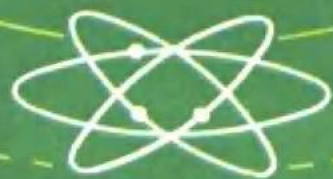


—高等学校教材—

红外系统

杨宜禾 岳敏 编



国防工业出版社

前 言

本教材系由电子物理与器件教材编审委员会激光与红外编审小组评选审定，并推荐出版。

本教材由西北电讯工程学院杨宜禾担任主编，华中工学院刘贤德担任主审。编审者均依据激光与红外编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时数为 60~80 学时。

本书对红外仪器的概念、组成、工作原理及一般设计方法作系统论述。现代的红外仪器涉及信号调制、信号检测、信号处理等很多基本方面的内容。最近一些年来，红外成像技术的发展使图象处理、现代控制理论以及微处理机应用等成为红外技术向新领域扩展应用的基础。本书着重叙述红外系统的基本知识和基本设计方法，至于部件设计及其工艺，可参阅有关专著。

大学本科学学生选用本教材时，可学习本书的基本内容，对书中附有 * 号的节可概略讲述，带 * 号的节可供研究生及科技工作人员参考。

全书共分六章。第一章绪论，第二章红外调制与调制盘，第三章红外信息检测，第四章探测跟踪搜索系统，第五章热成像系统，第六章系统设计。其中第一章、第三章、第四章中成像跟踪部分、第五章及第六章由杨宜禾编写，第二章及第四章(除成像跟踪部分)由岳敏编写。杨宜禾统编全稿。本书在编写过程中，得到方潮宝同志的有益指导和伍常奎、刘德俊、刘上乾、张显炽同志的热忱帮助，作者在此表示衷心感谢。在编写本书时，曾参阅了一些研究部门的若干技术资料，由于各种原因，在参考文献中未及全部列入。我们对这些资料的作者深表谢意。由于作者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

杨宜禾 岳敏

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二～一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

目 录

第一章 绪 论

- § 1-1 红外系统的概念及其应用 1
- § 1-2 红外系统的理论基础及其发展 2

第二章 红外调制与调制盘

- § 2-1* 红外调制的一般概念 4
- § 2-2 调制盘的类型及工作原理 22
- § 2-3 调制盘的分析计算 39
- § 2-4* 调制盘的空间滤波原理 54
- 习题 64
- 思考题 64

第三章 红外信息检测

- § 3-1 引言 66
- § 3-2 噪声分析 67
- § 3-3 信号分析 70
- § 3-4* 统计检测准则 73
- § 3-5* 匹配滤波器 77
- § 3-6 单次检测 83
- § 3-7 积累检测 85
- § 3-8 多元检测 92
- 习题 100
- 思考题 100

第四章 探测、跟踪、搜索系统

- § 4-1 探测系统 102

- § 4-2 跟踪系统 134
- § 4-3 搜索系统 171
- § 4-4 红外系统的作用距离 184
- 习题 188
- 思考题 189

第五章 热成像系统

- § 5-1 引言 191
- § 5-2 光机扫描摄像头 194
- § 5-3 热释电摄像管 204
- § 5-4 红外 CCD 摄像头 213
- § 5-5 信息处理与显示 225
- § 5-6* 热象仪的系统性能 234
- 习题 256
- 思考题 257

第六章 系 统 设 计

- § 6-1 总体指标的拟定 259
- § 6-2 系统结构的初步设计 263
- § 6-3 工作波段、探测器及制冷装置的初步设计 267
- § 6-4 光学系统的初步设计 273
- § 6-5* 信号检测与处理系统设计 280
- § 6-6 系统设计举例 297

第一章 绪 论

§ 1-1 红外系统的概念及其应用

自然界中一切景物的温度都高于绝对零度。根据普朗克定理，凡是绝对温度大于零度的物体都会产生热辐射，辐射通密度的大小是物体温度的函数，辐射通密度还与物体的发射本领有关。各种自然界景物的发射本领是千差万别的，同一景物的各个部份的发射本领也未必都一致。利用景物温度及发射本领的自然差异可以做成各种被动的红外仪器，用它来对景物进行探测、测量、跟踪、搜索及成像。利用景物自然辐射而工作的红外仪器结构较简便，且能直接反映出景物的若干特征参量，如景物的温度或景物各部份的温度分布状况、景物的空间方位及其运动状况，等等。由于红外波段的电磁辐射的波长较无线电波为短，所以红外仪器的空间分辨率较雷达为高。大气分子及大气浮悬物对辐射的散射随透过的光波的波长而异。光波的波长增长时，散射影响将逐渐减弱，因此红外辐射透过霾、雾的能力较可见光为强。被动状态下工作的红外仪器工作较隐蔽。由于上述种种特点，红外仪器在科学研究、工业、农业、医疗及军事各方面得到广泛应用。红外仪器的一般组成方块图如图 1-1 所示。

