

传真通信与 调制解调器

朱梅英 卢官明 卢捍华 编著



人民邮电出版社

TN917.8

Z 88

390353

传真通信与调制解调器

朱梅英 卢官明 卢捍华 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书在论述了传真通信的基本原理、传输理论、调制原理和传真通信规程的基础上,详实地介绍了几种符合 ITU-T 建议 T. 30、T. 4、T. 3 的传真用调制解调器,以及符合 ITU-T 建议 V. 33、V. 32 的高速调制解调器。

本书图文并茂,是一本既有实用价值,又兼有系统理论的较好参考书,它适合于从事传真通信、数字通信、计算机通信等专业的工程技术人员,以及广大的维护使用人员参考,也适合于这些专业的研究生和大学生阅读。

传真通信与调制解调器

朱梅英 卢官明 卢捍华 编著

人民邮电出版社出版发行
北京朝阳门内南竹杆胡同 111 号
北京密云春蕾印刷厂印刷
新华书店总店科技发行所经销

*

开本:787×1092 1/16 1996 年 5 月 第 1 版
印张:21 1996 年 5 月 北京第 1 次印刷
字数:525 千字 印数:1—5 000 册

ISBN 7-115-05984-5/TN·1023

定价:25.00 元

前 言

随着我国改革开放的不断深化,通信事业发展迅猛。其中,非话业务,特别是使用方便广受欢迎的传真通信、数据通信的发展尤为迅速。本书为了适应这种需要,在论述了传真通信的基本原理、传输理论和传真通信规程的基础上,着重介绍了调制原理及几种实用调制解调器。

数据信号的传输是数据通信的关键技术之一。而目前模拟电话信道是数据信号传输的主要途径。众所周知,数字信号(包括数据信号)经模拟电话信道传输要靠调制解调器来实现。另外,高速度、高质量、数字化、多功能、小型、操作简便的文件传真三类机(G3 传真机)自 80 年代以来,发展异常迅猛,已被广泛用于通信、办公自动化和电子邮政业务,甚至开始进入千家万户。它还可以用作数据通信的输入输出设备。近几年来,将传真机计算机融为一体的 PCFAX(称个人计算机传真机或电脑传真机)也正在迅速发展和普及。而 G3 传真机、PCFAX 都是使用模拟信道传输数字信号的设备。这样,广大有关工程技术人员、维护使用人员、大专院校学生就需要学习和掌握调制解调器的相关知识。因此,本书用较大篇幅介绍了几种话路调制解调器。

本书以近十年发展最快、应用最广、使用最多的 G3 传真机及 PCFAX 所用调制解调器为例,系统、深入、详实地介绍了它们的原理及应用。这些调制解调器符合 ITU-T 建议 V. 27ter、V. 29 并具有符合建议 T. 30、T. 4 的有关要求。此外,还详实地介绍了经模拟信道、使用四线、二线,传输速率分别为 14.4kbit/s、9.6kbit/s 的全双工调制解调器。所以,本书内容不仅可为从事传真通信的广大工程技术人员参考使用,而且可为从事数据通信、计算机通信等专业的工程技术人员参考,还适合于大专院校有关专业的研究生、大学生阅读。

本书介绍的几种调制解调器都是美国 Rockwell 公司近几年生产的,具有体积小、功耗低、可编程、功能强等特点。其中有符合 ITU-T 建议 T. 30、T. 4、T. 3 规定的技术要求,可按 9600、7200、4800、2400、300 bit/s 的速率传输数据,被广泛用于文件传真三类机和 PCFAX 中的 V. 27ter、V. 29 调制解调器,还有符合 ITU-T 建议 V. 33、V. 32 的调制解调器。

全书共分九章。前四章为基础篇,介绍了文件传真三类机的组成;传真信号传输的基础理论(信号分析、波形形成、均衡和扰频等);传真信号的调制与解调(数字调频、数字调相、调幅调相混合调制、调制解调器的训练和纠错功能等);文件传真三类机的通信规程。后五章为应用篇,详实地介绍了几种实用调制解调器的性能指标、结构、功能、硬件接口、软件接口、信号等内容,包括 9600 bit/s MONOFAX 调制解调器、9600 bit/s 传真调制解调器、9600 bit/s R96PCJ PC 通信调制解调器。另外,还介绍了 R144DP V. 33 14.4kbit/s 及 1496DP V. 33 14.4kbit/s / V. 32 9600bit/s 两种通用的全双工调制解调器。最后还给出了书中涉及的英文缩略语及其英汉全称对照表。

