

WLV

高等职业院校
物联网应用技术专业“十二五”规划系列教材

无线通信技术

WUXIAN TONGXIN JISHU



总 主 编 任德齐
副总主编 陈 良 程远东
主 编 杨 槐
副 主 编 王建勇
主 审 王小平



重庆大学出版社

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

无线通信技术

主 编 杨 槐
副主编 王建勇

重庆大学出版社

内容提要

本书主要介绍物联网应用中的常用无线通信技术,内容包括短距离无线通信技术及移动通信领域的几个热点技术:RFID技术、ZigBee技术、WLAN技术、蓝牙技术、红外技术、超宽带技术、移动通信技术。本书全面分析了这些无线通信技术的基本理论、基本技术,并兼顾具体实际应用。在介绍每种无线通信技术时,均采用循序渐进的方式,有助于引导读者在短时间内掌握无线通信技术及其组网技术的基本理论和研究方法,并为其应用提供了很好的技术参考。本书通俗易懂,具有较强的操作性和实用性。

本书可作为高等职业院校物联网应用技术专业、电子信息工程专业、通信技术专业及其相关专业的无线通信技术课程的教材,还可以作为无线通信技术爱好者和相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无线通信技术/杨槐主编.—重庆:重庆大学出版社,2015.6
高等职业院校物联网应用技术专业系列教材
ISBN 978-7-5624-9156-9

I.①无… II.①杨… III.①无线电通信—
高等职业教育—教材 IV.①TP92

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第126405号

无线通信技术

主 编 杨 槐

副主编 王建勇

责任编辑:章 可 版式设计:章 可
责任校对:关德强 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路21号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

POD:重庆书源排校有限公司

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.75 字数:380千

2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷

ISBN 978-7-5624-9156-9 定价:35.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究

序 言

近几年来,物联网作为新一代信息通信技术,继计算机、互联网之后掀起了席卷世界的第三次信息产业浪潮。信息产业第一次浪潮兴起于20世纪50年代,以信息处理PC机为代表;20世纪80年代,以互联网、通信网络为代表的信息传输推动了信息产业的第二次浪潮;而2008年兴起的以传感网、物联网为代表的信息获取或信息感知,推动信息产业进入第三次浪潮。

与错失前两次信息产业浪潮不同,我国与国际同步开始物联网的研究。2009年8月,温家宝总理在视察中科院无锡物联网产业研究所时提出“感知中国”概念,物联网被正式列为国家五大新兴战略性产业之一。当前我国在物联网国际标准制定、自主知识产权、产业应用和制造等方面均具有一定的优势,成为国际传感网标准化的四大主导国之一。据不完全统计,目前全国已有28个省市将物联网作为新兴产业发展重点之一。2012年国家发布了《物联网“十二五”发展规划》,物联网将大量应用于智能交通、智能物流、智能电网、智能医疗、智能环保、智能农业等重点行业领域中。业内预计,未来五年全球物联网产业市场将呈现快速增长态势,年均增长率接近25%。保守预计,到2015年中国物联网产业将实现5000多亿元的规模,年均增长率达11%左右。

产业的发展离不开人才的支撑,急需大批的物联网应用技术高素质技能人才。物联网广阔的行业应用领域为高等职业教育敞开了宽广的大门,带来了无限生机,越来越多的院校开办这个专业。截止到2012年,国内已有400余所高职院校开设了物联网相关专业(方向),着眼培养物联网应用型人才。由于物联网属于电子信息领域的交叉领域,物联网应用技术专业与电子、计算机以及通信网络等传统电子信息专业有何差异?物联网应用技术人才需要掌握的专业核心技能究竟是哪些?物联网应用技术专业该如何建设?这些问题需要深入思考。作为新专业有许多工作要做:制订专业的培养方案、专业课程体系、实训室建设,同时急需要开发与之配套的教材、教学资源。

2012年6月,针对物联网专业建设过程中面临的共性问题,重庆工商职业学院、重庆电子工程职业学院、重庆城市管理职业学院、绵阳职业技术学院、四川信息职业技术学院、成都职业技术学院、贵州交通职业技术学院、武汉职业技术学院、九江职业技术学院、重庆正大软件职业技术学院、四川工程职业技术学院、重庆航天职业技术学院、重庆管理职业学院、重庆科创职业学院、昆明冶金高等专科学校、陕西工业职业技术学院等西部国家示范和国家骨干高职院校联合倡议,在重庆大学、四川大学等“985”高校专家的指导下,在重庆物联网产业联盟组织的支持下,依托重庆大学出版社,发起成立了国内第一个由“985”高校专家、行业专家、职业学院教师等物联网行业技术与教育精英人才组成的“全国高等

