

高等院校教材

信息与通信工程 原理与实验

沈连丰 主编

叶芝慧 胡 静 夏玮玮

编著

宋铁成 朱晓荣



科学出版社

www.sciencep.com

高等院校教材

信息与通信工程原理与实验

沈连丰 主编

叶芝慧 胡 静 夏玮玮

编著

宋铁成 朱晓荣

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书尝试将最新科研成果及前沿研究课题引入到教学中,深入浅出地论述了信息与通信工程的基础理论和关键技术,给出了 28 个实验,以加深读者对基本原理的理解。

全书分 10 章,分别是:基带信号及其处理、调制和解调技术、干扰和噪声对信息传输的影响、最佳接收、信道编码、扩频技术、多址技术、多址接入协议、通信系统性能评估和交换技术。本书既是教科书,又是实验、开发的指导书,图文并茂,便于自学。

本书可以作为高等院校通信、信息、电子、自动控制、计算机科学与工程等专业的本科生或研究生的相关课程(特别是实验课程)的教材,也可以作为相关的科研、生产及技术管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

信息与通信工程原理与实验/沈连丰主编;叶芝慧等编著. —北京:科学出版社,2007

(高等院校教材)

ISBN 978-7-03-018610-2

I. 信… II. ①沈…②叶… III. 通信工程-高等学校-教材 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 022280 号

责任编辑:匡 敦 余 江 宛 楠 / 责任校对:钟 洋

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 2 月第一次印刷 印张:30

印数:1—4 000

字数:570 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

前 言

近年来,教育部一直把实施“质量工程”和“创新工程”作为教育振兴的重要内容,并把实验建设作为精品课程建设的重要方面,提出要大力改革实验教学的形式和内容,鼓励开设综合性、创新性实验和研究型课程,鼓励本科生参与科研活动等。另外,不少出版社引进了一系列国外的优秀教材,与这些教材相配套的实验或实验指导书则难以引进。鉴于作者的教学和科研实践,以及为一些出版社引进教材做了部分工作,深感若能将最新科研成果以及前沿课题研究成果引入到教学中,并以实验为主要教学方式,让学生通过自己动手亲自实验,来掌握理论课程无法学到的知识,必能显著地提高学校的教学质量,更好地培养学生的创新能力和增强其就业竞争力。基于上述指导思想,作者从2002年初开始构思,至2003年10月,依托南京东大移动互联技术有限公司平台完成了15个实验设备的研制和文档的整理,编写了对应的实验指导书(讲义),先后有多家兄弟院校选用。以后又陆续研制成功10多个新型实验,至2005年初,出版本书的基础工作基本完成,其后几经修改,终于脱稿。作者期望本书和28个实验设备相辅相成,共同实践教育部提出的“质量工程”和“创新工程”,为实现以培养学生具有创新意识、创新思维和创新能力的新型教学模式贡献绵薄之力。

本书深入浅出地论述信息与通信工程中的基本原理,用目前的先进技术构建实验。书中详细阐述了实验设备与环境、实验内容及实验步骤等,对每个实验都有预习和完成实验报告的要求,还给出了思考题。此外,为了配合教学,本书还将出版配套的光盘,其中包括电子课件和思考题参考解答等内容。本书可作为高等院校通信、信息、电子、自动控制、计算机科学与技术等专业的本科生或研究生“信息与通信工程原理与实验”课程的教材,建议课程安排48学时,其中授课16学时,实验辅导32学时,要求实验者每次实验后都要认真撰写并提交实验报告。教学中可以根据实际需要和实验者的知识背景,将实验分成演示学习、动手操作和研发设计3个层次。南京东大移动互联技术有限公司研制完成了本书全部的实验设备并负责实验设备的推广應用和售后服务,还将继续推出新的实验设备,读者可以浏览其网站(<http://www.semit.com.cn>)或电话联系(025-84455801)以获取更多信息。

全书分为10章,分别是:基带信号及其处理、调制和解调技术、干扰和噪声对信息传输的影响、最佳接收、信道编码、扩频技术、多址技术、多址接入协议、通信系统性能评估和交换技术。针对近年来引进的一系列国外优秀教材和建