本书第一章、第二章、第三章以及第四章由朱梅英编写,第五章、第六章、第八章由卢官明编写,卢捍华、王智顺为第五章中的部分章节提供了资料。第七章、第九章由卢捍华编写。本书由朱梅英主编,全书并由朱梅英审阅修改。在编写本书时,得到了南京通信工程学院韦文初教授和邮电部电信传输技术研究所李守静高工的大力支持,李守静高工还对本书稿内容提出了

不少宝贵意见。在此一并表示衷心的感谢。

由于我们水平有限,书中缺点错误在所难免,欢迎批评指正。

朱梅英 卢官明 卢捍华

1995年1月

目 录

第一章 引论

- 1.1 传真通信的发展史 1
- 1.2 文件传真三类机的组成 2

第二章 传真信号传输的有关基础理论

- 2.1 传真信号分析 6
 - 2.1.1 传真信号的频谱 6
 - 2.1.2 网络特性对信号波形的影响 8
- 2.2 传输信号的波形形成 11
 - 2.2.1 矩形低通信号——奈奎斯特第一准则 11
 - 2.2.2 幅度频率特性的滚降 13
 - 2.2.3 余弦滚降特性 14
 - 2.2.4 矩形脉冲的输入和网孔均衡 16
- 2.3 数据传输系统的均衡 16
 - 2.3.1 概述 16
 - 2.3.2 横向滤波器的基本组成及其实现时域均衡的原理 17
- 2.4 数据序列的扰乱和解扰 22
 - 2.4.1 最长线性移位寄存器序列——M序列 23
 - 2.4.2 自同步的扰乱器和解扰器 25
 - 2.4.3 文件传真三类机中的扰乱器和解扰器的标准 26

第三章 传真信号的调制与解调

- 3.1 数字调频 28
- 3.2 数字调相 29
 - 3.2.1 数字调相方式 30
 - 3.2.2 数字调相信号的数学表示及其频谱 33
 - 3.2.3 四相相对调相与解调的实现 35
 - 3.2.4 八相相对调相与解调的实现 42
 - 3.2.5 多相调相系统的举例 51
- 3.3 调幅调相混合调制 52
 - 3.3.1 9600 bit/s 数据信号速率 52
 - 3.3.2 数据信号速率为 7200 bit/s 53
- 3.4 调制解调器的训练 54
 - 3.4.1 V. 27ter 调制解调器的训练序列 54

3.4.2	V.29 调制解调器的训练序列	55
3.5	调制解调器的纠错功能	56
3.5.1	ECM 选用标准的内容	57
3.5.2	ECM 模式的误码纠错过程	60
3.5.3	ECM 的性能分析	61
3.6	调制技术的发展	63
3.6.1	网格编码的基本原理	64
3.6.2	网格编码举例	65

第四章 文件传真三类机的通信规程

4.1	传真呼叫——传真通信过程	69
4.1.1	传真呼叫的时间顺序	69
4.1.2	阶段说明	69
4.1.3	传真呼叫的操作方法	70
4.2	传真过程用的二进制信号方式	74
4.2.1	二进制信号的功能和格式	75
4.2.2	二进制信号构成的各种命令和响应信号	76
4.2.3	二进制信号的实现条件	81
4.3	信号序列举例	82

第五章 9600 bit/s MONOFAX 调制解调器

5.1	概述	86
5.1.1	引言	86
5.1.2	特性	87
5.1.3	技术要求	88
5.1.4	电源要求和环境要求	90
5.2	硬件接口信号	91
5.2.1	辅助信号	94
5.2.2	微处理器接口	95
5.2.3	V.24 接口	97
5.2.4	电缆均衡器	98
5.2.5	模拟接口信号	99
5.2.6	诊断信号	100
5.3	软件接口	101
5.3.1	接口存储器	101
5.3.2	DSP RAM 的存取	112
5.3.3	软件接口	115
5.4	诊断数据的换算	119
5.5	HDLC 帧结构	125
5.5.1	HDLC 帧	125