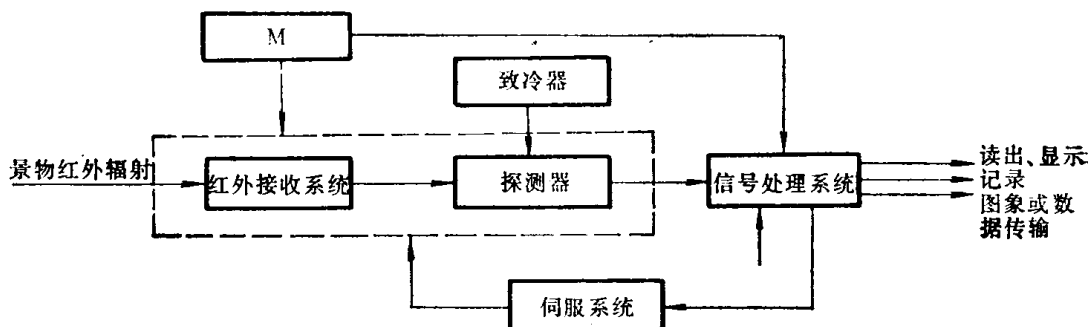


图1-1 红外仪器组成方块图

由景物发出的红外辐射经空间传输到红外装置上。红外装置的红外光学接收系统接收景物的红外辐射，并将其会聚在探测器上。探测器将入射的红外辐射转换成电信号。信号处理系统将探测器送来的电信号处理后便得出与景物温度、方位、相对运动角速度等参量有关的信号。红外装置取得景物方位信息的方式有两种：一种是调制工作方式，一种是扫描工作方式。方框图中的环节M为调制器或扫描器。若红外装置采用调制工作方式，则环节M为调制器，调制器用来对景物红外辐射进行调制，以便确定被测景物的空间方位。调制器还配合着取得基准信号，以便送到信号处理系统作为确定景物空间方位的基准。若红外装置采用扫描方式工作，则环节M为扫描器，用它来对景物空间进行扫描，以便扩大观察范围及对景物空间进行分割，进而确定景物的空间坐标或摄取景物图象。扫描器也向信号处理系统提供基准信号及扫描空间位置同步信号以作信号处理的

基准及协调显示。当红外装置需要对空间景物进行搜索、跟踪时,则需设置伺服机构。跟踪时,按信号处理系统输出的误差信号对景物进行跟踪;搜索时,需将搜索信号发生器产生的信号送入信号处理系统,经处理后用它来驱动伺服系统使其在空间进行搜索。对机械扫描系统而言。扫描器 M 和伺服机构这两个环节总是合并设置而为一个环节。采用调制工作方式的红外装置可以对点目标实行探测、跟踪、搜索;采用扫描方式工作的红外装置,除了能对景物实行探测、跟踪、搜索外,还能显示景物的图象。经信号处理后的信息,可以直接显示记录、读出,也可以由传输系统发送至接收站再加工处理。

目前应用的红外仪器按其工作性质可分为下列四类:

- 1) 探测、测量装置 如辐射计、测温仪、光谱仪、方位仪等,它们用于辐射通量的测定、光谱分析、景物温度及方位的测量等;
- 2) 跟踪装置 用于对运动目标进行跟踪、测量及导弹制导等;
- 3) 搜索装置 用于森林防火、入侵探测等;
- 4) 成象装置 热象仪用于观察景物图象及分析景物特性。

§ 1-2 红外系统的理论基础及其发展

红外辐射是整个光谱辐射的一部分,红外辐射具有光的基本属性。红外技术是光学的一个应用分支,光学中的几何光学和物理光学同样是红外系统设计中的理论基础。在红外系统设计中,运用光学设计的一般理论结合红外系统的特点,去作红外系统的光学结构设计。在红外系统的性能分析和计算中常用光学传递函数的方法去分析评价系统质量,也常用光学传递函数的方法进行系统设计。在红外系统的能量计算中也可运用波动光学的理论。光学频谱分析理论近来受到重视,相信有可能会在红外系统设计中占有相当地位。红外光与可见光除了波长的差异外,就是红外辐射为不可见光,因而不能做成肉眼直接观察的仪器。在红外仪器中,对接受到的红外图象总需要通过光电或热电方法转换成电信号,然后再转换成可见图象以便人眼直接观察判读,也可将电信号直接读出或记录。因此红外系统设计较可见光系统设计要繁复些。

从信息观点考虑,红外系统实质上是信息接收系统。在红外系统的研究中,首先要考虑信号检测问题。信号检测理论是信息论的一个新的分支。红外信号检测需要研究信号形式、检测准则和检测方法,以及估值问题。检测到的景物信号往往需根据需要作各种形式的处理。信号处理系统的任务是检出所需的景物信息。在现代信号处理技术中有模拟的和数字的两种信号处理方法,其目的都是抑制噪声、检出需用的景物信息。滤波技术、相关技术、图象处理技术以及各种背景抑制技术等等在红外系统设计中都得到了广泛应用。红外系统通常也是一个控制系统,过去在分析计算系统调节质量时总是运用经典的调节原理方法,但由于计算参量较多因而目前愈来愈多地采用现代控制理论方法进行分析计算。对信号处理系统的要求不断增多,计算量不断加大,因此在红外系统中采用微处理机是很自然的趋势。采用微处理机不仅会增大信息处理功能,且能提高控制系统的质量。在需要对目标进行识别的情况下,图象识别是红外系统所必需考虑的重要内容。从学科类别来看,图象识别是一个独立的研究分支,所以在一般情况下,红外系统设计时只需考虑与图象识别相连的接口或提供必要的输出数据即可;只有在某些特定的情况下(如图象匹配),在红外系统设计中才通盘考虑图象识别问题。

红外系统的结构形式与红外探测器的发展密切相关。由于对红外系统的应用要求不断增多,因而对探测器的性能(如工作波段、响应度、弛豫时间、工作频谱、响应面积、结构工艺等)也不断提出种种新的要求,从而促进了红外探测器的发展;另一方面,红外探测器的创新又为红外系统的发展开辟了新的途径。如红外CCD(电荷耦合器件)的出现,使红外系统可采用凝视式设计,因而系统结构可大为简化。又如SPRITE器件研制成功,也给串联扫描的红外系统设计在结构方面带来很大方便。

红外系统的发展还与系统中各部件的技术现况有关。如使用空气轴承的高速电机(转速每分钟5~6万转)的问世,使红外系统的扫描帧频有可能达50Hz以上。光学系统结构的创新、致冷器的微型化、伺服机构的新构思等都给红外系统的发展带来了很大影响,例如提供新的设计方向、提高系统性能或改进原设计思路从而延长其使用寿命,等等。