职业院校物联网应用技术专业研究协作会”(简称协作会)。旨在开发物联网信息资源、探索与研究职业教育中物联网应用技术专业的特点与规律、推进物联网教学模式改革及课程建设。协作会的成立为“雾里看花”的国内高职物联网相关专业教学人员提供了一个交流、研讨、资源开发的平台,促进高职物联网应用技术专业又快又好地发展。

在协作会的统一组织下,汇集国内行业技术专家与众多高职院校从事物联网相关专业教学的资深教师联合编撰的物联网应用技术专业系列教材是“协作会”推出的第一项成果。本套教材根据物联网行业对应用技术型人才的要求进行编写,紧跟物联网行业发展进度和职业教育改革步伐,注重学生实际动手能力的培养,突出物联网企业实际工作岗位的技能要求,使教材具有良好的实践性和实用价值。帮助学生掌握物联网行业的各种技术、规范和标准,提高技能水平和实践能力,适应物联网行业对人才的要求,提高就业竞争力。系列教材具有以下特点:

1. 遵循“由易到难、由小到大”的规律构建系列教材

以学生发展为中心。满足学生需要,重视学生的个体差异和情感体验,提倡教学中设计有趣而丰富的活动,引导学生参与、参与、再参与。

教材编写时根据教学对象的知识结构和思维特点,按照学生的认知规律,由小而简单的知识开始,便于学生掌握基本的知识点和技能点,再逐步由小知识一步步叠加构成后面的大而相对复杂的知识,这样可以避免学生产生学习过程中的畏难情绪,有利于教与学。

2. 校企合作,精心选择、设计任务载体

系列教程编写过程中强调行业人员参与,每本教材都有行业一线技术专家参加编写,注重案例分析,以案例示范引领教学。根据课程特点,部分教材将编写成项目形式,将课程内容划分为几个课题,每个课题分解成若干个任务,精心选择、设计每一课题的每一个任务。各个任务中的主要知识点蕴含在各个任务载体中,学生围绕每个任务的实现而循序渐进地学习,实现相应的教学目标,从而激发学生的学习兴趣,树立学生的学习信心。

3. 教材编写遵循“实用、易学、好教”的原则

教材内容根据“实用、易学、好教”的原则编写,尽量选择生活、生产实际中的实例,突出学以致用,淡化理论推导,着重分析,简化原理讲解,突出常用的功能以及应用,使学生易学,老师好教。

我们深信,这套系列教材的出版,将会有效地推动全国高等职业院校物联网应用技术专业的教学发展,填补国内高职院校物联网技术应用专业系列教材的空白。

本系列教材比较准确地把握了物联网应用技术专业课程的特征,既可作为高职院校物联网应用技术专业的课程教材,也可作为职业培训机构的物联网相关技术培训教材,对从事物联网工作的工程技术人员也有学习参考价值。当然,鉴于物联网技术仍处于发展阶段,编者的理论水平和实践能力有限,本套教材可能存在一定缺陷和疏漏,我们衷心希望使用本系列教材的院校和师生提出宝贵建议和意见,使该系列教材得到不断的完善。

总主编 任德齐
2013年1月

前言

物联网技术被认为是继计算机、互联网之后信息产业的第三次浪潮。物联网的出现,将信息互通的方式从 H2H (Human to Human) 延伸至 M2M (Machine to Machine), 为信息化提供了更加广阔的空间。

物联网中所运用到的无线通信技术有短距离无线通信技术和移动通信技术。短距离无线通信技术旨在解决近距离设备的连接问题。该技术满足物联网终端组网, 以及物联网终端网络与电信网络互连互通的要求, 已经广泛应用于热点覆盖、家庭办公网络、家庭数字娱乐、智能楼宇、物流运输管理等方面, 并以其丰富的技术种类和优越的技术特点, 满足了物物互连的应用需求, 逐渐成为物联网架构体系的主要支撑技术。

移动通信网络能够实现无缝覆盖, 接入也很方便, 为物联网的实际应用提供了坚实的物质基础。其移动终端实现了信息节点和网络之间随时、随地的通信。其传输网络主要实现各移动节点的相互连接和信息的远程传输, 而物联网中的信息传输网络也可完成相类似的功能, 而且完全可以将移动通信网络管理维护的相关思想、架构应用到物联网的网络管理和维护。

高职物联网教材多是“物联网导论”“物联网基础”等类的书籍, 侧重介绍物联网的基本概念、基本原理以及相关应用等综述性知识, 而介绍物联网的相关核心技术的专门教材比较少。

本书系统地介绍了物联网架构体系中的一些重要支撑技术——短距离无线通信技术的概念、基本原理、技术特点及应用等, 内容包括 RFID、ZigBee、无线局域网(WLAN)、蓝牙、IrDA(红外)、超宽带(UWB)技术等。全书共有 8 个项目, 各项目内容安排如下:

项目 1 为概述, 首先介绍无线通信的定义、工作方式, 基带/频带传输、并行/串行传输、同步/异步传输以及无线电波的传播方式; 然后介绍物联网的体系结构; 最后对物联网中的无线通信技术进行简要介绍。

项目 2 为 RFID 技术, 首先从射频的概念和与其他自动识别技术对比讲起, 对 RFID 技术相关的知识进行介绍。然后对 RFID 的系统构成及其三大部件——电子标签、读写器和系统高层分别进行介绍。最后简要介绍 RFID 技术在机场管理系统和物流领域中的应用。

项目 3 为 ZigBee 网络, 首先介绍 ZigBee 技术的概念、特点、发展历程、体系结构、网络结构和协议栈; 接着着重介绍了 ZigBee 点对点数据传输实验的步骤; 最后介绍 ZigBee 的具体应用。

项目 4 为无线局域网(WLAN), 首先介绍无线局域网的概念、特点及典型应用; 然后介绍无线局域网的网络组件的选择策略与安装、网络模式; 最后介绍了搭建简单无线局域网的步骤。

项目5为蓝牙技术,首先介绍蓝牙技术的概念、主要特点、版本及标准;然后着重介绍了蓝牙技术的网络结构和系统构成。最后介绍了蓝牙技术的各种具体应用以及应用蓝牙技术组建无线局域网的步骤。

项目6为红外技术,首先介绍红外技术的概念、技术特点、发展及其标准;然后介绍红外通信的核心——IrDA协议栈;最后简要介绍IrDA的应用。

项目7为超宽带技术(UWB)。首先介绍UWB的定义、技术规范、技术特点、UWB与现代通信的区别、UWB的关键技术、标准及系统框架;最后对UWB应用的网络结构及各种应用和应用举例进行介绍。

项目8为移动通信技术。首先介绍移动通信发展的历史,移动通信网络的属性、特点、系统组成、主流业务,移动通信中用到的基本技术;然后介绍3G移动通信系统的结构、3G的3大标准以及3G的应用;最后对4G实现的性能、优点、网络结构、关键技术和标准技术进行介绍。

本书对物联网中用到的短距无线通信技术和移动通信技术领域中的几个关键技术的基本原理、技术特点及其应用均作了介绍,便于读者进一步深入地学习研究。

全书由重庆城市管理职业学院的杨槐主编,王建勇任副主编,王小平教授主审,张建碧、蔡川、杨坝、姚进、王万刚、沈昕、邓旭、陈勇、董灿、向舜然等老师和重庆市工业高级技工学校的徐玲利老师参编。项目1由杨槐、张建碧、蔡川编写,项目2由向舜然、杨槐编写,项目3由杨坝、姚进、王万刚编写,项目4、项目5由沈昕、陈勇、董灿编写,项目6由王建勇、杨槐编写,项目7由王建勇、向舜然编写,项目8由杨槐编写。在编写过程中,承蒙乐明于教授、四川信息工程职业学院的曾宝国老师和重庆工商职业学院郭斌教授等多位专家提供了大量宝贵的意见与建议,并参考和引用了相关参考资料。在此,向为本书的编写、出版工作作出贡献的所有人员深表感谢。

最后需要说明的是,由于本书涉及的内容广泛,编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在错误和不足,恳请读者批评指正。

编者
2015年3月

目录 CONTENTS



项目 1 无线通信技术概述	1
任务 1 认识无线通信技术的基本概念及业务	2
任务 2 认识物联网中的无线通信技术	30
任务 3 认识分贝和信号强度	49
项目小结	51
习题	52
项目 2 RFID 技术	53
任务 1 认识 RFID 技术	54
任务 2 认识 RFID 的系统构成	64
任务 3 RFID 的项目实施及应用	77
项目小结	80
习题	80
项目 3 ZigBee 网络	81
任务 1 认识 ZigBee 技术	82
任务 2 ZigBee 技术的应用	100
项目小结	112
习题	112
项目 4 无线局域网 (WLAN)	113
任务 1 认识无线局域网	114
任务 2 无线局域网组件的选择与安装	128
任务 3 认识无线局域网模式	139
任务 4 构建小型办公(SOHO)无线局域网	148
项目小结	159
习题	159

项目 5 蓝牙技术	161
任务 1 认识蓝牙技术	162
任务 2 蓝牙技术的应用	176
项目小结	178
习题	179
项目 6 红外技术	181
任务 1 认识红外技术	182
任务 2 红外技术的应用	197
项目小结	198
习题	199
项目 7 超宽带技术	201
任务 1 认识超宽带技术	202
任务 2 UWB 的应用	214
项目小结	219
习题	219
项目 8 移动通信技术	221
任务 1 认识现代移动通信网络	222
任务 2 认识 3G 移动通信系统	234
任务 3 认识 4G 移动通信系统	246
项目小结	264
习题	264
参考文献	265