5.5.2	应用举例	133
5.6	单音检测器中的滤波器调谐	133
5.6.1	可编程单音检测器	133
5.6.2	G2 调制解调器中的单音检测器(仅适用于 R96MFX 和 R96EFX)	139
5.7	带自动拨号器的 DTMF 拨号	140
5.7.1	DTMF 信号的技术要求	140
5.7.2	设置振荡器的参数	141
5.7.3	检测应答音	143
5.7.4	完整的呼叫过程	143
5.7.5	单音信号的产生	144
5.8	建议的接收文件传真二类机信号的时间顺序	144
5.8.1	方法	145
5.8.2	参数的换算	147
5.8.3	黑/白门限	147
5.9	实现建议 T. 30 的方法	148
5.9.1	概论	148
5.9.2	T. 30 误码纠错模式	156
5.9.3	信号识别算法	156
5.10	调制解调器接口电路	159
5.10.1	电路和元器件	159
5.10.2	印制电路板的布线	160
5.11	性能	164
5.11.1	典型误比特率	164
5.11.2	典型相位抖动	165
5.12.3	DTMF 接收器的性能特性	165
5.12	调制解调器的功能特性	166
5.12.1	概述	166
5.12.2	功能描述	167

第六章 9600 bit/s 传真调制解调器

6.1	概述	182
6.1.1	引言	182
6.1.2	特性	182
6.1.3	技术要求	183
6.1.4	操作方式	186
6.1.5	性能	187
6.1.6	电源要求、环境要求和物理规格	188
6.2	接口特性	190
6.2.1	硬件电路	190
6.2.2	软件电路	196

6.3 诊断数据换算	206
------------------	-----

第七章 9600 bit/s R96PCJ PC 通信调制解调器

7.1 概述	212
7.1.1 引言	212
7.1.2 特性	212
7.1.3 技术要求	213
7.1.4 操作方式	216
7.1.5 性能	217
7.1.6 电源要求、环境要求和物理规格	218
7.2 接口特性	219
7.2.1 硬件电路	219
7.2.2 软件电路	223

第八章 R144DP V.33 14.4kbit/s 全双工调制解调器

8.1 概述	229
8.1.1 引言	229
8.1.2 特性	229
8.1.3 技术要求	230
8.1.4 自动拨号和自动应答控制	232
8.1.5 性能	232
8.1.6 电源要求、环境要求和物理规格	233
8.2 硬件接口信号	234
8.2.1 上电复位	237
8.2.2 微处理器接口	237
8.2.3 V.24 接口	239
8.2.4 辅助信号	240
8.2.5 线路接口	241
8.2.6 诊断信号	241
8.3 软件接口	242
8.3.1 接口存储器	242
8.3.2 DSP RAM 的存取	259
8.3.3 软件接口考虑	262
8.4 机电设计考虑	264

第九章 R1496DP 高速调制解调器

9.1 概述	265
9.1.1 引言	265
9.1.2 特性	265
9.1.3 技术要求	266

9.1.4	自动拨号和自动应答控制	268
9.1.5	性能	269
9.1.6	机电设计考虑	269
9.1.7	一般规格	270
9.2	硬件接口信号	271
9.2.1	上电复位	274
9.2.2	微处理器接口	274
9.2.3	V.24 接口	275
9.2.4	辅助信号	277
9.2.5	线路接口	277
9.2.6	诊断信号	278
9.3	软件接口	279
9.3.1	接口存储器	279
9.3.2	DSP RAM 的存取	282
9.3.3	软件接口的考虑	285
9.4	R1496DP 程序员指南	306
9.4.1	引言	306
9.4.2	DSP RAM 地址信息	306
9.4.3	交换控制信号超时定时器	321
9.4.4	V.22bis/V.32 互操作	322
	英文缩略语英汉对照表	324
	参考文献	326