红外技术是一门新兴的应用技术。新理论的出现也会更加丰富红外系统设计内容。上面提到的现代控制理论就有可能给诸如红外多目标跟踪识别等提供新的研究方法;信息光学的进展也有可能给红外系统设计提出新的设计思想。红外技术的应用范围在不断扩大,近年来对远红外波段($25\mu\text{m}$ 至 $1000\mu\text{m}$)的研究逐渐受到人们的重视。这将给红外技术带来新的发展。激光技术与红外技术在很多方面是紧密相连的。红外系统设计人员应熟悉激光技术领域中的有关研究内容。外差探测是检测微弱信号的有效方法。由于 CO_2 激光器的出现,有可能使用由 CO_2 激光器产生的 $10.6\mu\text{m}$ 的红外辐射作为本振辐射。目标红外辐射和本振辐射同时作用在探测器上,探测器起混频器作用,由它检出的信号是目标辐射频率和本振辐射频率二者的差频信号。输出功率信噪比除与目标辐射功率成正比外还与本振辐射功率相关连。本振辐射功率可以做得较强,因此利用外差探测技术能检测到微弱的目标信号。外差探测的探测极限为信号光子噪声限。外差探测在红外天文学、通讯等方面有着广泛的应用前景。

红外系统涉及面较宽,且又在不断发展,因此在这本书中只能着重阐述红外系统中有关的一些基本理论、基本结构及其主要特性以及红外设计的基本原则和设计计算方法。在熟悉了这些基本内容之后,读者将有能力从事红外仪器的研究设计及使用方面的工作。关于具体工艺问题在本书讲的较少,读者可参阅有关的工艺书籍。

参 考 文 献

- [1] Richard D. Hudson, JR, *Infrared System Engineering*, John Wiley & sons, Inc, 1969.
- [2] 孔凡平、俞福堂,《红外物理与技术发展动向》,红外应用文选,1979年。

第二章 红外调制与调制盘

§ 2-1* 红外调制的一般概念

2-1.1 对红外辐射进行调制的意义

红外系统接收目标发射的红外辐射能，以对目标进行探测，搜索及跟踪。当目标温度一定时，由目标所发射出的辐射通量总是恒定的，位于一定距离处的系统所接收到的辐射通量也是恒定的。为了探测目标的方位，需要对目标辐射能进行调制，即把红外系统所接收到的恒定的辐射能转换成随时间变化的断续的辐射能，并使断续的辐射能的某些特征（幅度、频率、相位等）随着目标在空间的不同方位而变化。这样，调制后的目标辐射能是随时间而变化的，它包含了目标的方位信息。调制后的辐射能经探测器进行光电转换后便得到交流电信号。这一交流电信号经过放大、解调后，便可检测出目标的空间方位。由上可见，对辐射能进行调制的目的主要是为了使辐射能中包含目标的方位信息，同时恒定的目标辐射能经调制后变成按一定频率变化的断续辐射能，也便于进行信号的放大处理。

辐射源按其对红外装置的张角的大小可以划分为两类：点辐射源和面辐射源（扩展源）。辐射源总是具有一定大小的，不可能是一个点，只是当辐射源距辐射接收系统的距离远大于辐射源本身的最大线度，即辐射源对接收系统的张角很小时，可把它看成为点辐射源，这时可认为辐射源的能量全部是从一个点发射出来的。点源目标的象点，是位于光学系统焦平面上的弥散圆，通过光学系统象差设计，可以得到不同大小的弥散圆。当辐射源相对于系统张角较大时，通常称为面辐射源（或扩展源）。面源目标在系统焦平面上的象点大小是由目标本身尺寸及光学系统象差决定的。在采用调制盘的系统中，一般当象点大小覆盖了多个分格时，就认为该象点对应的辐射源为面源；而当象点大小只与一个分格相当或小于一个分格时，认为该目标为点源目标。下面讲述的调制盘只限于用在对点源目标的调制。

调制盘是辐射调制器的一种，它们是在能透过红外辐射的基板上，覆盖上一层涂层，然后用光刻的方法把涂层做成透辐射和不透辐射的栅格，由这些栅格组成调制盘的花纹图案。调制盘置于光学系统的焦平面上，当目标象点与调制盘之间有相对运动时，透辐射与不透辐

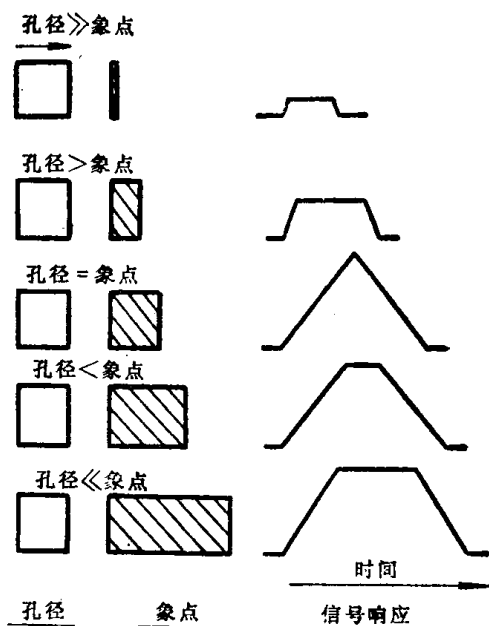


图2-1 孔径和象点尺寸对信号波形的影响

射栅格切割象点。由于透辐射与不透辐射栅格对象点能量的切割作用，使得通过调制盘的辐射能量变成了断续形式。这样，调制盘就对目标象点的红外辐射能量进行了调制。

调制以后的辐射功率是时间的周期性函数，例如方波、梯形波、正弦波等。调制后的波形，由象点尺寸与调制盘孔径（即指一个透辐射栅格或一个不透辐射栅格）之间的比例关系而定。设孔径为一个正方形，象点为一个长度与孔径相同但宽度是变化的长方形，当相同的孔径扫过不同尺寸的象点时，所得的信号波形如图 2-1 所示^[1]。

2-1.2 调制盘的作用^[1,2]