设精品课程的需要,严谨地论述了信号与频谱、调制和解调、信源编码、基带传输、码间串扰和均衡、干扰和噪声对信息传输的影响、分组码和卷积码、Turbo码和级联码、网格编码调制、匹配滤波器、直接序列扩频、跳频扩频、通信系统中的同步、FDMA/TDMA/CDMA/SDMA、ALOHA 协议/CSMA-CD 协议、衰落信道和时变信道、Rake 接收、加密和解密、通信系统实验平台及其性能评估、电路交换和分组交换等内容,通过 28 个实验使读者加深对基本原理的理解。

本书的许多内容基于作者及其所在的东南大学移动通信国家重点实验室近年来承担的国家、教育部、江苏省和南京市相关科研项目所取得的成果,是将科研成果应用于教学的又一次尝试。我们力图使本书具有如下特色:

(1) 充分体现通信与计算机的紧密结合、硬件和软件的紧密结合、网络和系统的概念,因此给出的实验全部是与计算机相结合的;

(2) 既可以独立作为课程的教材使用,又可以配合多本国内外的新教材(例如,科学出版社的《信息论与编码》,电子工业出版社的《通信系统》、《数字通信》、《通信系统工程》、《数字通信导论》、《模拟和数字通信导论》,国防工业出版社的《通信原理》等)使用;

(3) 书中的每一个实验都推荐与之配套的实验设备,通过实验更能直观和深刻地理解理论知识;

(4) 大部分实验基于 FPGA 和 DSP 技术,有利于学生的全面参与及创新能力的培养;

(5) 每一个实验都可延伸为研究开发的平台;

(6) 既是教科书,又是实验、开发的指导书,图文并茂,便于自学。许多使用本书前期讲义和实验设备的老师给予我们巨大鼓励,实验设备不仅应用于多门课程的教学,也是本科生毕业设计和科研实践、研究生的课题研究以及老师们研究开发工作的重要工具。

本书由沈连丰担任主编,叶芝慧、胡静、夏玮玮、宋铁成、朱晓荣等共同编著。其中:第 2~5 章由叶芝慧撰写,第 8、10 章以及第 9 章第 2 节由胡静撰写,第 1、6 章由夏玮玮撰写,第 7 章由朱晓荣撰写,第 9 章第 1 节由宋铁成撰写。大纲的构思、全书的修改完善和定稿由沈连丰负责,初校工作由叶芝慧负责。书中的实验设备由南京东大移动互联技术有限公司依托东南大学信息科学与工程学院(无线电工程系)以及移动通信国家重点实验室而研制,宋铁成负责其实施和推广应用,该公司的赵文、张文凤、唐晨、陈伟、黄慧妍、章欣、魏友银、孙捷等对每一个实验都进行了精心的测试,使之稳定可靠,他们对工作一丝不苟的精神使实验设备倍受众多老师的欢迎;徐平平、刘云参与了本书讲义和部分实验的前期工作,戚燃、瞿慧、董丽君、施永磊、陈贤明、吴满原、李庞、刘晓明、王佳、满磊、袁宇恒、陆苏、邓志详、周磊、张志海、朱志坚、朱凌云、鲁侃、郭

洁、李瑞峰、丁卉等博士研究生和硕士研究生参加了书中实验的设计与开发；东南大学教务处、研究生院和无线电工程系的领导和同事们对本书编写提出了非常宝贵的建设性意见，给予了无私支持和帮助；使用本书原讲义和实验设备的兄弟院校老师给出了很多很好的反馈意见。因此，本书及其推荐的实验设备是集体智慧的结晶，在此谨向支持作者工作和为本书做出贡献的同仁致以最诚挚的感谢。

虽然本书初稿及其系列实验已在全国多个高校使用并取得良好效果，但是，将最新的科研成果引入到教学实践是一项富有挑战性且永无止境的工作，限于时间和水平，本书和实验平台可能存在不少缺点或错误，不足之处，敬请不吝指正。