项目1 无线通信技术概述

学习目标

- 掌握无线通信的定义、工作方式；
- 掌握基带/频带传输、并行/串行传输、同步/异步传输；
- 了解无线电波的传播方式；
- 掌握物联网的体系结构；
- 掌握物联网中的无线通信网络；
- 掌握物联网中常用的无线通信技术。

重点、难点

- 数据传输中的基带/频带传输、并行/串行传输、同步/异步传输；
- 物联网的体系结构；
- 物联网中的无线通信网络；
- 物联网中常用的无线通信技术。

任务 1 认识无线通信技术的基本概念及业务

1. 无线通信的定义

通信是将信号从一个地方向另一个地方传输的过程,用于完成信号的传递与处理的系统称为通信系统(Communication System)。现代通信要实现多个用户之间的相互连接,这种由多用户通信系统互连的通信体系称为通信网络(Communication Network)。通信网络以转接交换设备为核心,由通信链路将多个用户终端连接起来,在管理机构(包含各种通信与网络协议)的控制下实现网上各个用户之间的相互通信。

无线通信(Wireless Communication)是利用电磁波信号可以在自由空间中传播的特性进行信息交换的一种通信方式,近些年在信息通信领域中,发展最快、应用最广的就是无线通信技术。在移动中实现的无线通信又统称为移动通信。人们把二者合称为无线移动通信,与有线通信对应。

作为有线通信的补充和发展,无线通信系统自 20 世纪起,特别是 21 世纪初以来得到了迅猛的发展。其中,蜂窝移动通信从模拟无线通信发展到数字无线通信,从早期的大区制蜂窝系统,支持很少的用户,很低的数据速率,但是有较远的传输距离,到目前的宏蜂窝、微蜂窝,通信半径越来越小,支持用户越来越多,数据传输速率越来越高。从 2G、2.5G、3G 到目前在国内已经应用的 4G,毫无疑问,蜂窝移动通信技术的产生、发展及应用是通信领域最伟大的成就之一。这些蜂窝移动通信对于国民经济和国家安全具有越来越重要的意义,和人们生活紧密相关的短距离无线通信技术与系统也得到了迅速的发展。

2. 无线通信系统的组成和分类

无线通信系统有五个组成部分:信号源、发送设备、接收设备、受信人、传输媒质,如图 1.1 所示。

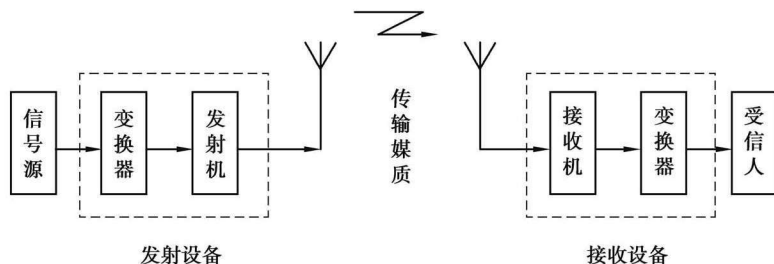


图 1.1 无线通信系统组成

◇信号源:提供需要传送的信息;



- ◇变换器:完成待发送的信号(图像、声音等)与电信号之间的转换;
- ◇发射机:将电信号转换成高频振荡信号并由天线发射出去;
- ◇传输媒质:指信息的传输通道,对于无线通信系统来说,传输媒质是指自由空间;
- ◇接收机:将接收到的高频振荡信号转换成原始电信号以方便受信人接收;
- ◇受信人:指信息的最终接收者。

按照无线通信系统中关键部分的不同特性,有以下一些类型:

按照工作频段或传输手段分类,有中波通信、短波通信、超短波通信、微波通信和卫星通信等。所谓工作频率,主要指发射与接收的射频(RF)频率。射频实际上就是“高频”的广义语,它是指适合无线电发射和传播的频率。无线通信的一个发展方向就是开辟更高的频段。

按照通信方式来分类,主要有(全)双工、半双工和单工方式。

按照调制方式的不同来划分,有调幅、调频、调相以及混合调制等。

按照传送消息的类型分类,有模拟通信和数字通信,也可以分为话音通信、图像通信、数据通信和多媒体通信等。

各种不同类型的通信系统,其系统组成和设备的复杂程度都有很大不同。但是组成设备的基本电路及其原理都是相同的,遵从同样的规律。

3. 传输信息的信号

电磁信号是一个时间的函数,也可表示为一个频率的函数。也就是说,一个信号是由不同的频率成分组成的。实际上,要理解数据传输,用频域的观点解释信号比用时域的观点解释信号重要得多。下面对这两种观点一一介绍。