把恒定的辐射通量变成断续的辐射通量，是调制盘最基本的作用。对一般红外系统来说，调制盘的主要作用如下。

一、用调制盘确定目标在空间的方位

物体经过光学系统成像，物和象有着——对应的关系。就是说物空间的一点对应着象空间确定的一点。因此，目标在物空间位置的变化与目标象点在象空间即在调制盘上位置的变化相对应。当目标位于光轴上时，象点也在调制盘上给定的中心位置上；当目标偏离光轴时，象点在调制盘上也相应偏离原给定的中心位置。象点位置的变化，与目标偏离光轴的角偏离量有关。象点位置的这种变化，使载波信号的某些参量，如幅度、频率和相位也随之变化。此时，由调制盘输出的调制辐射能就包含了目标的方位信息，然后由红外探测器把调制辐射能转变成电信号，用信号处理电路检出这种变化量就得到目标在空间的方位。

二、用调制盘进行空间滤波，以抑制背景干扰

任何温度高于绝对零度的物体都可以辐射出红外辐射能。如果我们要探测的目标是空中的飞机、海上的舰船、地面上的车辆，那么它们周围的云团、大气、海水和地物等等的自身热辐射以及它们所反射、散射的太阳辐射，就成为背景辐射。因为光学系统的视场是一定的，目标辐射和背景辐射将同时进入视场，为了能获得目标信息就要求红外探测系统能把目标从背景中分辨出来。我们知道，通常目标相对背景来说尺寸较小，位于远处的目标对红外系统张角很小，可看成为一个点源，它在象平面上所成的象点尺寸也很小；而背景一般对红外系统的张角很大，它在象平面上所成的象点尺寸也很大。利用张角大小的差异，调制盘可以抑制背景，突出目标，这种滤去背景干扰的作用叫空间滤波。调制盘进行空间滤波的基本原理是：点源目标的象点与调制盘一个透辐射或不透辐射栅格尺寸相当，调制盘对该目标可以进行调制，因而产生一个由调制盘转速和调制盘分格数目确定的有限载频的信号。而大面积背景象充满整个或大部份调制盘，覆盖了若干个透辐射和不透辐射栅格，透过调制盘的能量为某一个定值，得到的调制信号为直流或远离载频的其他频率的调制信号，即在载频附近背景感应的信号最小。通过电路的选频放大，使目标信号频率通过，而背景（直流或其他频率）被阻止，实现探测目标抑制背景的作用。

调制盘在探测点源目标和抑制大面积背景干扰方面是相当有效的，但是当背景张角较小，背景象的大小与调制盘栅格尺寸相当时，就不起抑制背景的作用了。因此一般调制盘的空间滤波作用又是有限的。为此还需要采用其他措施，如采用双色调制盘或色谱滤波（即利用目标和背景辐射波段的差异来抑制背景干扰）等，进一步有效地抑制背景干扰。

三、用调制盘提高红外系统的检测性能^[8]

红外系统对目标的探测总是在噪声干扰下进行的,为能从噪声干扰中更多地提取有用的信息,红外系统必须根据合适的检测准则,确定系统的最佳检测方式及相应的具体系统结构。一定的检测方式,要求与之相应的确定的信号形式,在设有调制盘的系统中,调制盘的型式决定了系统的信号形式。因此,通过调制盘图案的设计及扫描方式的选择,可以给出满足最佳检测方式所要求的信号形式,从而提高了系统的检测性能。读者在学习了第三章和第六章的有关章节以后,会对调制盘的这一作用有更深入的理解。

2-1.3 关于调制波的一般概念

设已知一高频信号,其瞬时值由下式决定:

$$a(t) = a_0 \sin(\omega t + \varphi) = a_0 \sin \Phi \quad (2-1)$$

式中幅度 a_0 、角频率 ω 和相位 φ 可以是常量或缓慢变化的量,而 Φ 是时间为 t 时信号的相角。

如果 a_0 、 ω 和 φ 是常数,则式(2-1)表示一个简单的未调制波(简谐振荡),通称为载波,这个波形的角频率 $\omega = \omega_0$ 称为载频。

如果 a_0 或 Φ 发生变化,以相应地传送信息,则信号 $a(t)$ 就成了调制波。

使载波的某一参量(如它的幅度、频率、相位等)随时间按一定规律变化的过程,叫作调制。

按照调制参量的不同,调制分为两种主要型式:调幅和调角(角度调制)。

调角又分为两类:调频和调相。这两类调制之间有着紧密的联系,它们的差别只是在同一调制函数作用下,相角 Φ 随时间的变化的性质不同。

我们把所要传送的信息称为调制信号,调制信号与载波信号相比,通常可以看作是慢变化的时间函数,这就是说,相对于载波频率 ω_0 而言,调制信号的频谱聚于较低的频率区域。

(2-1)式所表示的高频正弦信号,只要有一个参数(幅度、频率或相位)按调制信号规律发生了变化,那么该信号就不再是单一频率的正弦信号,而变成了一个由若干个不同频率的正弦型信号(以下我们把余弦信号和正弦信号统称为正弦型信号)组合而成的信号。由此可见,调制波具有一个频谱。频谱的结构与调制信号的性质以及调制的类型有关。

在实际中常常会产生混合调制,例如调幅-调相和调幅-调频。但此时往往是其中有一种型式的调制是有益调制(工作调制),而另一些则是附加在主要调制之上的寄生调制,这些寄生调制或者是由于实现调制的方法本身所造成的,或者是由于调制波通过电路时,其频谱发生变形而产生的。例如我们以后要叙述的光点扫描式调制盘,其载波的幅度和频率同时可以受到目标位置的调制。此时,如果我们利用载波幅度变化这一特征去处理这种调制波,那么这种调制盘就可以看成为调幅调制盘;如果从载波频率变化这一特征考虑去处理调制波,就可以把它看成为调频调制盘。

2-1.4 调制波的形式及其主要特性⁽⁴⁾

本节先从调制波的一般形式着手分析其主要特性。这样,在下面叙述调制盘的类型及工作原理,进行不同调制盘的性能比较以及分析计算调制盘的特性时,将会比较方便。

按照载波的类型不同,调制方式大致可以分为连续波调制和脉冲调制两大类。

一、连续波调制

用连续波(例如正弦型信号)作载波的调制称为连续波调制,它包括调幅、调频和调相三种方式,其中调频和调相又称为调角。

(一) 调幅 (AM)