沈连丰

2006年10月

于东南大学移动通信国家重点实验室

目 录

前言

第 1 章 基带信号及其处理	1
1.1 信号与频谱	1
1.1.1 通信系统中的信号	1
1.1.2 模拟信号及其频谱分析	3
1.1.3 数字信号及其频谱分析	9
1.1.4 实验设备与软硬件环境	12
1.1.5 实验内容	12
1.1.6 实验步骤	13
1.1.7 实验报告及思考题	16
1.2 基带信号的 A/D 和 D/A 变换	17
1.2.1 基带信号的 A/D 变换	17
1.2.2 基带信号的 D/A 变换	26
1.2.3 实验设备与软硬件环境	26
1.2.4 实验内容	27
1.2.5 实验步骤	27
1.2.6 实验报告及思考题	30
1.3 信源编码	30
1.3.1 信源编码基本概念	31
1.3.2 典型的信源编码方法	32
1.3.3 无失真信源编码和限失真信源编码	37
1.3.4 实验设备及软硬件环境	39
1.3.5 实验内容	40
1.3.6 实验步骤	41
1.3.7 实验报告及思考题	46
附录	46
1.4 加密和解密	47
1.4.1 网络通信的保密机制	47
1.4.2 密码算法分类	48

1.4.3	对称密码系统和公钥密码系统	49
1.4.4	RSA 公钥系统	52
1.4.5	加密和解密实验的软硬件实现	56
1.4.6	实验设备及软硬件环境	57
1.4.7	实验内容	58
1.4.8	实验步骤	59
1.4.9	实验报告及思考题	61
1.5	码间串扰和均衡	62
1.5.1	码间串扰	62
1.5.2	线性均衡方法	70
1.5.3	实验设备及软硬件环境	76
1.5.4	实验内容	77
1.5.5	实验步骤	77
1.5.6	实验报告及思考题	83
第2章	调制和解调技术	85
2.1	模拟调制和解调	85
2.1.1	调制的基本特性和分类	86
2.1.2	线性调制	87
2.1.3	非线性调制	93
2.1.4	实验设备与软硬件环境	99
2.1.5	实验内容	99
2.1.6	实验步骤	99
2.1.7	实验报告及思考题	102
2.2	数字调制和解调	103
2.2.1	数字调制和解调基本概念	103
2.2.2	二进制数字调制和解调	104
2.2.3	多进制数字调制和解调	109
2.2.4	实验设备与软硬件环境	114
2.2.5	实验内容	114
2.2.6	实验步骤	117
2.2.7	实验报告及思考题	119
2.3	OFDM 技术	120
2.3.1	多路复用技术	120

2.3.2	OFDM 系统	123
2.3.3	实验设备与软硬件环境	132
2.3.4	实验内容	133
2.3.5	实验步骤	133
2.3.6	实验报告及思考题	138
第 3 章	干扰和噪声对信息传输的影响	139
3.1	干扰源和噪声产生器	139
3.1.1	干扰和噪声的主要来源	139
3.1.2	噪声分析中的随机过程理论	145
3.1.3	典型噪声的特性分析	147
3.1.4	实验设备与软硬件环境	149
3.1.5	实验内容	150
3.1.6	实验步骤	150
3.1.7	实验报告及思考题	154
3.2	干扰和噪声对通信的影响	155
3.2.1	干扰和噪声对模拟通信系统的影响	155
3.2.2	加性高斯白噪声信道中的数字传输	160
3.2.3	扩展频谱通信系统的抗干扰性能	164
3.2.4	实验设备与软硬件环境	168
3.2.5	实验内容	168
3.2.6	实验步骤	169
3.2.7	实验报告及思考题	175
第 4 章	最佳接收	176
4.1	匹配滤波器	176
4.1.1	假设检测和最佳判决准则	176
4.1.2	二进制确知信号的最佳接收	180
4.1.3	匹配滤波器	183
4.1.4	匹配滤波器在最佳接收机中的应用	185
4.1.5	实验设备与软硬件环境	185
4.1.6	实验内容	186
4.1.7	实验步骤	186
4.1.8	实验报告及思考题	195
4.2	通信系统的同步	196