第一章

引 论

1.1 传真通信的发展史

传真通信是利用扫描和光电变换技术,将文字、图表、照片等静止图像由发端经有线或无线信道送往收端,并在收端重现静止图像的通信方式。这种通信方式可以准确原样地传送文字、图表、照片等各种书面消息,且最终以硬拷贝(复制稿)的形式重现。

从其发明开始,至今传真已有了 150 多年的历史,但被推广、普及则是近十几年的事。1843 年,英国物理学家亚历山大·贝恩根据钟摆原理发明了传真。1850 年英国的弗·贝克韦尔开始采用“滚筒和丝杆”装置代替亚历山大·贝恩的钟摆方式,使传真技术前进了一大步。这种方式被延用了很多年,如相片传真机现在仍采用滚筒和丝杆的扫描方式。1865 年,伊朗人阿巴卡捷里根据贝恩和贝克韦尔提出的原理,制造成功了世界上第一台实用传真机,并在法国的巴黎、里昂和马赛等城市之间进行了将近 5 年的传真通信实验。

传真发明比电话还要早 30 多年,但它的发展非常缓慢,远远不及电话的发展速度。其中,传真通信的传输技术或者说是调制解调技术的落后是很长时间传真得不到发展和普及的原因之一。直至本世纪 20 年代,由于电子管、光电管等器件的产生,传真才开始发展起来。然而,当时它还只被用在某些特别场合,如传送新闻照片、气象图、传递或获取电报。实际使用的传真机数量很少。概括起来,传真通信从产生到发展共经历了以下三个发展阶段:

① 基础阶段(1843~1972 年)

这一阶段的传真机基本上采用机械式扫描方式,并大部分使用滚筒式扫描。传真机的电路部分是采用模拟技术,分立元件。在传输方面则是采用调幅、调频等低效率的调制技术,且基本上利用专用的有线电路进行低速传输。这时传真的应用范围也很窄,主要用于新闻、气象广播等。

② 发展普及阶段(1972~1980 年)

自 1969 年,特别是 1972 年以后,由于世界各国相继允许在公用电话交换网上开放传真业务,原 CCITT 关于传真标准化工作的进展,以及传真技术本身的发展,使传真进入了一个新的历史发展时期。这一时期的传真技术从模拟发展到了数字,机械式扫描被固体化电子扫描取代,低速传输向高速传输发展。文件传真三类机的出现和推广应用改变了人们对传真机的传统看法,加快了传真通信的发展。此外,传真的应用范围也得到了扩大,除用于传送文件、新闻照片、气象图以外,在医疗、印刷、图书管理、情报咨询、金融数据、电子邮件等方面也开始得到应用。

③ 多功能化阶段(1980 年以后)

这一阶段的传真机不仅作为通信设备获得了广泛应用,还在办公室自动化系统和电子邮件等方面担任了重要角色。现在,传真技术和微型计算机技术相结合,可以增加传真在信息的

完成光电变换,而且能够大大缩小传真机的体积。特别是 CIS,它可以省掉采用 CCD 时所必需的较长光路系统,因而可使传真机的体积进一步缩小。CCD 或 CIS 是实现文件传真三类机的一个关键部件。

1.2.2 图像信号处理电路

由于光电变换器件(CCD 或 CIS)的固有噪声、入射光的不均匀、原稿底色的不同、字迹深浅不一致等原因,会造成图像信号的失真。为此,需对从图像信号变换过来的传真信号进行处理。另外,为了拾取小信号,提高传真机的分辨力,以及为适应数字化的需要和实现编、译码的需要,还必须对传真信号进行数字化处理。因此,图像信号处理电路,是保证传真质量、增强传真机功能和提高信号有效性的重要部分。

1.2.3 编、译码器

编码器的作用是利用图像的统计特性,实现编码数据压缩,把传真信号变换成相应的码字,以削减传真信号的冗余度,从而大大提高通信效率。ITU-T T.4 建议的编码方案有 MH 码(改进的霍夫曼码)和 MR 码(改进的像素相对地址指定码)。前者为一维编码,后者为二维编码。大部分文件传真三类机都具备这两种编码方案的编、译码器,少数机器则只具备 MH 码的编、译码器。不同厂家的文件传真三类机有的还具备一些非标准编、译码器。这些非标准编、译码方案在某些情况下可以获得更高的压缩效果。