1) 时域的概念

从时间函数的观点来看,一个电磁信号或是模拟的或是数字的。如果经过一段时间,信号的强度变化是平滑的,这种信号就是模拟信号(Analog Signal)。换句话说,模拟信号中没有中断或不连续。如果在某一段时间内信号强度保持某个常量值,然后在下一时段又变化为另一个常量值*,这种信号就称为数字信号(Digital Signal)。图 1.2 所示为这两种信号的例子。这里的模拟信号可能代表了一段讲话,而数字信号可能代表了二进制的 0 和 1。

最简单的信号是周期信号(Periodic Signal),它是指经过一段时间,不断重复相同信号模式的信号。图 1.3 所示的例子就是一个周期模拟信号(正弦波)和一个周期数字信号(方波)。从数学的角度来看,当且仅当信号 $s(t)$ 可表示为式(1.1)时,信号 $s(t)$ 才是周期信号,这里的常量 T 是信号周期(T 是满足该等式的最小值),否则该信号是非周期的。

$$s(t + T) = s(t) \quad (-\infty < t < +\infty) \quad (1.1)$$

* 注:这是一个理想化的定义。事实上,从一个电压电平转变为另一个电压电平并不是即时的,其间会有一个小的转换期。无论如何,实际的数字信号大致接近于理想化的具有即时转换的常量电压电平的模型。

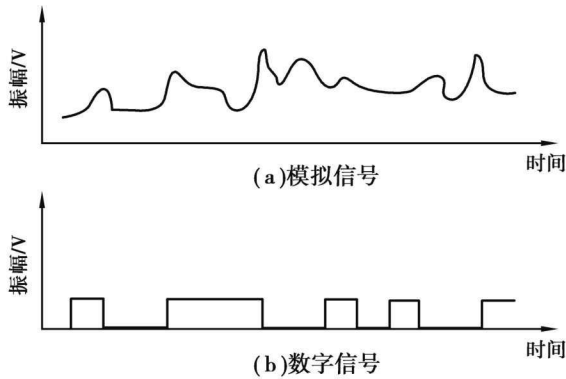


图 1.2 模拟和数字波形

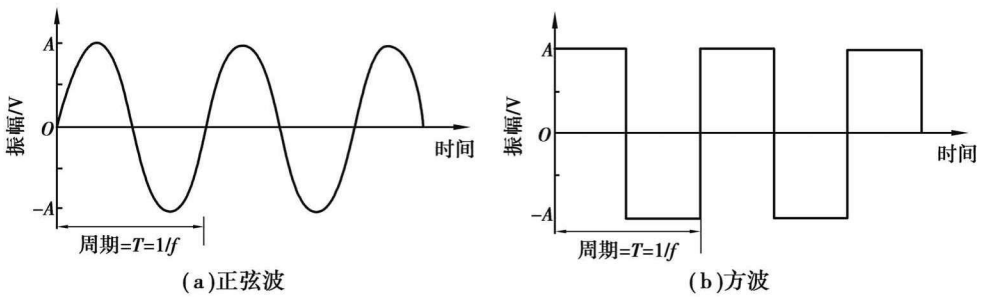


图 1.3 周期信号示例

正弦波是最基本的模拟信号。简单正弦波可以用以下 3 个参数表示:振幅(A)、频率(f)和相位(φ)。振幅(Peak Amplitude)是指一段时间内信号的最大值或强度,通常该值以伏(V)为单位来计量。频率(Frequency)是指信号循环的速度(用 Hz 或每秒的周数表示)。另一个与信号相关的参数是信号的周期(Period) T ,它是指信号重复一周所花的时间,因此 $T=1/f$ 。相位(Phase)表示了一个信号周期内信号在不同时间点上的相对位置。

