

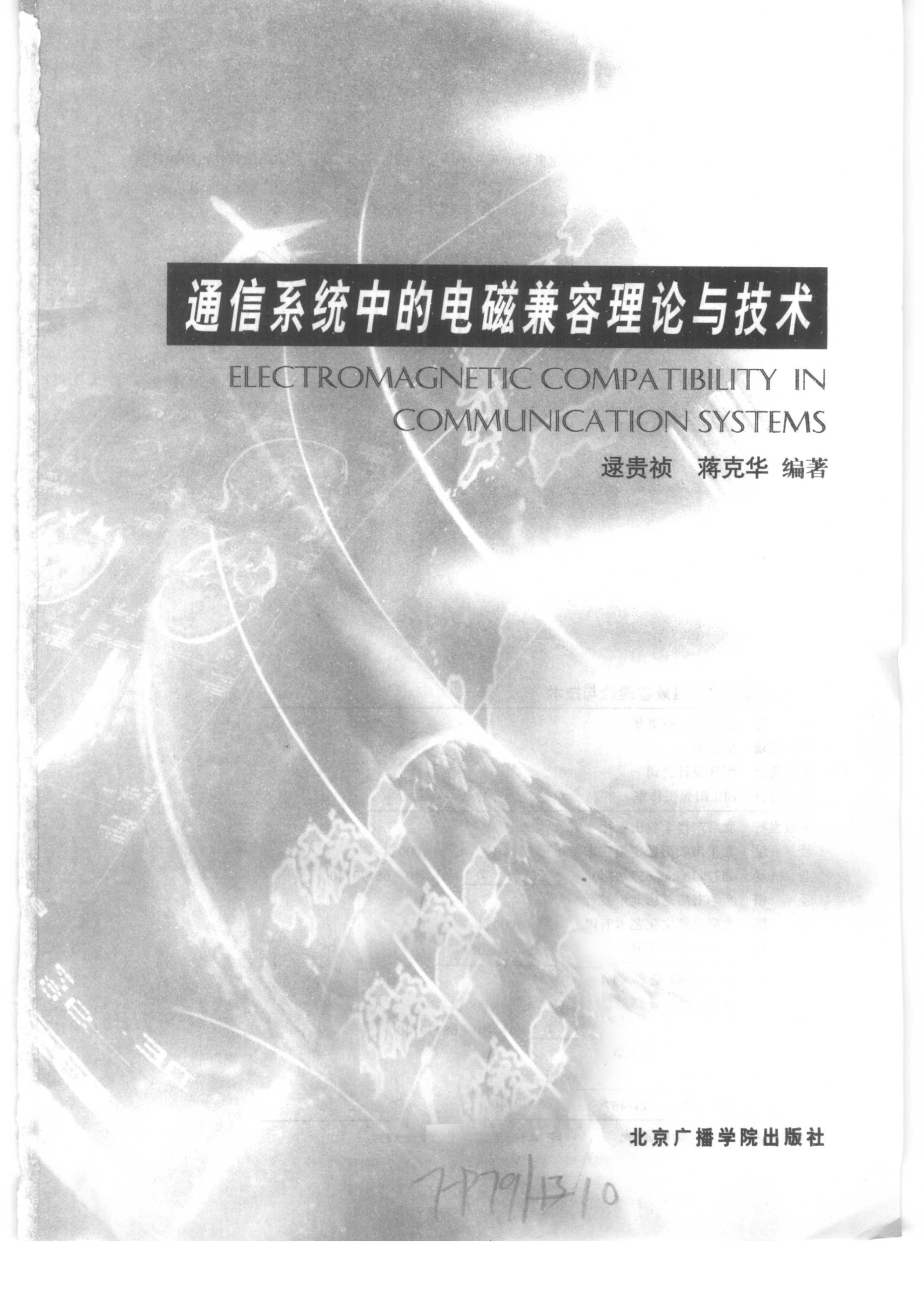
通 信 与 信 息 系 统 书 系

通信系统中的电磁兼容理论与技术

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN COMMUNICATION SYSTEMS

逯贵祯 蒋克华 编著

北京广播学院出版社



通信系统中的电磁兼容理论与技术

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN
COMMUNICATION SYSTEMS

逯贵桢 蒋克华 编著

北京广播学院出版社

7P79/H3/10

图书在版编目 (CIP) 数据

通信系统中的电磁兼容理论与技术/逯贵祯, 蒋克华编著. - 北京: 北京广播学院出版社, 2000.1

ISBN 7-81004-841-4

I. 通… II. ①逯… ②蒋… III. 通信系统-电磁兼容性 IV. TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 03977 号

通信系统中的电磁兼容理论与技术

编 著 逯贵祯 蒋克华

责任编辑 唐红梅

封面设计 恒真设计公司

版式设计 BBI 阳光工作室

出版发行 北京广播学院出版社

社 址 北京市朝阳区定福庄东街 1 号 邮 编 100024

电 话 65779405 或 65779140 传 真 010-65779140

经 销 新华书店总店北京发行所

排 版 北京纪德文化艺术有限公司

印 装 中国科学院印刷厂

开 本 787×1092 毫米 1/16

印 张 11.25

字 数 260 千字

版 次 2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月第 1 次印刷

印 数 1—3000

ISBN 7-81004-841-4/G·487

定 价 19.80 元

版权所有

翻印必究

印装错误

负责调换

前 言

电子技术和通信技术的迅速发展，出现了电子设备之间相互干扰和兼容的问题，由此产生了一门新的学科。电磁兼容是一门新兴的、正在发展的交叉边缘学科，它涉及电路理论，电磁场理论，电子测量与设计等多方面课程的内容。

本书的目的是介绍电磁兼容领域中的一些基本概念与理论。书中分为三个部分，分别介绍基本理论方法，电磁兼容设计，电磁兼容测量。

本书适用于电子类大学高年级学生及研究生选用。书中若有不妥之处，望读者批评指示。

作 者
1999.7.

目 录

第一章 电磁兼容基本原理	(1)
§ 1 引论	(1)
1.1 产生电磁干扰的原因	(1)
1.2 电磁干扰信号的传输方式	(2)
1.3 电磁干扰信号的影响	(3)
§ 2 传导干扰源及其性质	(4)
2.1 产生传导干扰的电路及其性质	(4)
2.2 干扰信号特性	(7)