译码器的作用是将接收端收到的码字还原成传真基带信号。所以译码过程是编码过程的逆过程。

1.2.4 缓冲存储器

因为每一个编码行输出的数据量不固定,随图像内容的变化而变化。所以,编码器单位时间内输出的数据量不等,也就是说,编码器输出的是不均匀数据。为使不均匀的编码数据能以固定的传输速率在信道上进行传输,并使传输效率达到最高,必须在文件传真三类机中设置缓冲存储器,以实现速率匹配和自动调节供给调制器的数据量。

接收时的译码过程和发送时的编码过程相反,因而同样需要设置缓冲存储器,其作用是将输入的均匀数据变为不均匀的数据,送给译码器进行译码。

1.2.5 信道编、译码器

文件传真三类机采用了编码数据压缩技术,削减了信源的冗余度,因而提高了通信效率。但是,因为编码去除了信号间的相关性,这就增加了误码对通信质量的影响而降低了通信的可靠性。而实际的通信信道都存在着干扰,所以误码常常是不可避免的。因此,为了提高通信的可靠性,许多文件传真三类机采用了信道编码。

所谓信道编码,又叫做差错控制编码。它通过增加一定的冗余度使发送的编码数据带有一定的规律性,而在收端根据这一预定的规律进行检测,以发现并纠正差错,从而达到保证通信质量的目的。文件传真三类机中采用的信道编码方法是检错重发(ARQ)的方法。早期的一些文件传真三类机就采用过 ARQ 的方法,但由于最初对此没有统一的标准,而给不同型号的文件三类传真机之间的互通带来了困难。为了统一标准,且使制订的标准能与现有不具差错控制的文件三类传真机兼容,原 CCITT 第八研究组于 1986 年底提出了两种差错控制方案,作为选

用标准已于 1988 年正式通过并发表在蓝皮书中。这两种差错控制方案是误码纠错模式 (ECM) 和误码限制模式 (ELM)。后一种方案是从信源编码入手, 力求降低误码灵敏度, 把误码引起的损伤限制在一个或若干个非全白段中, 大大缩小误码波及范围的方法。前一种方案, 即 ECM, 从信道编码入手。这种方案不涉及信源编码, 它不是力求限制差错的影响范围, 而是根据信道编码来检测误码, 发现误码, 通过反馈请求重发来纠正误码, 从而达到从根本上保证报文质量的目的。自蓝皮书 (1988) 公布以来, 已陆续生产出许多具有 ECM 方式的文件传真三类机。

ECM 方式采用了选择重发的 ARQ 方式, 每连续传完含 n ($n \leq 256$) 帧的一个数据块以后进行差错处理, 请求发方重发其中有误码的帧, 直至所有帧全部正确为止。这里所述及的帧, 其结构采用高级数据链路控制规程 (HDLC), 使用 CRC 校验码, 具有很强的检错能力, 除标志码外, 帧内所有的奇数个误码、长度不超过 16bit 的任何突发误码以及大部分的其它误码都可以被检测出来。所以, 这种信道编码方式可以有效地保证报文质量。但这是以牺牲通信效率 (延长通信时间) 来换取的。由于文字的特点及其相关性, 可以允许一定的差错, 当报文质量满意时就可以不采用 ECM 规程进行通信。但如果报文质量不好, 为确保质量则宁可牺牲一点效率而使用 ECM 规程。因此, ECM 方式并非为所有文件传真三类机都必须具备的功能, 即便具备该项功能的文件传真三类机, 通信时也不一定每次都按 ECM 规程进行。所以, ECM 方式仅作为选用标准。

信道译码是信道编码的反过程, 因而译码器的作用是去除冗余度, 将经信道编码后的编码数据还原成为原编码数据。

1.2.6 调制解调器

文件传真一、二、三类机都是通过模拟电话电路进行通信的。而文件传真三类机是数字传真机, 经编码数据压缩后的传真信号是数字信号, 所以从缓冲存储器或信道编码器输出的信号无法直接送往模拟信道进行传输。为解决数字信号在模拟信道上传输的问题, 采用了调制解调的方法。这里调制器的作用是完成数/模 (D/A) 转换, 即把数字信号变换成模拟信号, 并使之适合在模拟信道上进行传输。解调器的作用则是把接收到的模拟信号恢复成数字信号, 即完成模/数 (A/D) 转换任务。所以, 调制解调器是文件传真三类机的重要组成部分, 它不仅要解决数字信号在模拟信道上传输的问题, 还要适应文件传真三类机高传输速率的要求, 同时还需适应数据传输自动操作的特点, 为此应遵循 ITU-T 建议 T. 30 (文件传真在公用电话交换网上的传输规程) 的有关规定。