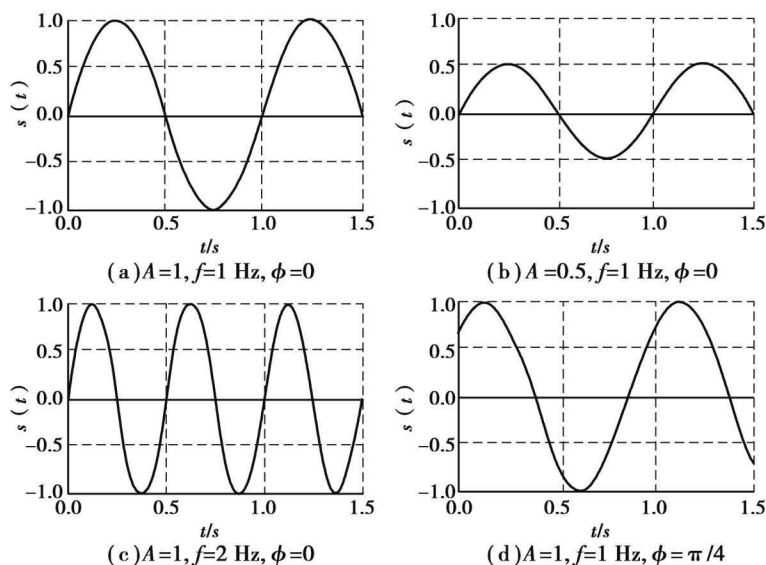
一般正弦波可用式(1.2)表示。

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi) \tag{1.2}$$

式(1.2)所表示的函数曲线是人们所熟知的正弦曲线。图 1.4 显示了当 3 个参数分别变化时对正弦波的影响。在图 1.4(a)部分,频率是 1 Hz,也就是周期 $T=1$ s。图 1.4(b)与图 1.4(a)有相同的频率和相位,但振幅只有原来的 1/2。在图 1.4(c)部分,频率 $f=2$ Hz,对应的周期 $T=0.5$ s。图 1.4(d)部分显示了相位移 $\pi/4$ rad(弧度)时的效果,也就是移动了 45° (2π rad = $360^\circ = 1$ 周期)。

图 1.4 中的横坐标代表的是时间,因此图形显示的是在空间某一给定点的信号值作为时间的函数。同样这几幅图,只要改变刻度就可以应用到横坐标轴代表空间的情况。在这种情况下,图形显示的是在某时间点的信号值可以用距离的函数来表示。例如,对一个正弦传输(假设是距广播天线一段距离的一个无线电波,或者是离喇叭某处的一个声波)来说,某一时刻信号强度是距离的函数,并以正弦波的形式变化。

这两种正弦波一个以时间为横坐标轴,另一个以空间为横坐标轴,它们之间存在着简

图 1.4 $s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$

单的相互关系。定义信号的波长(λ)为一个信号周期所占用的空间长度,或者说,是信号的两个连续周期上相位相同的两点之间的距离。假设信号传播的速度为 v ,那么波长与周期之间的关系就是 $\lambda = vT$,或者写成 $\lambda f = v$ 。与此处的讨论相关的一个特例是 $v = c$, c 是自由空间中的光速,它约为 3×10^8 m/s。

2) 频域的概念

实际上,一个电磁信号是由多种频率组成的。例如图 1.5(c)所表示的信号可用式(1.3)表示。

$$s(t) = (4/\pi) \times (\sin(2\pi ft) + (1/3)\sin((3f)t)) \quad (1.3)$$

这个信号的组成成分只有频率为 f 和 $3f$ 的正弦波。图 1.5 中(a)和(b)分别表示了这两个独立成分。从这张图中可以发现两个有趣的现象:

◇第二个频率是第一个频率的整数倍。当一个信号所有的频率成分都是某个频率的整数倍时,则后者称为基频(Fundamental Frequency)。

◇整个信号的周期等于基频周期。成分 $\sin 2\pi ft$ 的周期是 $T = 1/f$,而且 $s(t)$ 的周期也是 T ,这从图 1.5(c)中可以看出。

利用傅里叶分析可以知道,任何信号都可以由各频率成分组成,而每个频率成分都是正弦波。通过将足够多的具有适当的振幅、频率和相位的正弦信号叠加在一起,可构造任一种电磁信号。即任一电磁信号都可表示为由具有不同振幅、频率和相位的周期性模拟信号(正弦波)所组成。随着讨论的进行,从频率的观点(频域)而不是时间的观点(时域)来看信号的重要性会变得更清楚。

一个信号的频谱(Spectrum)是指它所包含的频率范围。对于图 1.5(c)中的信号,其频谱从 f 延伸到 $3f$ 。一个信号的绝对带宽(Absolute Bandwidth)是指它的频谱宽度。在图

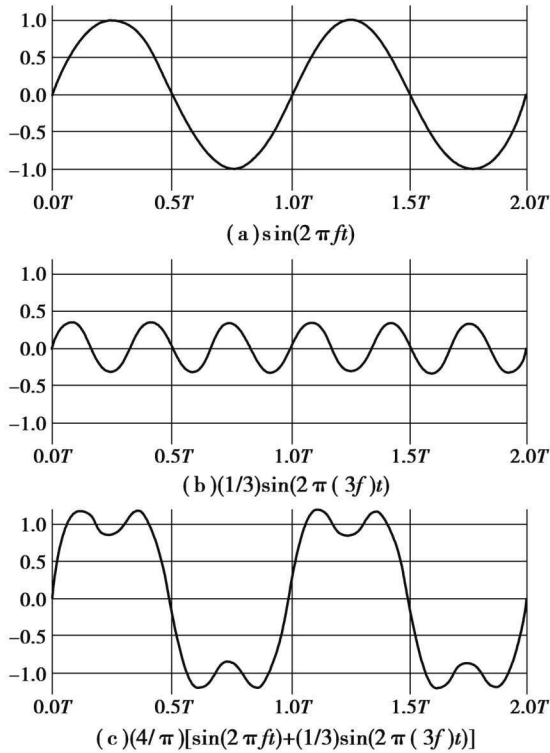


图 1.5 频率成分的叠加 ($T=1/f$)