设调制信号(信息)如图 2-2(a) 所示,其中 $g(t)$ 为调制信号,载波为余弦波,载频为 f_c 。这样,图 2-2(a) 所示的调幅波可以用下式表示:

$$e_{AM}(t) = [a_c + kg(t)] \cos 2\pi f_c t = A(t) \cos 2\pi f_c t \quad (2-2)$$

式中 k 为比例系数; a_c 为载波信号的幅度(未调制时); $A(t)$ 为 t 时刻的调制波幅值。

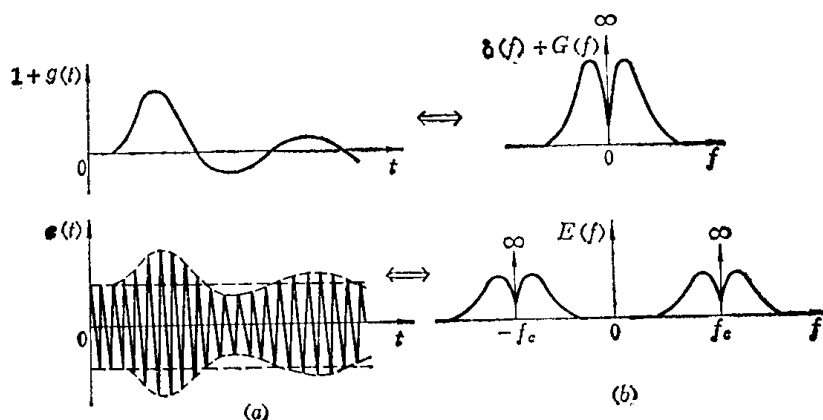


图2-2 调幅波及其频谱

比值 $M = k/a_c$ 称为调制指数或调制度系数,它是表征调制深度的量,通常用百分比表示,即 $100M\%$ 。这时,调幅波的一般表示式为

$$e_{AM}(t) = [1 + Mg(t)] a_c \cos 2\pi f_c t \quad (2-3)$$

一般假定 $g(t)$ 的极大值 $g_{\max}(t)$ 和 M 满足下列条件:

$$|g_{\max}(t)| \leq 1 \quad 0 < M < 1$$

如果上述条件遭到破坏,便会出现过调制现象,即同时出现调幅和调相现象。这是我们所不希望的。

由 (2-2) 式可知,在调幅的情况下,载波信号的幅值随着调制信号的变化而变化,即 $A(t) = a_c + kg(t)$,也就是载波信号的包络线按照被传送信号的规律而变化。因此在提取有用信号时,可以采用包络检波的解调方法。

对 (2-3) 式进行傅立叶变换,并利用 δ 函数的性质及傅立叶变换的相乘特性,可以得到调幅波的频谱〔图 2-2(b)〕为

$$E_{AM}(f) = \frac{a_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{Ma_c}{2} [G(f - f_c) + G(f + f_c)] \quad (2-4)$$

其中 $g(t) \longleftrightarrow G(f)$ 为傅立叶变换对。

由(2-4)式可见,在调幅过程中并不产生新的频谱,而只是把调制信号(低频信号)的频谱从原点附近移到载频谱线附近〔如图2-2(b)所示〕。

当 $g(t) = \cos 2\pi Ft$ 时, (2-3) 式和 (2-4) 式分别成为

$$e_{AM}(t) = a_c \cos 2\pi f_c t + \frac{Ma_c}{2} [\cos 2\pi(f_c - F)t + \cos 2\pi(f_c + F)t] \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} E_{AM}(f) = & \frac{a_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] \\ & + \frac{Ma_c}{4} [\delta(f - f_c - F) + \delta(f - f_c + F) \\ & + \delta(f + f_c - F) + \delta(f + f_c + F)] \end{aligned} \quad (2-6)$$

由(2-5)式可以求出调幅波中各谐波分量的平均功率,其中载波平均功率为

$$P_c = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (a_c \cos 2\pi f_c t)^2 d(2\pi f_c t) = \frac{a_c^2}{2}$$

同样可得,上下边频谐波分量平均功率为

$$P_{upr} = P_{unr} = \frac{M^2 a_c^2}{8}$$

因而两个边频分量的总平均功率为

$$P_{as} = \frac{M^2 a_c^2}{4}$$

在100%调制(最大可能情况)的条件下,上式成为

$$P_{as} = \frac{a_c^2}{4} = \frac{P_c}{2}$$

因而总功率 P_a 为

$$P_a = P_{as} + P_c = \frac{3}{2} P_c = 3 P_{as} \quad (2-7)$$

在调幅波中,载波并不能传送有用信号,只有边频才能传送有用信号。(2-7)式说明,总功率中只有三分之一被用来传送有用信号,能量利用效率较低,这是调幅的一个主要缺点。

下面我们再来讨论调幅的信噪比增益问题。

考虑到载波功率并不用于传送有用信号,故输入信噪比 $C_{i(AM)}$ 为

$$C_{i(AM)} = \frac{P_{as}}{P_{ni}} = \frac{M^2 a_c^2}{4 P_{ni}}$$

式中 P_{ni} 为输入噪声平均功率。

噪声是随机量。噪声的分布律因噪声源而异,通常可以认为系统噪声是高斯型的,且有无限宽的频谱。当噪声通过窄带滤波器后,可以近似地将噪声表示成如下形式:

$$n_i(t) = \rho_{ni}(t) \cos[2\pi f_c t + \varphi_{ni}(t)]$$

式中 $n_i(t)$ 为 t 时刻的噪声值;

$\rho_{ni}(t)$ 为噪声幅值,是随机量,其分布律和 $n_i(t)$ 相同;