文件传真三类机使用的调制解调器是符合 ITU-T 建议的几种标准调制解调器, 即符合 V. 29 (9600/7200 bit/s)、V. 27ter (4800/2400 bit/s)、V. 21 (300 bit/s) 的三种调制解调器。在专用线路或传输质量高的通信线路上可用符合建议 V. 29 的调制解调器进行通信。而在普通线路上一一般采用符合建议 V. 27ter 的调制解调器进行通信。V. 29、V. 27ter 调制解调器是发送报文数据时使用的调制解调器, 而 V. 21 调制解调器只用在报文前和报文后过程中传输传真控制信号。通常, 在正式传送报文之前, 总是选择调制解调器的最高传输速率开始工作, 如果训练失败就自动降速, 如降到第二档训练仍然失败, 则再降一档, 若降到 2400 bit/s 时训练仍然失败, 说明信道质量太差, 此时可改用文件传真二类机的方式进行工作, 采用文件传真二类机的调制解调器进行通信。目前, 绝大部分文件传真三类机都具有文件传真二类机的工作方式, 这就是说, 文件传真三类机的调制解调器一般还含有符合文件传真二类机标准的调制解调器。

如果选择的传输速率训练成功,调制解调器就按该速率进行通信。所以,调制解调器是根据通信线路的质量,在传真机的主机控制电路和通信控制电路的控制下选择一种合适的传输速率进行工作的。

1.2.7 网络控制器

网络控制器是连接通信线路、电话机和调制解调器的接口。平时它将通信线路倒向电话机一侧,当需要进行传真通信时,网络控制器便把通信线路由电话机一侧倒向传真机一侧。传真通信结束后,它又把通信线路接到电话机上。另外,网络控制器还要担负线路状态的维持和信号传输方向的控制等功能。

1.2.8 控制系统

控制系统一般由 CPU、ROM、RAM、接口、时钟电路、控制电路等构成。它是整机的指挥系统,机器的中心,在指令的命令下对整机的各部分进行实时控制,并使文件传真三类机的通信全过程按照 ITU-T 建议 T.30 规定的传输规程进行。

总之,控制系统将完成对整机进行控制、指挥和管理的任务。

第二章

传真信号传输的有关基础理论

早期的传真通信都采用模拟传输方式,但随着大规模集成电路技术和数字通信技术的发展,自本世纪 80 年代以来,以文件传真三类机为代表,传真通信飞速向着数字化、高速化及多功能方向发展。传真通信的传输技术也迅速向着数字传输技术发展。所以,本章将重点介绍数字信号传输的有关基础理论。

2.1 传真信号分析

2.1.1 传真信号的频谱

传真信号是一种随机现象,其性质与图像(传真原稿)的种类及其结构有关。因此,设想简单地把任何传真信源加以模型化是不可能的,但可以通过对一些典型传真信号的频谱分析得出一般意义的结论。所以,这里将以周期性黑白二值传真信号为对象,就其性质分析如下。

图 2.1 给出了周期性的黑白二值传真信号的波形图,图中幅度为 A 的脉冲对应传真原稿上的黑线条,幅度为零的信号对应传真原稿上的白线条。

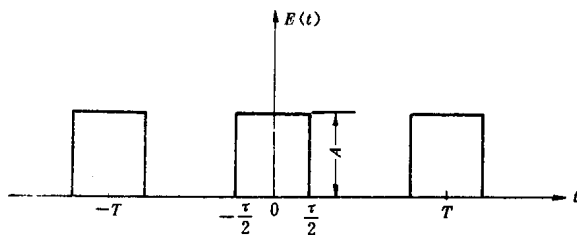


图 2.1 周期性黑白相间的传真信号

对于图 2.1 所示信号的频谱可利用傅氏级数得出:

$$E(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.1)$$

式中
$$a_0 = \frac{\omega}{\pi} \int_{-\pi/\omega}^{\pi/\omega} E(t) dt \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{\omega}{\pi} \int_{-\pi/\omega}^{\pi/\omega} E(t) \cos n\omega t dt \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{\omega}{\pi} \int_{-\pi/\omega}^{\pi/\omega} E(t) \sin n\omega t dt \quad (2.4)$$