1.5(c)的例子中,带宽是 $3f-f=2f$ 。对许多信号而言,其带宽是无限的。但是,一个信号的绝大部分能量集中在相当窄的频带内,这个频带被称为有效带宽 (Effective Bandwidth),或者称带宽 (Bandwidth)。

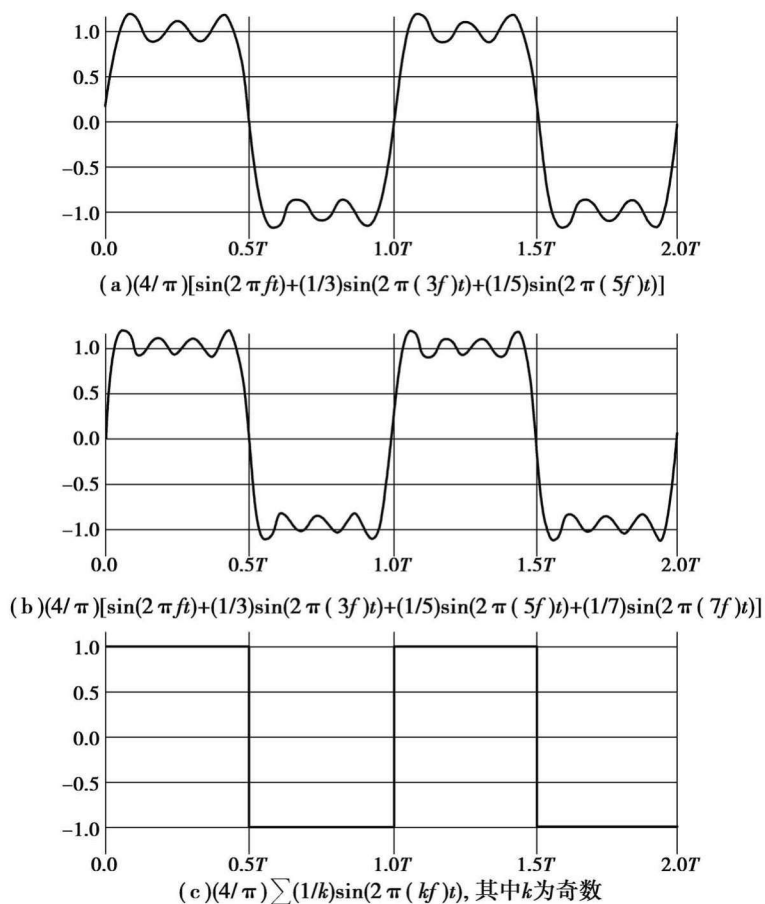
3) 数据率与带宽的关系

一个信号的信息承载能力同它的带宽之间存在着直接的关系:带宽越宽,信息承载能力就越强。举个很简单的例子,考虑一下图 1.3(b)中的方波。假设我们让正脉冲代表二进制的 0,负脉冲代表二进制的 1,则该波形就代表了二进制数字流 0101……其中,每个脉冲的持续时间是 $1/(2f)$,因此数据率 (data rate) 是 $2f$ b/s。这个信号的频率成分是什么呢?要回答这个问题,可以再考虑一下图 1.5。通过将频率为 f 和 $3f$ 的正弦波相加,我们可以得到一个类似方波的波形。让我们继续这一过程,再叠加一个频率为 $5f$ 的正弦波(如图 1.6(a)所示),然后再加上一个频率为 $7f$ 的正弦波(如图 1.6(b)所示)。当叠加更多的 f 的奇数倍正弦波,并按比例对这些正弦波的振幅加以调整后,得到的波形跟方波波形越来越接近。

事实上,具有 A 和 $-A$ 振幅的方波的频率成分可以用式(1.4)表示。

$$s(t) = A \times \frac{4}{\pi} \sum_{k \text{ 为奇数}, k=1}^{\infty} \frac{\sin(2\pi kft)}{k} \quad (1.4)$$

因此,这个波形就具有无限个频率成分,因而具有无限的带宽。尽管如此,第 k 个频

图 1.6 方波的频率成分 ($T=1/f$)

率成分 kf 的振幅仅为 $1/k$, 所以这个波形中绝大多数的能量集中在最前面的几个频率成分中。如果将带宽限制在最前面的 3 个频率成分上会发生什么呢? 图 1.6(a) 显示出了答案。正如我们所看到的, 结果波形的形状已经相当接近于原方波了。

我们可以用图 1.5 和图 1.6 来说明数据率与带宽之间的关系。假设我们使用的数字传输系统能够以 4 MHz 的带宽传输信号, 让我们试着传输一组 0、1 交替序列, 就像图 1.6(b) 所示的方波。可以获得什么样的数据率呢? 我们考察如下 3 种情况。