§ 3 辐射干扰源及其性质.....	(11)
§ 4 电磁脉冲.....	(15)
4.1 EMP 产生原理	(15)
4.2 EMP 的影响	(19)
§ 5 传导干扰.....	(20)
5.1 低频传输线路.....	(20)
5.2 高频传输线路.....	(21)
5.3 共模干扰与差模干扰.....	(22)
5.4 串扰.....	(24)
5.5 CMOS 集成电路串扰分析	(25)
§ 6 外电磁场对传输线路的耦合干扰.....	(27)
6.1 耦合模型.....	(27)
6.2 平面波入射.....	(38)
§ 7 电磁兼容中的孔与缝隙问题.....	(51)
7.1 平面电磁波经小孔与腔体的耦合.....	(52)
7.2 腔体内的源经过耦合孔的辐射.....	(55)
7.3 传输线通过金属屏蔽上的小孔问题.....	(59)
第二章 电磁兼容的设计理论与技术	(72)
§ 1 接地与搭接技术.....	(72)
1.1 接地与搭接的定义.....	(72)
1.2 接地的基本方式.....	(73)
1.3 地线回路中的干扰及其措施.....	(75)
1.4 常见系统的接地考虑.....	(82)
1.5 搭接技术.....	(90)

§ 2 屏蔽技术	(93)
2.1 实体材料的屏蔽效果	(93)
2.2 多层实体屏蔽	(95)
2.3 薄膜屏蔽	(96)
2.4 缝隙屏蔽	(96)
2.5 非密封式屏蔽	(98)
2.6 电缆和接口屏蔽	(103)
§ 3 滤波器设计技术	(107)
3.1 滤波器的特性	(108)
3.2 滤波器设计	(109)
3.3 瞬态脉冲抑制	(115)
3.4 电源滤波器	(115)
§ 4 无线电频率的电磁兼容设计	(116)
4.1 无线通信的频率配置	(118)
4.2 频道间隔	(119)
4.3 频道的分组方式	(119)
第三章 电磁兼容测量	(122)
§ 1 开阔地测量	(122)
1.1 引论	(122)
1.2 开阔地测量	(122)
1.3 测量注意事项	(125)
1.4 开阔地的测量场地	(125)
1.5 土壤粗糙度	(126)
1.6 规一化的地点衰减	(127)
1.7 测量地点不完善的度量	(133)
1.8 天线因子测量	(135)
1.9 测量误差	(136)
1.10 结论	(136)
§ 2 电磁辐射干扰测量	(136)
2.1 引论	(136)
2.2 微波暗室	(137)
2.3 测量中的误差原因	(139)
2.4 横电磁室	(142)
2.5 混波室	(152)
2.6 GTEM 室	(155)
2.7 各种测量设备的比较	(159)
§ 3 传导干扰测量	(160)
3.1 引论	(160)

3.2 传导电流与电压的特性	(160)
3.3 电力线上的传导电磁噪声	(161)
3.4 来自设备的传导干扰	(163)
3.5 传导干扰敏感性	(170)
3.6 测量检波器	(170)
参考文献	(172)

