $k_{\text{NF}}$  为噪声指数(以功率比率的形式,而不是以 dB 的形式)。

**【例 1.2】** 某三级放大器的各级参数如表 1.1 所示,其中增益和噪声系数是比率数据。

表 1.1 某三级放大器的参数

级序号	功能增益	噪声指数
1	10	2
2	25	4
3	30	5

计算出整个放大器以 dB 表示的功率增益和噪声增益,以及等效噪声温度。

**解** 放大器的功率增益为它的各增益之积:

$$A_T = A_1 A_2 A_3 = 10 \times 25 \times 30 = 7\,500 = 38.8 \text{ (dB)}$$

噪声系数为:

$$\begin{aligned} k_{NF1} &= k_{NF1} + \frac{k_{NF2} - 1}{A_1} + \frac{k_{NF3} - 1}{A_1 A_2} + \dots \\ &= 2 + \frac{4 - 1}{10} + \frac{5 - 1}{10 \times 25} = 2.316 = 3.65 \text{ (dB)} \end{aligned}$$

等效噪声温度为:

$$T_{eq} = 290 \times (k_{NF} - 1) = 290 \times (2.316 - 1) = 382 \text{ (K)}$$

## 1.4 频率域信号分析

大家对信号的时间域(简称时域)表示比较熟悉。通常示波器上显示的幅值-时间坐标下的信号波形,就是时域表示的信号。

信号也可以在频率域(简称频域)中描述。在频域表示中,幅值或功率作为一个坐标轴,而频率则作为坐标的另一个轴。频谱分析仪给出的就是信号的频域表示。

任何信号都可以用这两种方法表示。例如,一个 1 kHz 的正弦波用两种方法表示的结果如图 1.5 所示。图 1.5(a)为时域表示;图 1.5(b)为频域表示,由于正弦波只在基频有能量,因此它的频域表示是在该频率上的一条直线。

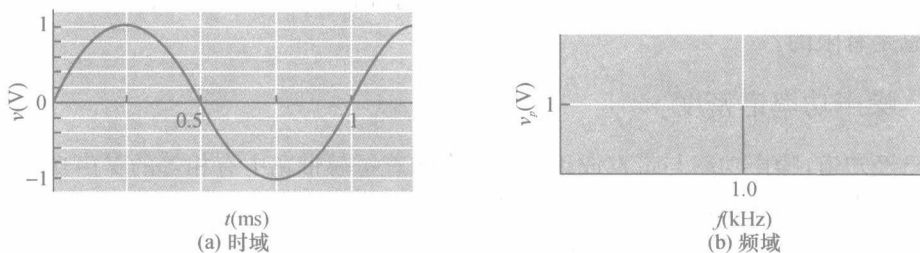


图 1.5 正弦波信号的时域和频域表示

需要注意,在频域中表示信号时没有给出信号的相位,因此图 1.5(b)也可以作为余弦波的频域表示。

### 1.4.1 数学基础——傅里叶集

显然需要有一种途径使时域与频域之间能够相互自由变换。任何规范的周期性波形都可以表示成一系列频率为基频整数倍的正弦波/余弦波的叠加,当然有时也加上直流分量。这称为傅里叶集。这个周期规律是由法国数学家傅里叶于1822年在研究热传导时发现的。在通信中使用的信号并非都是严格周期性的,但是它们在实际使用中很接近于周期性。

傅里叶的发现如果应用于时变信号,在数学表达上可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{A_0}{2} + \sum_n (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \\ &= \frac{A_0}{2} + A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t + A_2 \cos 2\omega t + B_2 \sin 2\omega t + \cdots \end{aligned} \quad (1.7)$$

式中: $f(t)$ 为任何规范的时间函数; $A_n$ 和 $B_n$ 为实数系数,也就是说,可以为正数、负数或零; $n=1,2,\dots$ ; $\omega$ 为以弧度表示的基频频率。

在信号的时域表示中找到周期(即信号完全重复的时间 $T$ ),并且使用如下公式就可以得到以弧度表示的频率(简称弧频):

$$\begin{cases} f = \frac{1}{T} \\ \omega = 2\pi f \end{cases} \quad (1.8)$$

最简单的交流信号是正弦曲线。前面已经介绍了正弦波的频域表示,并且在图1.5中给出了周期为1ms和峰值幅值为1V的电压正弦波。对于这个信号,除了 $B_1=1$ V之外的所有的傅里叶系数均为0。其公式为:

$$v(t) = \sin 2000\pi t \text{ (V)} \quad (1.9)$$

### 1.4.2 信号的有限带宽

我们可以看到,许多信号都有理论上无限大的带宽。限制信道的频率响应将会去掉一些频率分量,并使信号的时域表示失真。非均衡的频率响应将会突出一些分量,而牺牲另一些分量,这也会造成失真。非线性的相位移动也将影响信号的时域表示。