情况 1: 假设我们的方波近似于图 1.6(b) 中的波形。尽管这一波形是“失真”的方波, 但它与方波足够相似, 接收器应该能够区分出二进制的 0 和 1。如果令 $f=1$ MHz, 那么信号: $s(t) = \frac{4}{\pi} \times [\sin((2\pi \times 10^6)t) + \frac{1}{3}\sin((2\pi \times 3 \times 10^6)t) + \frac{1}{5}\sin((2\pi \times 5 \times 10^6)t)]$ 的带宽就是 $(5 \times 10^6) - 10^6 = 4$ MHz。请注意, 由于 $f=1$ MHz, 那么基频的周期就是 $T=1/10^6=1 \mu\text{s}$ 。因此, 如果把这个波形看成是 0 和 1 的二进制位序列, 那么每 $0.5 \mu\text{s}$ 就发生 1 位, 也就是数据率为 2 Mb/s。所以对 4 MHz 的带宽来说, 可以达到 2 Mb/s 的数据率。

情况 2: 假设具有 8 MHz 的带宽, 再来看看图 1.6(a), 这一次 $f=2$ MHz 与前面的推导

过程一样,这个信号的带宽是 $(5 \times 2 \times 10^6) - 2 \times 10^6 = 8 \text{ MHz}$,此时 $T = 1/f = 0.5 \mu\text{s}$ 。因此,0.25 μs 发生 1 位,也就是数据率为 4 Mb/s。所以,假如其他项保持不变,带宽加倍就意味着数据率加倍。

情况 3:假设图 1.5(c)中的波形被认为与方波接近。也就是说,图 1.5(b)中的正、负脉冲间的差别足够大,使波形能够成功地用来表示 0、1 序列。如像情况 2 中那样假设 $f = 2 \text{ MHz}$, $T = 1/f = 0.5 \mu\text{s}$,其结果是 0.25 μs 发生 1 位,数据率为 4 Mb/s。采用图 1.5(c)中的波形,图中信号的带宽是 $(3 \times 2 \times 10^6) - 2 \times 10^6 = 4 \text{ MHz}$ 。因此,在存在噪声和其他损伤的情况下,根据接收器区分 0 和 1 之间差别的能力,给定的带宽可以支持不同的数据率。

以上情况总结如下。

情况 1:带宽 = 4 MHz;数据率 = 2 Mbit/s;

情况 2:带宽 = 8 MHz;数据率 = 4 Mbit/s;

情况 3:带宽 = 4 MHz;数据率 = 4 Mbit/s。

从以上的讨论中我们可以得出如下结论:大体上说,任何数字波形都具有无限的带宽。如果我们试图作为一个信号在某种媒体上传输这个波形,该传输系统将限制可以被传输的带宽。更进一步说,对于任何一种媒体,传输带宽越宽,则花费也越高。因此,一方面鉴于经济上和实现上的原因,数字信息不得被近似为有限带宽的信号;另一方面,带宽的限制引起了失真,这样就更加不易将接收到的信号还原。带宽越受限制,失真就越严重,接收器产生差错的机会也就越多。

4. 模拟数据和数字数据的传输

术语模拟(Analog)和数字(Digital)大致分别与连续(Continuous)和离散(Discrete)相对应。当数据通信涉及数据、信号和传输 3 方面的内容时,会经常遇到这两个术语。

简而言之,我们可以将数据(Data)定义为传达某种意义或信息的实体。信号(Signal)是数据的电气或电磁表示。传输(Transmission)是通过信号的传播和处理进行数据通信的过程。在下面的内容中,我们将试图分别就应用于数据、信号和传输这 3 种情况,对术语模拟和数字进行讨论,以进一步阐明这些抽象的概念。

1) 模拟数据和数字数据

模拟数据和数字数据的概念十分简单。模拟数据在一段时间内具有连续的值,如声音和视频是连续变化的强度样本。大多数用感应器采集的数据(如温度和气压)数值是连续的。数字数据的值是离散的,如文本和整数。

我们最熟悉的模拟数据的例子是音频(Audio),它能以声波的形式被人类直接感受到。图 1.7 显示了人类的话音或音乐的声音

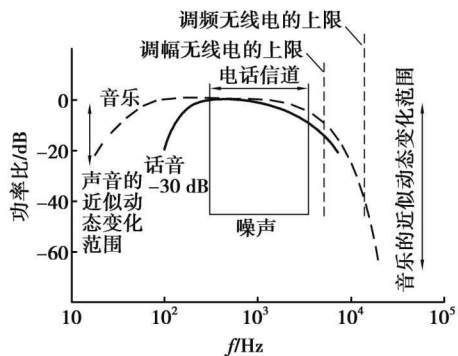


图 1.7 语音和音乐的声音频谱