第一章 电磁兼容基本原理

在当今高度发展的信息化社会中，电子与电力设备获得了越来越广泛的应用。由于每一电气设备都在一定的环境中运行，一方面它要受到环境的制约，一方面它要使自己的工作与周围的环境和谐。若电气设备不能与环境和谐工作，就将产生电磁干扰，从而影响环境，也影响设备的自身正常工作。研究电磁兼容的目的就是为了使各种各样的电气设备能够统一地、协调地在一起正常的工作。

现代电子系统与电磁环境相互依存。电子系统的现代化使得电磁环境变得愈加复杂；同时，电磁环境的复杂化对电子设备又提出了更高的要求。正是由于现代技术的发展，电磁兼容这门新的学科应运而生。本章将介绍电磁兼容的基本原理。

§ 1 引论

在多个电气或电子设备工作在同一环境下，如果每个设备产生的电磁噪声不影响其它电气或电子设备的正常工作，我们就称这些电气和电子设备是电磁兼容的。电磁兼容(EMC)是我们希望并需要得到的一种设备正常工作的电磁环境。

当一个电子设备受到一个不希望有的电压或电流的影响，从而影响到设备的正常工作，我们就说存在电磁干扰(EMI)。通常这些不希望有的电压或电流是通过传导或电磁辐射的方法到达敏感性电子设备的。电磁兼容设计就是通过设计改变或调整信号和噪声的信号电平，从而使各种设备能协调地正常工作。

1.1 产生电磁干扰的原因

电磁干扰产生的原因，即有从系统内部产生的，也有从系统外部产生的。一个系统包括有关的设施、设备、器材以及在环境中的工作人员。

在系统内和系统之间的电磁干扰中，一个共同的原因是：设计用于某一电路的信号到达了另一个不需要某一信号的电路之中。表 1.1.1 列出了在一系统内可能出现的电磁干扰及受影响的敏感设备。

表 1.1.1 系统内的电磁干扰

干 扰 源	敏感设备
汽车点火系统	显示器
电源	继电器
电动机	导航仪器
计算机	计算机
雷达发射机	雷达接收机
无线电发射机	无线电接收机

在表 1.1.2 列出了系统间产生电磁干扰的原因。

表 1.1.2

干 扰 源	敏感设备
无线电发射机	显示器
微波中转	微波中转
广播发射机	广播发射机
飞机、轮船、汽车	飞机、轮船、汽车
无线电接收的本振信号	无线电发射机的低电平电路
雷达发射机	雷达接收机
闪电	计算机
马达	导航仪器
荧光灯	工业控制装置

所有以上所述电磁干扰的原因可以归结为三个因素：产生了不需要的干扰源；产生了不需要的传输路径；产生了不需要的信号响应。

1.2 电磁干扰信号的传输方式

电子设备的电磁兼容特性可以按照电信号的传输方式进行基本的分类。一类是有线传输，一类是无线传输。有线传输借助于导体传递电信号。此处的导体包括低频电路中的集总元件，比如电容、变压器等，也包括常规的导线等等。无线传输通常表示信号是通过非导体传送的，传输的机制可以是近场感应，也可以是远区辐射场。

一个干扰源根据干扰信号的传输路径可分为有线传导的干扰源和无线辐射的干扰源。而敏感设备可分为受有线传导干扰的敏感设备和受无线干扰的敏感设备。图 1.1.1 画出了电磁干扰传输路径的示意图。

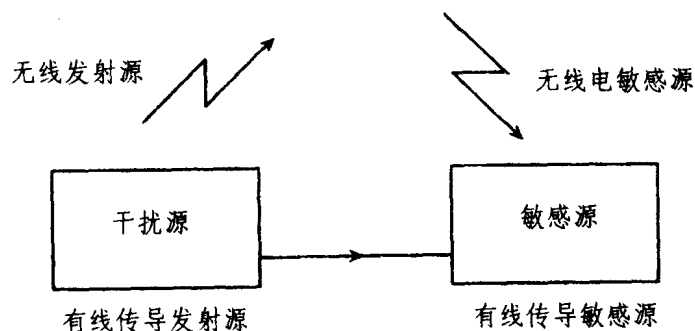


图 1.1.1 干扰信号的传输路径

传导干扰信号的测量通常由电压和电流来表示。电压的单位有伏特 (V)，dBV，dBmV；电流的单位采用安培 (A)，dBA，dBmA 等等。辐射干扰的度量由场强来表示，其单位为伏特/米 (V/m)，dBV/m，dBmV/m 等。

在传导干扰中，信号的耦合有电导性、电容性以及电感性三种。电导性耦合是由于元器件或导线之间的欧姆接触；电容性耦合是由于在元器件之间或导线之间存在着分布电容；而电感性耦合是因为导体之间存在着互感。所有这三种耦合可以用转移阻抗来描述。