$\varphi_{ni}(t)$ 为噪声相位,是随机量;

f_c 为载波频率,即为窄带滤波器的中心频率。

$n_i(t)$ 、 $\rho_{ni}(t)$ 和 $\varphi_{ni}(t)$ 为随机函数，仿照信号求平均功率的方法，在噪声相角变化一个周期内求平均功率，则得输入噪声平均功率为

$$P_{ni} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{\rho_{ni}(t) \cos[2\pi f_c t + \varphi_{ni}(t)]\}^2 d[2\pi f_c t + \varphi_{ni}(t)] = \left\langle \frac{\rho_{ni}^2(t)}{2} \right\rangle$$

式中 $\langle \rho_{ni}^2(t)/2 \rangle$ 为均值。

输入信号和噪声的混合波形为

$$\begin{aligned} x(t) &= a_c(1 + M \cos 2\pi F t) \cos 2\pi f_c t + \rho_{ni}(t) \cos[2\pi f_c t + \varphi_{ni}(t)] \\ &= \operatorname{Re}[a_c(1 + M \cos 2\pi F t) + \rho_{ni}(t) e^{j\varphi_{ni}(t)}] e^{j2\pi f_c t} \end{aligned} \quad (2-8)$$

$x(t)$ 通过包络检波后，输出为

$$\begin{aligned} y(t) &= |a_c(1 + M \cos 2\pi F t) + \rho_{ni}(t) e^{j\varphi_{ni}(t)}| = [a_c^2(1 \\ &\quad + M \cos 2\pi F t)^2 + \rho_{ni}^2(t) + 2a_c(1 + M \cos 2\pi F t) \\ &\quad \times \rho_{ni}(t) \cos \varphi_{ni}(t)]^{1/2} \end{aligned} \quad (2-9)$$

在大信噪比 ($a_c^2/2P_{ni} \gg 1$) 条件下，上式可简化为

$$\begin{aligned} y(t) &\approx a_c(1 + M \cos 2\pi F t) + \rho_{ni}(t) \cos \varphi_{ni}(t) \\ &= a_c + M a_c \cos 2\pi F t + \rho_{ni}(t) \cos \varphi_{ni}(t) \end{aligned}$$

其中第一项 a_c 为载波信号幅值；用于传送有用信号的是第二项 $M a_c \cos 2\pi F t$ ，输出的有用信号平均功率为

$$P_{so} = \frac{M^2 a_c^2}{2} \quad (2-10)$$

第三项为输出噪声项。输出噪声平均功率 P_{no} 为 $\rho_{ni}^2(t) \cos^2 \varphi_{ni}(t)$ 的均值，即

$$P_{no} = \langle \rho_{ni}^2(t) \cos^2 \varphi_{ni}(t) \rangle$$

考虑到 $\langle \cos^2 \varphi_{ni}(t) \rangle = \frac{1}{2}$ ，则上式变为

$$P_{no} = \left\langle \rho_{ni}^2(t) \frac{1}{2} \right\rangle = P_{ni} \quad (2-11)$$

上式表明，在大信噪比条件下，调幅系统的输出噪声平均功率等于输入噪声平均功率。这时输出信噪比为

$$C_{o(AM)} = \frac{P_{so}}{P_{no}} = \frac{M^2 a_c^2}{2P_{ni}} = 2C_{i(AM)} \quad (2-12)$$

由上式可见，输出功率信噪比比输入功率信噪比高一倍，所以调幅系统具有 3dB 的信噪比增益（指电压信噪比）。因为，虽然输出噪声平均功率与输入噪声平均功率相同，但输出有用信号平均功率却比输入高一倍，因此功率信噪比增益为 2 倍。

在小信噪比 ($a_c^2/2P_{ni} \ll 1$) 的条件下，(2-9) 式可以简化成

$$y(t) \approx \rho_{ni}(t) + a_c(1 + M \cos 2\pi F t) \cos \varphi_{ni}(t) \quad (2-13)$$

上式右端第二项是包含信息的低频信号与随机函数 $\cos \varphi_{ni}(t)$ 的乘积， $\cos \varphi_{ni}(t)$ 的取值范围是 $-1 \sim 1$ 之间，如果取 $M=100\%$ （最大可能情况），故第二项的最大值为 $2a_c$ ，由于 $a_c \ll \rho_{ni}(t)$ ，故第二项可以略去，输出只有随机噪声 $\rho_{ni}(t)$ 。这说明当输入信噪比在某一临界值以下时，有用信号就会消失在噪声中，系统检测效能急剧变坏，以至检测有用信号成为不可能。这种现象称为门限效应。门限效应限制了系统对微弱信号的探测

能力。

(二) 调角

载波信号的相角〔即 (2-1) 式中的 Φ 〕按照调制信号的规律而变化, 这种调制称为调角。调角波的一般表示式为

$$e_a(t) = a_c \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)] = a_c \cos\Phi(t) \quad (2-14)$$

相角 $\Phi(t)$ 随时间 t 而变化有两种不同的情况, 一种称为调相 (PM), 一种称为调频 (FM)。

在调相的情况下, 载波相位在变化:

$$\varphi(t) = k_p g(t) \quad (2-15)$$

式中 k_p 为比例常数, $g(t)$ 为调制信号。因而调相波为

$$e_{PM}(t) = a_c \cos[2\pi f_c t + k_p g(t)] \quad (2-16)$$

这个调相波的相角的瞬时值由下式决定:

$$\Phi(t) = 2\pi f_c t + k_p g(t)$$

由于角频率 ω 是相角 $\Phi(t)$ 的变化速度, 即 $\omega = d\Phi(t)/dt$ 。所以瞬时频率为

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} = f_c + \frac{k_p}{2\pi} \frac{dg(t)}{dt}$$

由上式可见, 在调相时不仅载波信号的相位在变化, 而且它的频率也变化。

在调频的情况下, 载波瞬时频率在变化, 令其按下式变化

$$f_i = f_c + \frac{k_F}{2\pi} g(t)$$

其中 k_F 为比例常数。

由于

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

因此

$$\Phi(t) = \int_0^t 2\pi f_i dt = \int_0^t 2\pi \left[f_c + \frac{k_F}{2\pi} g(t) \right] dt = 2\pi f_c t + k_F \int_0^t g(t) dt$$