4.2.1	同步的基本概念	196
4.2.2	载波同步	197
4.2.3	位同步	198
4.2.4	帧同步	204
4.2.5	网同步	208
4.2.6	实验设备与软硬件环境	209
4.2.7	实验内容	209
4.2.8	实验步骤	210
4.2.9	实验报告及思考题	212
第5章	信道编码	214
5.1	分组码	214
5.1.1	差错控制编码	215
5.1.2	线性分组码	217
5.1.3	循环码	220
5.1.4	BCH 码	227
5.1.5	实验设备与软硬件环境	228
5.1.6	实验内容	229
5.1.7	实验步骤	229
5.1.8	实验报告及思考题	232
5.2	卷积码	233
5.2.1	卷积码的编码	233
5.2.2	卷积码的译码	239
5.2.3	卷积码中的恶性错误传播	246
5.2.4	实验设备与软硬件环境	247
5.2.5	实验内容	247
5.2.6	实验步骤	247
5.2.7	实验报告及思考题	248
5.3	复合编码和 Turbo 码	249
5.3.1	复合编码	249
5.3.2	Turbo 码编译码原理	252
5.3.3	Turbo 码中的软判决和子译码器的迭代算法	258
5.3.4	实验设备与软硬件环境	262
5.3.5	实验内容	262

5.3.6 实验步骤	262
5.3.7 实验报告及思考题	266
5.4 网格编码调制	267
5.4.1 网格编码调制的基本原理	268
5.4.2 TCM 编码	269
5.4.3 TCM 译码	272
5.4.4 其他网格编码调制	278
5.4.5 实验设备与软硬件环境	280
5.4.6 实验内容	280
5.4.7 实验步骤	281
5.4.8 实验报告及思考题	287
第6章 扩频技术	289
6.1 直接序列扩频	289
6.1.1 扩频数字通信系统的模型	289
6.1.2 扩频通信的优点	290
6.1.3 扩频技术的理论基础	291
6.1.4 直接序列扩频系统	292
6.1.5 伪噪声序列	293
6.1.6 同步	297
6.1.7 实验设备与软硬件环境	299
6.1.8 实验内容	299
6.1.9 实验步骤	300
6.1.10 实验报告及思考题	304
6.2 跳频扩频	305
6.2.1 跳频扩频概述	305
6.2.2 跳频扩频基本理论	305
6.2.3 跳频系统	307
6.2.4 跳频方式的分类	308
6.2.5 同步	311
6.2.6 频率合成器	312
6.2.7 直接序列扩频与跳频扩频的比较	315
6.2.8 实验设备与硬软件环境	316
6.2.9 实验内容	316

6.2.10 实验步骤	317
6.2.11 实验报告及思考题	319
第7章 多址技术	321
7.1 频分多址	323
7.1.1 FDMA 的基本原理	323
7.1.2 FDMA 系统中的干扰问题	324
7.1.3 FDMA 系统的特点	327
7.1.4 实验设备与软硬件环境	328
7.1.5 实验内容	328
7.1.6 实验步骤	329
7.1.7 实验报告及思考题	332
7.2 时分多址	333
7.2.1 TDMA 原理	333
7.2.2 TDMA 的帧结构	334
7.2.3 TDMA 系统的同步与定时	336
7.2.4 TDMA 的主要特性	339
7.2.5 实验设备与软硬件环境	340
7.2.6 实验内容	341
7.2.7 实验步骤	342
7.2.8 实验报告及思考题	345
7.3 码分多址	345
7.3.1 CDMA 的基本原理	346
7.3.2 DS-CDMA 的基本单元	347
7.3.3 扩频序列设计	353
7.3.4 CDMA 系统的特点	354
7.3.5 实验设备与软硬件环境	355
7.3.6 实验内容	355
7.3.7 实验步骤	355
7.3.8 实验报告及思考题	360
7.4 空分多址	361
7.4.1 SDMA 的基本原理	361
7.4.2 SDMA 的实现方案	362
7.4.3 SDMA 与传统多址方式的结合应用	365

7.4.4	SDMA 系统的特点	366
7.4.5	实验设备与软硬件环境	367
7.4.6	实验内容	367
7.4.7	实验步骤	368
7.4.8	实验报告及思考题	369
第 8 章	多址接入协议	371
8.1	ALOHA 协议	371
8.1.1	纯 ALOHA 协议	371
8.1.2	时隙 ALOHA 协议	375
8.1.3	实验设备与软硬件环境	377
8.1.4	实验内容	378
8.1.5	实验步骤	379
8.1.6	实验报告及思考题	386
8.2	CSMA/CD 协议	387
8.2.1	CSMA/CD 简介	387
8.2.2	以太网与 CSMA/CD	389
8.2.3	CSMA/CD 的效率	395
8.2.4	实验设备与软硬件环境	396
8.2.5	实验内容	396
8.2.6	实验步骤	397
8.2.7	实验报告及思考题	402
第 9 章	通信系统性能评估	404
9.1	时变信道和衰落信道	404
9.1.1	无线信道传输媒质的特点	404
9.1.2	无线信道对传输信号的影响	405
9.1.3	信道仿真原理	410
9.1.4	实验设备与软硬件环境	413
9.1.5	实验内容	414
9.1.6	实验步骤	414
9.1.7	实验报告及思考题	419
9.2	通信系统性能评估	420
9.2.1	数字通信系统模型	421
9.2.2	通信系统的系统权衡	422