转移阻抗定义为敏感体测得的电压与干扰源的干扰电流之比，即：

$$\text{转移阻抗} = \frac{\text{敏感体上的干扰信号电压}}{\text{干扰源上的干扰信号电流}}$$

转移阻抗通常是用于描述四端网络的特性，它是以上所述三种耦合中的一个或它们的某种组合。

信号的频谱是电信号传输过程中一个非常重要的方面。将所需要信号和干扰信号及噪声分隔开来的一个重要方法是利用它们之间在频谱上的差别。对一周期的电信号总可以分解为一个或多个谱分量。非周期信号也总可以表示为谱的分量形式（有时采用能谱的形式）。

由于频谱在系统间的电磁兼容方面具有非常大的重要性，所以有专门的组织或机构来制定频谱的使用标准。在我国是由国家无线电委员会来制定。无线电委员会根据国际标准、国内标准分配频谱资源。

从频谱分配的角度，全世界划分为三个区域，它们分别是：

第一区：欧洲、非洲、亚洲的前苏联地区、阿拉伯半岛；

第二区：南美洲和北美洲；

第三区：澳洲和亚洲的大部分地区。

1.3 电磁干扰信号的影响

当电磁干扰问题产生时，必须同时存在以下几个因素。它们是：

- a) 电磁信号的干扰源；
- b) 受干扰源影响的敏感体；
- c) 存在从源到敏感体的耦合路径。

在我们的周围环境中，可以看到各种各样的电磁干扰问题。这些问题包括电视信号的同频干扰，飞机导航的误差等等。

电磁干扰问题包括系统之间的干扰和系统内部的干扰。

系统之间的干扰可从表 1.1.2 中看出，它们可是表中各列干扰源和敏感体的各种组合。例如，它们可以是：

雷达干扰飞机导航系统；

电源线干扰通信系统；

车载无线电干扰电视接收机；

电源线的瞬变电压或电流干扰计算机系统；

等等。

系统内的干扰问题由表 1.1.1 可以看到，它们包括：

汽车内的点火系统干扰汽车内的收音机；

雷达发射机干扰此雷达的接收机；

通过接地环路电流所产生的级间耦合；

在计算机内开关电路对低压电子数字电路的影响；

数字电路与模拟电路用相同的电源供电时，数字电路对低电平模拟电路的影响。

§2 传导干扰源及其性质

对于设计者而言,他们并不希望所设计的电路或设备成为一个干扰源。但是,在实际工作过程中,在某一电路所希望得到的信号往往成为另外电路或设备的干扰信号或噪声。各种不同的设备具有不同的功率电平,它们的范围从毫瓦到兆瓦。对于一个与电源开关有关的电弧放电而言,它可能对一低电平的敏感电路产生一系列的干扰。

传导干扰沿着金属导体传播,它包括通过电感、电容和变压器的传播干扰。由于导线通过电流以后,可以产生天线效应,许多传导干扰源也会产生辐射干扰,这将在以后讨论。

2.1 产生传导干扰的电路及其性质

在通信电子设备中,产生传导干扰信号的电路有许多种形式。这些信号可以具有不同的功率电平,其波形有各种不同的形状,因而频谱的分布范围也不一致。下面我们分析常见的电路及可能产生干扰信号的性质。

a) 电源的开关电路

在通信设备中,通常都要接有电源。每当电源打开或关闭时,电压或电流都要发生突然的变化,这个突然的变化会对设备本身或其它设备产生干扰。对于直流电源,其信号的变化可以表示为:

$$s(t) = u(t) \quad (1.2.1)$$

对于正弦交流电源,其信号的变化可以表示为:

$$s(t) = u(t) \sin \omega t \quad (1.2.2)$$

以上公式中, $u(t)$ 表示阶跃函数,其定义为:

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1.2.3)$$

$s(t)$ 表示电源的电压或电流。上述信号源变化形式是电源打开的表示形式,同样地我们也可以表示电源关闭的信号。

在实际电路环境中,上述信号变化的形式是一种理想的情况。考虑到实际的情况,信号的变化要有一过渡的过程。所以,电源打开的电压或电流变化可以表示为:

$$s(t) = u(t) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1.2.4)$$

根据富里叶变换的公式,我们可以从信号的时域形式得到其频域的式,也即信号的频谱。其结果为:

$$s(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{1}{\omega} \delta(\omega) - \frac{1}{(\frac{1}{\tau} + j\omega)} \quad (1.2.5)$$

相应的信号时间表示以及频谱表示可以由图形 1.2.1、图 1.2.2 表示如下:

b) 整流电路

通信电路中的整流电路伴随着信号波形的变化,因而会引起一些不需要的信号分量。最通常的整流电路如图 1.2.3 所示:

整流电路的输入信号形式通常为正弦交流电、输出信号则为脉动信号形式。其信号的波形

如图 1.2.4 所示。

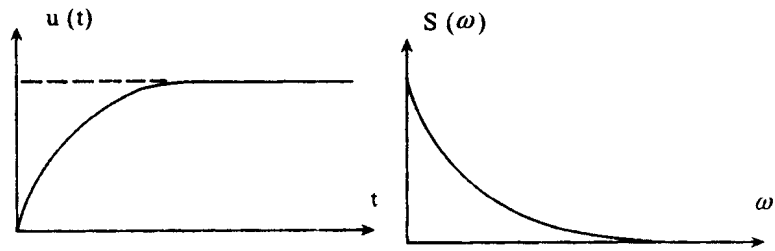


图 1.2.1 开关信号 $u(t)$ 的波形 图 1.2.2 开关信号的频谱分布

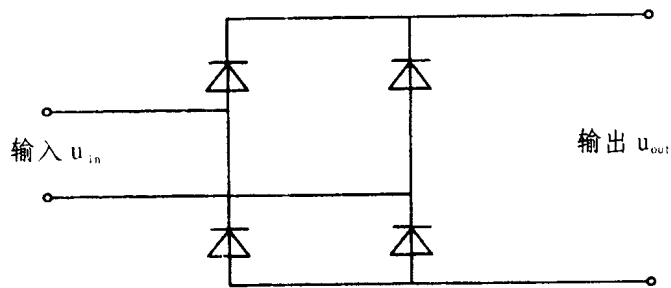


图 1.2.3 整流电路示意图

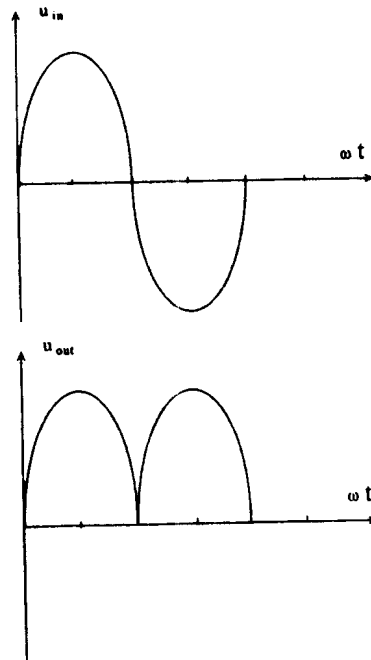


图 1.2.4 整流电路的输入输出信号波形

经过桥式整流电路以后, 整流电压 u_{out} 的富里叶级数表达式为:

$$u_{out} = \frac{4u_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1 \times 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \times 5} \cos 4\omega t + \dots \right) \quad (1.2.6)$$

从 (1.2.6) 式可以看到, 原来的单频交流电经过整流电路以后, 又产生了倍频、四倍频等不同分量的信号。对于这许多的信号分量, 若不加以控制, 必然会影响到其它电路。

c) 交流信号本振电路

在通信系统中, 由于调制和解调的需要, 往往需要有一本振电路。本振电路产生一固定频率的信号, 这一信号也会对其它电路产生干扰。图 1.2.5 是一石英晶体串联振荡器的电路原理图。

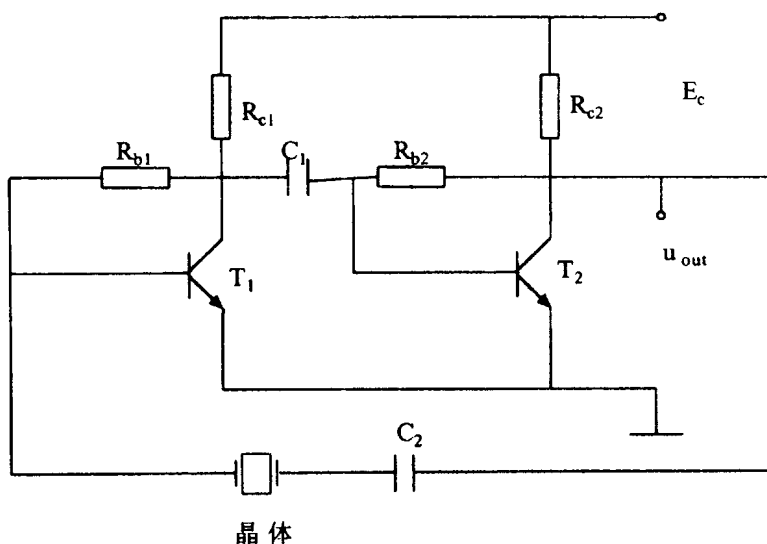


图 1.2.5 石英晶体串联振荡器

上述振荡器产生固定频率的振荡信号, 其信号为:

$$s(t) = A \sin \omega t \quad (1.2.7)$$

其中 ω 为本振频率。

d) 方波振荡电路

数字电路中, 经常需要不同周期和幅度的脉冲源。比如常见的时钟信号, 它由固定周期的矩形脉冲所组成。图 (1.2.6) 是一种脉冲振荡器的电路原理图。它由两个“与非”门和 RC 充放电电路组成。