将上式代入 (2-14) 式得调频波为

$$e_{FM}(t) = a_c \cos \left[2\pi f_c t + k_F \int_0^t g(t) dt \right] \quad (2-17)$$

此时载波的相位为

$$\varphi(t) = k_F \int_0^t g(t) dt$$

可见调频时不仅载波的频率产生变化, 而且也有相位的变化。

由以上的分析可知, 调角时, 频率和相位的变化都会使相角发生变化。频率与相位的变化是有密切联系的, 调频与调相虽然调制方式不同, 但实质上是有共同之处的。因而以下我们只就调频波进行分析。

1. 调频波 (FM) 及其频谱

调频波的基本特征是载波信号幅度保持不变, 信号频率随调制信号的大小而变化。即所需传送的信息反映在高频信号的频率变化上。

无论什么形式的调制信号, 都可以看作是由各种不同频率的正弦波叠加而成的。这

里为讨论方便起见,我们仅用单一频率(以下简称单频)的正弦型信号 $g(t) = a_m \cos 2\pi F t$ 作为调制信号,来讨论调频波及其频谱,从而进一步研究调频系统的工作过程及指标。

单频正弦型信号对载频调制的情况如图 2-3 所示。

将调制信号 $g(t) = a_m \cos 2\pi F t$ 代入调频波的一般表示式 (2-17) 式,得单频正弦调频波为

$$\begin{aligned} e_{FM}(t) &= a_c \cos \left[2\pi f_c t + k_F a_m \int_0^t \cos 2\pi F t dt \right] \\ &= a_c \cos \left[2\pi f_c t + \frac{k_F a_m}{2\pi F} \sin 2\pi F t \right] \\ &= a_c \cos [2\pi f_c t + M \sin 2\pi F t] \quad (2-18) \end{aligned}$$

$$\text{其中 } M = \frac{k_F a_m}{2\pi F} = \frac{k_F a_m}{2\pi} \cdot \frac{1}{F} = \frac{\Delta f}{F} \quad (2-19)$$

M 称为调制指数; $\Delta f = k_F a_m / 2\pi$ 为最大频率偏移,它是调频波中瞬时频率的最大值相对载频的偏移量,即 $\Delta f = f_{i_{\max}} - f_c$; F 为调制信号的频率。显然,由 (2-19) 式可见,调制指数为最大频率偏移与调制信号频率之比。因此, M 也常称为频偏峰值比或简称频偏比。

应用三角函数展开公式,可以把 (2-18) 式写成

$$\begin{aligned} e_{FM}(t) &= a_c \cos 2\pi f_c t \cos(M \sin 2\pi F t) - a_c \sin 2\pi f_c t \\ &\quad \times \sin(M \sin 2\pi F t) \end{aligned} \quad (2-20)$$

令 $X = 2\pi F t$, 把上式的 $\cos(M \sin X)$ 和 $\sin(M \sin X)$ 展成级数形式为

$$\begin{aligned} \cos(M \sin X) &= J_0(M) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(M) \cos 2kx \\ \sin(M \sin X) &= 2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(M) \sin(2k+1)x \end{aligned}$$

其中 $J_k(M)$ 是宗数为 M 的第一类 k 阶贝塞尔函数,其表达式为

$$J_k(M) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(-1)^l \left(\frac{M}{2}\right)^{2l+k}}{l!(k+l)!}$$

其中 k 、 l 均为正整数。已知阶数 k , 宗数 M 时,可以通过查表求出 $J_k(M)$ 的值,利用以上展开式可以把 (2-20) 写成

$$\begin{aligned} e_{FM}(t) &= a_c \left[J_0(M) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(M) \cos 4\pi k F t \right] \cos 2\pi f_c t \\ &\quad - 2a_c \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(M) \sin[2\pi(2k+1)Ft] \sin 2\pi f_c t \\ &= a_c J_0(M) \cos 2\pi f_c t - a_c J_1(M) [\cos 2\pi(f_c - F)t \end{aligned}$$

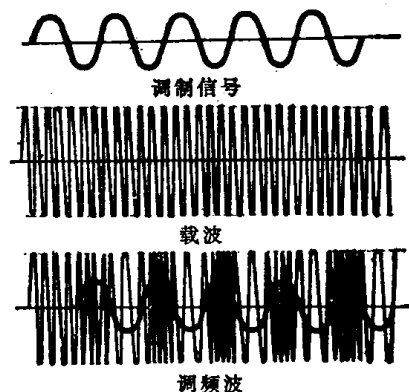


图2-3 正弦调频波

$$\begin{aligned}
& -\cos 2\pi(f_c + F)t] + a_c J_1(M)[\cos 2\pi(f_c - 2F)t \\
& + \cos 2\pi(f_c + 2F)t] - a_c J_3(M)[\cos 2\pi(f_c - 3F)t \\
& - \cos 2\pi(f_c + 3F)t] + \dots
\end{aligned} \quad (2-21)$$

其频谱为

$$\begin{aligned}
E_{FM}(f) = & \frac{a_c}{2} J_0(M)[\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] \\
& - \frac{a_c}{2} J_1(M)[\delta(f - f_c + F) + \delta(f + f_c - F) \\
& - \delta(f - f_c - F) - \delta(f + f_c + F)] \\
& + \frac{a_c}{2} J_2(M)[\delta(f - f_c + 2F) + \delta(f + f_c - 2F) \\
& + \delta(f - f_c - 2F) + \delta(f + f_c + 2F)] \\
& - \frac{a_c}{2} J_3(M)[\delta(f - f_c + 3F) + \delta(f + f_c - 3F) \\
& - \delta(f - f_c - 3F) - \delta(f + f_c + 3F)] \\
& + \dots
\end{aligned} \quad (2-22)$$