9.2.3 信道模型	427
9.2.4 实验设备与软硬件环境	427
9.2.5 实验内容	428
9.2.6 实验步骤	429
9.2.7 实验报告及思考题	436
第 10 章 交换技术	438
10.1 电路交换	439
10.1.1 交换的基本概念	439
10.1.2 电路交换原理	439
10.1.3 电路交换技术的特点	443
10.1.4 实验设备与软硬件环境	444
10.1.5 实验内容	444
10.1.6 实验步骤	445
10.1.7 实验报告及思考题	447
10.2 分组交换技术	447
10.2.1 报文交换原理	447
10.2.2 分组交换原理	449
10.2.3 电路交换与分组交换的对比	453
10.2.4 实验设备与软硬件环境	455
10.2.5 实验内容	455
10.2.6 实验步骤	455
10.2.7 实验报告及思考题	456
参考文献	459
索引	461

第 1 章 基带信号及其处理

在通信和信息系统中，通常把要传输和处理的信号分为基带信号和已调信号。广义而言，信源输出或送给调制器的将被调制的信号通称为基带信号，而经过调制的信号称为已调信号。

图 1.1 给出了通信系统的一般框图。由图 1.1 可见，涉及基带信号的部分包括信源、信源编码、加密、信道编码等。本章集中讨论基带信号的处理及传输问题，包括信号与频谱、基带信号的 A/D 和 D/A 变换、信源编码、加密和解密、码间串扰和均衡等，通过实验让读者理解基带信号处理和传输的基本原理和方法。

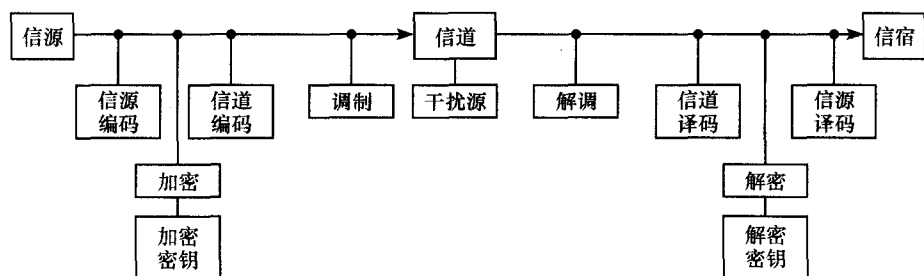


图 1.1 通信系统的一般框图

1.1 信号与频谱

研究信号最直观的方法就是观察它的时域波形和频域的频谱。本节首先讨论信号的分类，然后讨论模拟信号和数字信号的时域和频域特性，最后给出对应的实验。

1.1.1 通信系统中的信号

在通信与信息系统中，传输的主体是信号，系统所包含的各种电路、设备都是为了实施这种传输。因此，电路系统设计和制造的要求，必然要取决于信号的特性。随着待传输信号的日益复杂，相应地，信号传输系统中的元器件、电路的结构等也日益复杂。因此，对信号进行深入分析变得越来越重要。下面从不同角度对信号进行分类。

1. 确定信号和随机信号

若信号是确定的,表明其在任何时间的值都是确定已知的;若信号是随机的,则表明信号在实际发生之前具有一定的不确定性。

确定信号或波形可用明确的数学表达式来表示。例如, $x(t) = A\cos(\omega t + \theta)$, 其中 A 是信号的振幅, ω 为其角频率, θ 是它的初始相位。这里 A 、 ω 、 θ 都是具体的数字。

随机信号不能像确定信号那样用明确的解析式表达。例如,某信号的振幅、角频率或初始相位中的一个或多个是随机变量,它就是一个随机信号,若要描述它在相当长时间内的波形,用明确的解析式几乎是不可能的,只能用该随即变量的概率密度函数(或概率分布函数)及其统计特性来描述。一般来说,只能用随机变量或随机过程来描述的信号是随机信号。