在图 (1.2.6) 中, 其输出信号波形如图 (1.2.7) 所示。

对于方波振荡电路产生的同期信号, 利用富里叶变换的方法, 可以求出其信号的频率谱。

$$x(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right) \quad (1.2.8)$$

e) 通信系统中的调制电路

在通信系统中, 有各种各样的调制电路。通常调制以后的信号并不限于规定的频带内, 有一部分信号能量落在频带以外, 这些不需要的信号要对其它电路和设备产生干扰。

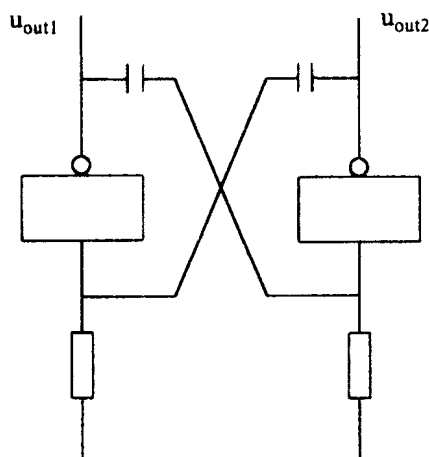


图 1.2.6 方波振荡电路

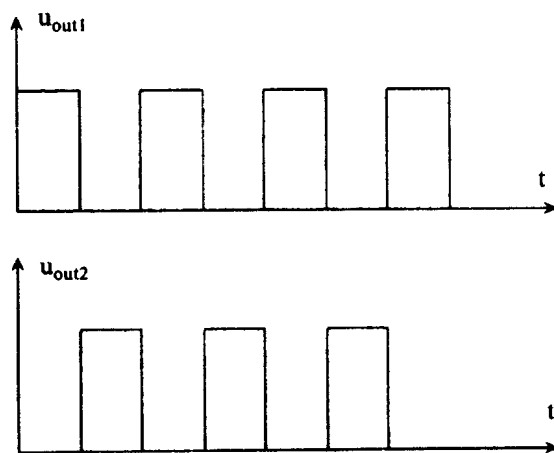


图 1.2.7 方波振荡器的信号输出

以最小移频键控 (MSK) 调制为例, 其调制电路如图 (1.2.8) 所示。相应的 MSK 调制信号的功率谱如图 1.2.9 所示。

2.2 干扰信号特性

传导干扰信号即可以按照其谱分量的带宽进行分类, 也可以按照幅度的大小进行分类, 或者按照干扰信号的波形进行分类, 以下我们对其进行逐一讨论。

1) 干扰信号的频谱

在电磁干扰的讨论中, 我们经常遇到“窄带”和“宽带”这两个术语。在此, “窄带”与“宽带”是相对于测量信号或噪声的仪器而言。如果相对于某一仪器, 信号或噪声是窄带的, 这就表明当调节仪器观察频带内的信号时, 信号的输出是一尖峰。在另一方面, 若信号是宽带信号, 仪器上观察的信号变化是缓慢的通过整个信号频带。