在图 2.1 中,函数对 $t=0$ 处偶对称,所有“ b ”项为零。设脉冲重复周期为 T ,则 $\omega=2\pi/T$ 。因此,对于宽度为 τ ,幅度为 A 的矩形脉冲,其各项系数为:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E(t) dt = \frac{2}{T} [At]_{-T/2}^{T/2} = \frac{2A\tau}{T} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E(t) \cos \frac{2\pi n t}{T} dt \\ &= \frac{2}{T} \left[\frac{A \sin(2\pi n t / T)}{(2\pi n / T)} \right]_{-T/2}^{T/2} \\ &= \frac{2A\tau \sin(\pi n \tau / T)}{T \pi n \tau / T} \end{aligned} \quad (2.6)$$

于是:

$$\begin{aligned} E(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t \\ &= \frac{A\tau}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A\tau \sin(\pi n \tau / T)}{T \pi n \tau / T} \cos n\omega t \end{aligned} \quad (2.7)$$

可见,该式的余弦项系数具有 $\frac{\sin x}{x}$ 的包络形状,式中 $x = \pi n \tau / T$ 。

如果图像信号为黑白相间的细线条,且黑、白线条宽度相等,经扫描、光电变换、放大整形后的传真信号为 1:1 的周期性信号,脉冲宽度 $\tau = T/2$ 。对于这一特殊情况,所有偶次项均落在 $\frac{\sin x}{x}$ 函数的零点上,此时:

$$E(t) = A \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega t \dots \right) \quad (2.8)$$

只含直流项和基波及奇次谐波,且谐波幅度随着频率的增加而减小。

如果脉冲的持续时间小于或大于 $T/2$,则偶次和奇次谐波都将存在。

如果脉冲宽度 τ 固定,而脉冲间隔 T 增加,如图 2.2 所示一例, $\frac{\sin x}{x}$ 包络内将含有许多频谱分量。

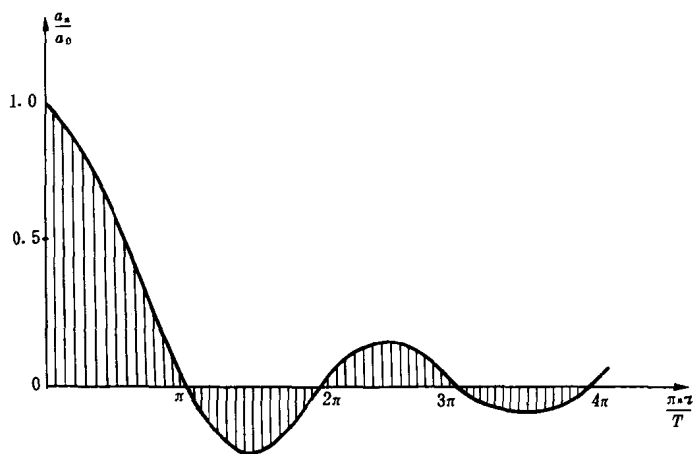


图 2.2 $T/\tau=10$ 的矩形脉冲串的频谱

当 T 增加到无穷大时,就获得单个矩形脉冲的连续频谱。

$\frac{\sin x}{x}$ 函数的第一个零点发生在 $x = \pi$ 处,或在式(2.7)中的 $n = T/\tau$ 处,相当于频率为 n/T 或 $1/\tau$ 处。因此,脉冲越窄,第一个零点的频率就越高。对于单位脉冲函数(冲激函数),包络变为一条平坦的直线,其中含有无穷多的频率成分,且各频率成分的幅度恒等于 1,即 $\Delta(\omega) \equiv 1$ 。