由(2-21)和(2-22)式可见,调频波的频谱是由载频 f_c 和无数对边频($f_c \pm kF$)组成的,其中 k 为任意正整数, $k = 0, 1, 2, 3 \dots$ 。这些边频对称地分布在载频左右两侧,而每相邻两边频之间的间隔等于调制信号频率 F ,可见调频的结果使频谱大为展宽,如图2-4所示。从图中可以看出,所有同阶数的上、下边频振幅大小相等,其中只有偶数阶的上、下边频与载波同相,而奇数阶的边频中,下边频与载波及上边频异相。边频的相对振幅是以调制指数 M 为宗数的各阶贝塞尔函数,其边频振幅可能超过载频振幅。贝塞尔函数的具体数值可由贝塞尔函数表查得,函数曲线如图2-5所示。图2-5说明了载波和各阶边频分量的振幅 $J_k(M)$ 与调制指数 M 的关系。这里假设未调制时的载波振幅为100%。

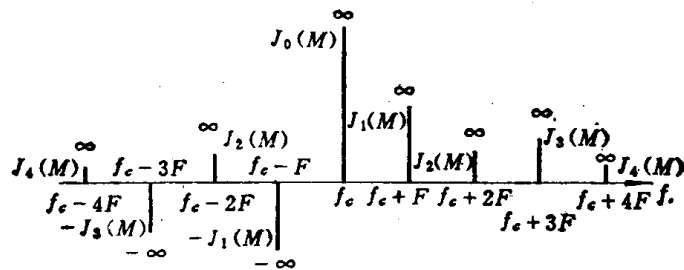


图2-4 余弦调频波频谱(正频谱部分)

从理论上说,调频波的边频有无限多个,因而带宽也应为无限宽。但实际上调频波的能量绝大部分是集中在载频附近的一些边频中,图(2-6)给出了不同 M 值时的频谱图,谱线的长度都是相对值(设载波振幅为100%)。由图可见:当 M 较小时,谱线强度较大者都集中在载频附近;当 M 较大时,随着 M 值的增大,调频波边频分量中幅度较大者的数目增加,即有效频谱宽度也相应增大。

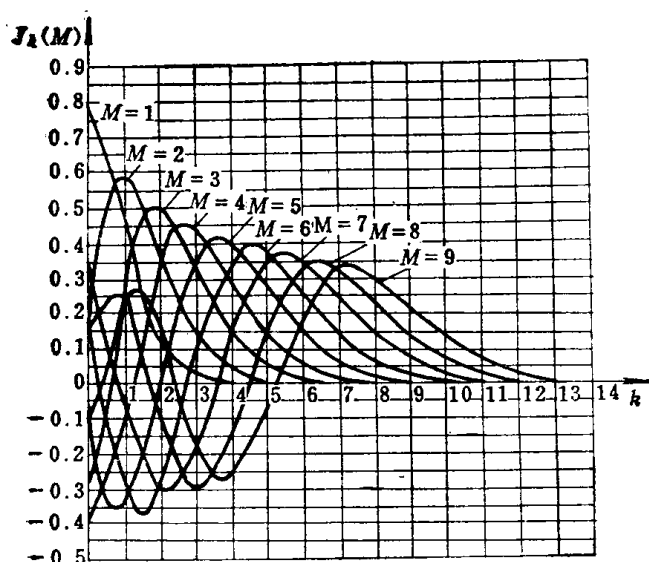


图2-5 贝塞尔函数曲线

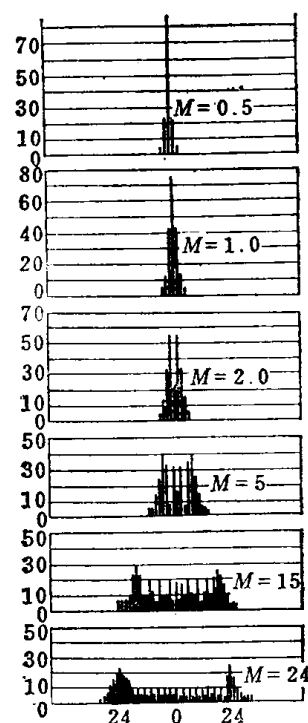


图2-6 不同M值时的频谱图

2. 讨论

(1) 频带宽度的选取

虽然调频波的频谱中包含无限多根谱线，但实际上有意义的只是其中有限根谱线，所以有可能用它们来近似地确定调频波的带宽。

从能量角度来考虑：

在 $M \gg 5$ 的条件下，当 $k > M$ 时，决定频谱强度（即振幅）的贝塞尔函数 $J_k(M)$ 很快地趋于零。因而所有阶数 k （即边频率数）大于 M 的谱线都可以忽略不计。在这种条件下，可以近似地取前 $k = M$ 阶谱线来决定频带宽度。由此得到调频波带宽为

$$\Delta F \approx 2MF = 2\Delta f \quad (2-23)$$

就是说，调频波的带宽近似地等于两倍最大频偏值。

当 $M \ll 1$ 时， $\sin(M \sin 2\pi Ft) \approx M \sin 2\pi Ft$

$$\cos(M \sin 2\pi Ft) \approx 1$$

因此，(2-20) 式可简化为

$$\begin{aligned} e_{FM}(t) &= a_c \cos 2\pi f_c t - M a_c \sin 2\pi f_c t \sin 2\pi Ft \\ &= a_c \cos 2\pi f_c t - \frac{M a_c}{2} [\cos 2\pi (f_c - F) t \\ &\quad - \cos 2\pi (f_c + F) t] \end{aligned} \quad (2-24)$$

因而调频波频谱为

$$\begin{aligned} E_{FM}(f) &= -\frac{a_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] \\ &\quad - \frac{M a_c}{4} [\delta(f - f_c + F) + \delta(f + f_c - F) \\ &\quad - \delta(f - f_c - F) - \delta(f + f_c + F)] \end{aligned} \quad (2-25)$$