测量窄带信号的噪声与测量仪器的带宽无关。在一正确的测量位置上, 可以包含所有

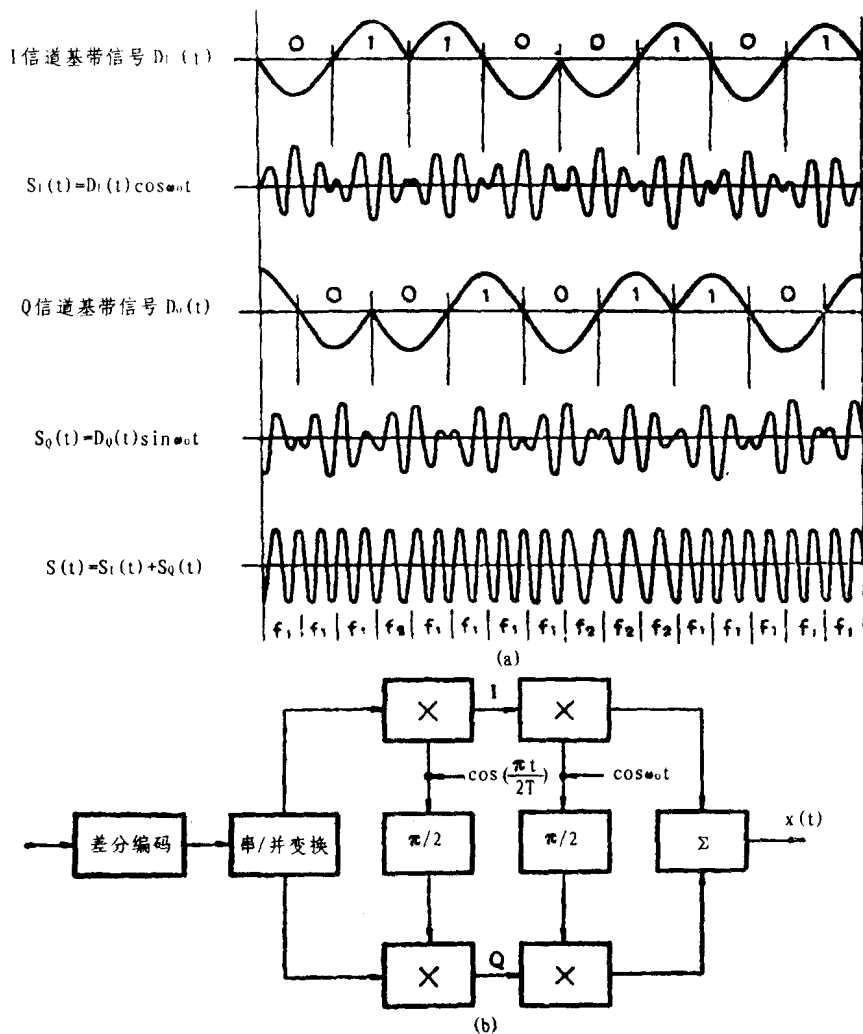


图 1.2.8 (a) MSK 信号的产生 (b) MSK 信号正交调制器

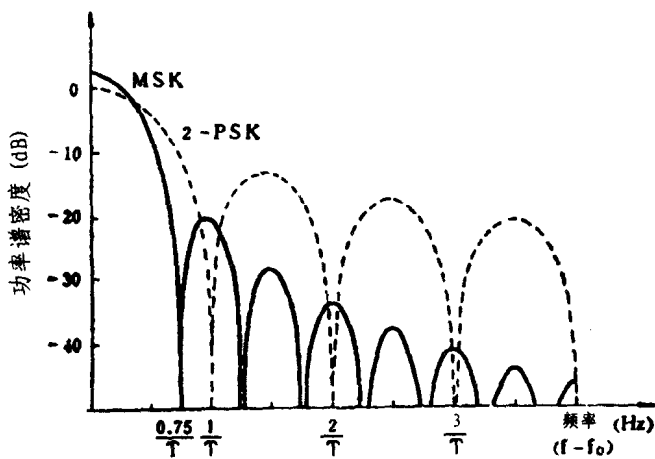


图 1.2.9 MSK 与 2PSK 信号的归一化功率谱

的噪声信号，这样将得到一个唯一的读数。对于宽带噪声信号测量，在单位带宽的基础上测量。所测结果采用“每赫兹”或“每兆赫兹”表示。这取决于所用仪器的带宽。有时候，需要将仪器的带宽转换为某种标准带宽值。如果用一个具有 100 kHz 带宽的仪器去测量 HF 或 VHF 范围的热噪声，用每兆赫兹表示的噪声电平要高于用 100 kHz 带宽仪器所指示的电平，原因是噪声功率正比于带宽，即

$$P = kTB \quad (1.2.9)$$

上式中：P 代表噪声功率，单位为瓦特；k 为玻尔兹曼常数，其值为 1.38×10^{-23} 焦耳/开尔文温标；T 为温度，单位 K；B 为带宽，单位 Hz。

表 1.2.1 给出了常见干扰信号的频谱范围。

表 1.2.1

干 扰 源	频谱范围
加热器电路（通断周期）	50kHz—25MHz
荧光灯	0.1—3MHz
计算机逻辑组件	50kHz—20MHz
指令程序装置的信号线	0.1—25MHz
指令程序装置的电源线	1—25MHz
通信复用设备	1—10MHz
转换开关	0.1—25MHz
电源开关电路	0.5—25MHz

2) 窄带干扰与宽带干扰

通常认为窄带干扰的带宽只占几百或几十赫兹。常见的窄带干扰有：

- 单频道的无线通信系统；
- 某些复用的模拟与数字系统；
- 通信发射机谐波输出；
- 主电源的输出及其谐波信号；
- 本振信号。

对于宽带干扰信号，其能量散布范围有几十或几百兆赫兹或更大。宽带干扰信号通常是由一些窄脉冲所形成的，窄脉冲具有很小的上升和下降时间。谱分布由每一窄脉冲的特性所决定。图 1.2.10 显示了雷达脉冲的波形及其频谱分布之间的关系。通常，脉冲周期越短，频谱间隔越大；脉冲上升下降波形越陡，频谱覆盖范围越宽。