尽管理论上要求的是无限的带宽,但是方波(矩形波)是由有限带宽的信号得到的。一般地,带宽越宽越好,但是具有有限带宽的信号也能得到所需的结果。这一点很重要,因为实际系统的带宽总是有限的。

### 1.4.3 噪声功率谱密度

我们已经知道,噪声功率与带宽成正比。这意味着每赫带宽中有相等的噪声功率。有时这种噪声称为白噪声,也就是说它包含所有的频率,就像白光包含所有颜色的光一样。实际上,可以讨论噪声功率谱密度,表示每赫带宽的功率(W)。其公式的推导很简单。式(1.2)给出的是带宽为 $B$ 时的总噪声功率。如要计算每赫的功率,只需除以带宽即可得到更加简单的公式:

$$N_0 = kT \quad (1.10)$$

式中: $N_0$ 为噪声功率谱密度(W/Hz); $k$ 为波尔兹曼常数, $k=1.38 \times 10^{-23}$  J/K; $T$ 为绝对温度(K)。



**【例 1.3】**

(1) 电阻的噪声温度为 300 K。计算其噪声功率谱密度并绘制噪声频谱。

(2) 系统的噪声温度为 300 K,工作频率为 100 MHz,带宽为 1 MHz。绘制出噪声频谱。

**解** (1) 根据式(1.10):

$$N_0 = kT = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 300 \text{ K} = 4.14 \times 10^{-21} \text{ (W/Hz)}$$

其频谱如图 1.6(a)所示。注意该频谱为一直线,表明各个频率处的噪声功率密度都相同。所示的频率范围为 0~1 GHz,但是理论上的频谱是无限平直的。当然,实际系统中永远不会有无限频率响应。

(2) 这里给出的噪声功率密度与(1)中的噪声功率密度相同,只是同时给出了 1 MHz 的带宽。因此,得到有限带宽的频谱如图 1.6(b)所示。其具体形状取决于所用的滤波器类型。这里假设使用的是理想滤波器,在带宽之外完全衰减。

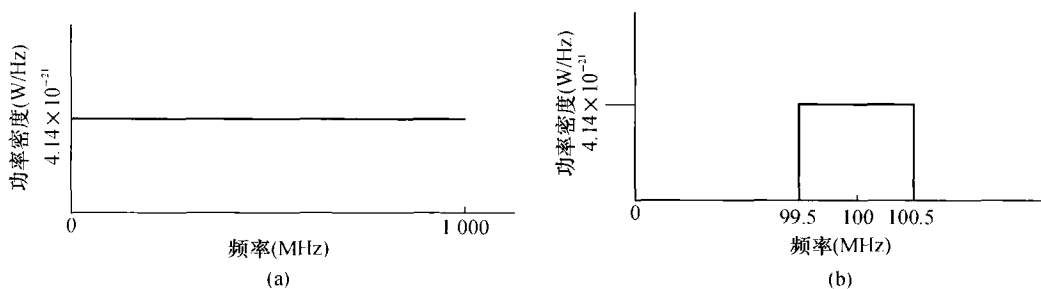


图 1.6 电阻器噪声频谱

## 1.5 无线电频谱

### 1.5.1 无线通信领域的频谱

无线电波是一种电磁辐射,红外线、可见光、紫外线以及  $\gamma$  射线均属此类,它们之间的不同之处是波的频率。当前用于无线通信的频谱范围已经从约 100 kHz 扩展到约 50 GHz。表 1.2 给出的是目前用于无线通信的各种频率范围及其对应波长范围的分配。

表 1.2 无线通信领域的频谱

频率分配	频率范围	波长范围	波长分配
极高频	30~300 GHz	1 mm~1 cm	毫米波
超高频	3~30 GHz	1~10 cm	微波(微波区域一般开始于 1 GHz)
特高频	300 MHz ~3 GHz	10 cm~1 m	
甚高频	30~300 MHz	1~10 m	
高频	3~30 MHz	10~100 m	短波
中频	300 kHz ~30 MHz	100 m~1 km	中波

频率与波长之间的转换相当容易。对于任何波来说,其频率和波长的关系式如下:

$$v = f\lambda \quad (1.11)$$