2. 连续信号与离散信号

若在讨论的时间范围内,对于任意的 t , 信号 $x(t)$ 都有确定的取值,则称 $x(t)$ 是连续信号;若 $x(t)$ 只在某些不连续的时间点上有确定的取值,则称 $x(t)$ 是离散信号。在图 1.2 中,左图是连续信号,右图是离散信号。

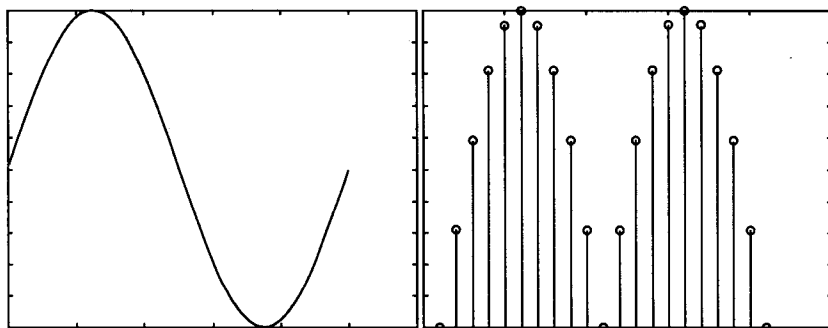


图 1.2 连续信号和离散信号

3. 模拟信号与数字信号

时间或幅度连续的信号称为模拟信号,时间和幅度都离散的信号称为数字信号。

根据上述定义,连续信号一定是模拟信号,但离散信号却不一定是数字信号。因为只有时间和幅度都离散的信号才称为数字信号。所谓时间离散,是指信号只在某些时间点上有值;所谓幅度离散,是指信号幅度的取值只能是有限个数

值,或者说信号幅度的集合只有有限个数值。一般来说,对离散信号再进行量化处理就得到了数字信号。

图 1.2 所示的两个信号均是模拟信号,但如果对右图进行量化处理就可以得到数字信号。

最典型的数字信号是二进制信号,即信号的幅度只有两个取值。

4. 周期信号和非周期信号

对于信号 $x(t)$,若存在常数 $T_0 > 0$,使得

$$x(t) = x(t + T_0), \quad -\infty < t < +\infty \quad (1.1)$$

成立,则称 $x(t)$ 是时间周期的。满足式 (1.1) 的 T_0 值称为 $x(t)$ 的周期,周期 T_0 定义了 $x(t)$ 的一个完整周期时间。如果不存在满足式 (1.1) 的 T_0 ,则称该信号为非周期信号。

信号还可以有其他的分类方法,如可以将信号分为基带信号和已调信号、能量信号和功率信号、有用信号和干扰信号等,而且各种分类彼此也都是相互关联的。

上述对信号的分类基本上都是以时间作为变量的,这种以时间作为基本变量来描述信号的方法称为时域表示法。与之对应的是频域表示法,它是以频率为基本变量来描述信号的方法。信号的时域特性可以通过示波器观察其波形来分析研究,频域特性则可以通过频谱仪观察其频谱来分析研究。

1.1.2 模拟信号及其频谱分析

信号中含有一个正弦信号分量称之为含有一个频率分量。若以频率为横坐标、频率分量的大小为纵坐标,用图形表示信号所包含的所有频率分量,就得到表征该信号频域特征的图形,称为该信号的频谱图。频谱在描述信号的频域特征中发挥着重要作用,所以首先讨论信号与其频谱之间的变换。

1. 周期信号的频谱

假设一个时域的周期信号 $f(t)$,其最小正周期为 T_0 ,令 $\Omega = 2\pi/T_0$,则 $f(t)$ 在 $(t_1, t_1 + T)$ 的时间间隔内就可以表示成

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \Omega t + a_2 \cos 2\Omega t + \cdots + a_n \cos n\Omega t + \cdots + b_1 \sin \Omega t \\ &\quad + b_2 \sin 2\Omega t + \cdots + b_n \sin n\Omega t + \cdots \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

这就是函数 $f(t)$ 在上述时间区间内的傅里叶级数 (Fourier series, FS) 表达