3) 信号波形与谱分布之间关系

电干扰信号可以具有各种不同的波形。对于干扰信号所占带宽，其波形具有非常重要的影响。在某些情况下，设计者要设法控制波形。为了保证定时精度或提高信号码元的传输速率，往往将信号脉冲设计得很窄。然而快速的升降时间往往占有很大的带宽。图 1.2.11 表示脉冲形状与谱分布之间的关系。

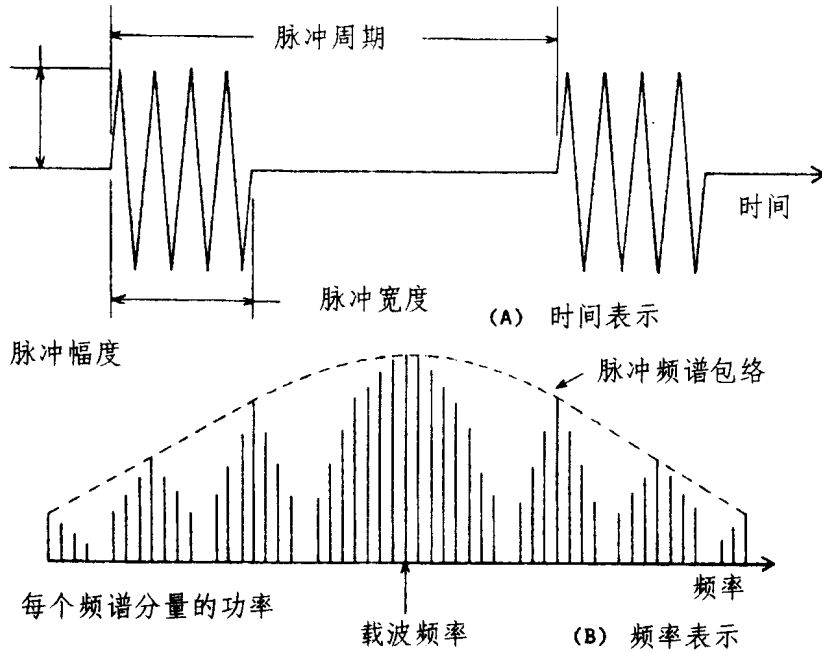


图 1.2.10 雷达脉冲及频谱

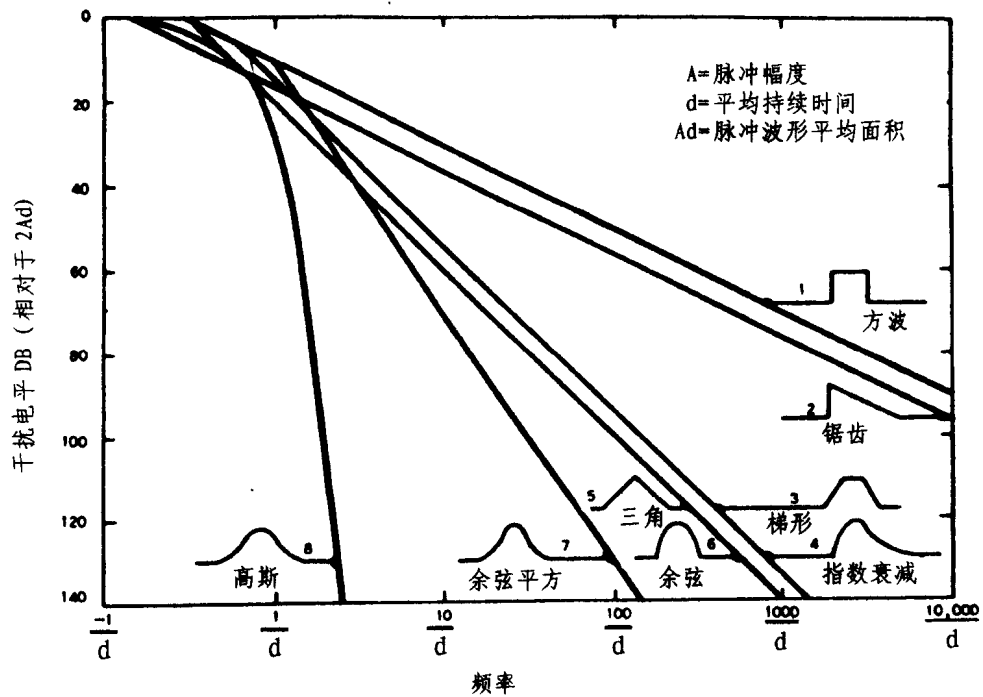


图 1.2.11 各种脉冲波形的干扰电平分布