

电子对抗原理

下 册

西北电讯工程学院 林象平 编

国防工业出版社



电子对抗原理

下册

西北电讯工程学院

林象平 编

国防工业出版社

电子对抗原理

本书系统地介绍了电子对抗的基本原理和技术基础。全书分上、下两册。上册包括一至六章。下册包括七至十二章，主要为电子干扰部分，其中第七至十一章介绍了积极干扰对接收显示系统、自动跟踪控制系统的作属，干扰压制区的计算和引导式、回答式干扰机的构成原理；第十二章介绍消极干扰和反雷达伪装。

本书对电子对抗的基本概念、基本原理和技术基础作了较详细的讨论，内容由浅入深，通俗易懂，便于自学。

本书可作为高等院校电子对抗、雷达、制导专业的教材和参考用书，也可供有关厂、所和部队的工程技术人员使用。

电子对抗原理

下 册

西北电讯工程学院

林森平 编

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092^{1/16} 32开 18^{1/8} 424千字

1982年1月第一版 1982年1月第一次印刷 印数：0,001—4,200册

统一书号：15034·2316 定价：1.90元

前 言

随着现代军事技术的发展，各种无线电技术装备的广泛使用，电子对抗技术在现代战争中的作用越来越重要，因而在国防现代化建设中居于十分重要的地位。

本书是一本阐述电子对抗（侦察、干扰）的基本原理和技术基础的专业课教材，供高等院校电子对抗专业教学用书，也可供雷达、制导等有关专业学习专业课时参考，以及有关厂、所、部队的工程技术人员使用。

本书分上、下两册。上册包括一至六章，下册包括七至十二章。第一章电子对抗概述，介绍电子对抗的基本概念和初步知识；第二、三、四、五章为电子侦察部分，其中第二章侦察接收机介绍侦察接收机的分机构成、指标和特点，第三、四、五章介绍对辐射源（雷达）的定向、定位，对信号频率的侦察和侦察信号的处理及终端设备；第六章至第十二章为电子干扰部分，其中第六章介绍干扰发射机的分机组成、指标及特点，第七章至十一章介绍积极干扰对接收显示系统、自动跟踪控制系统的作用、干扰压制区的计算和引导式、回答式干扰机的构成原理，第十二章介绍消极干扰及反雷达伪装。

电子对抗技术范围很广，技术分支很多，如雷达对抗、通信对抗、导航对抗、制导对抗、光电对抗等等，其中雷达对抗在原理上和技术发展上反映了整个电子对抗技术的基本内容和特点。故本书以雷达对抗作为主要内容，并适当介绍其它电子对抗技术的特点。

电子对抗技术发展极为迅速。本书在着重阐述基本原理的同时，力求反映当代电子对抗技术的新进展。但电子对抗技术直接涉及国防、军事机密，公开文献资料不多，因而对许多新技术、新理论只能作概要的介绍。为了理论联系实际，本书在涉及具体电子对抗设备时，考虑到保密要求，均以国外的设备为例。

本书由西北电讯工程学院的林象平（主编）、冯献成、梁百川、魏本涛等同志编写，其中魏本涛同志编写第二章，冯献成同志编写第三、四、五章，梁百川同志编写第六章，林象平同志编写第一、七、八、九、十、十一、十二章及全书的修改和定稿。在编写过程中得到教研室许多同志的支持和帮助。最后，由国防科学技术大学的朱德君（主审）等同志审阅，提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，在内容选取和原理阐述上定会有不少缺点、错误和不妥之处，恳切地希望读者批评指正。

编 者

目 录

第七章 对雷达接收显示系统的干扰 1	一、圆锥扫描系统的干扰特点.....74
§7-1 概述..... 1	二、振幅调频干扰.....79
一、干扰通过接收机..... 1	三、对隐蔽式圆锥扫描系统的干扰.....84
二、干扰作用于终端显示设备..... 2	四、干扰机不配置在目标上时对圆锥扫描系统的干扰.....86
三、干扰信号样式..... 3	五、对圆锥扫描系统干扰的压制系数.....89
§7-2 载波干扰对信号接收的影响..... 3	§8-3 对线性扫描系统的干扰.....91
一、正弦波干扰对脉冲信号波形的影响..... 4	一、原理及信号特点.....91
二、强干扰对弱信号的压制作用..... 9	二、干扰方法.....92
三、强干扰造成接收机的过载.....10	§8-4 对单脉冲雷达的干扰.....93
§7-3 噪声信号的特性.....12	一、单脉冲系统的误差信号和干扰特点.....93
一、噪声信号的傅里叶展开式.....12	二、单部干扰机调幅干扰对单脉冲雷达的干扰.....96
二、噪声的相关函数和功率谱密度.....13	三、交叉极化干扰.....99
三、白噪声.....15	四、空间两独立(非相干)干扰源对单脉冲系统的干扰.....100
四、噪声通过线性系统、窄带噪声.....17	五、空间两点或多点产生的扫频干扰.....104
五、信号和噪声同时通过线性系统.....22	六、空间两点产生的相干干扰.....104
六、噪声通过检波器.....23	§8-5 对自动距离跟踪系统的干扰.....109
七、噪声包络超越给定电平的平均次数和平均宽度.....28	一、自动距离跟踪系统的干扰特点.....109
§7-4 干扰效果的估价.....31	二、脉冲干扰.....111
一、雷达发现目标的特点.....31	三、噪声干扰.....113
二、压制系数.....33	§8-6 对自动速度跟踪系统的干扰.....114
§7-5 射频噪声干扰及参数选择.....38	一、速度跟踪系统的原理及干扰特点.....114
一、接收机对干扰信号的概率分布、功率谱的变换.....38	二、对速度跟踪系统的干扰.....116
二、干扰效果及干扰参数选择.....40	§8-7 对遥控系统的干扰.....116
§7-6 噪声调幅干扰.....42	一、无线电遥控系统的原理及干扰特点.....117
一、噪声调幅信号的基本性质和参数.....42	二、对脉冲编码遥控系统的干扰.....118
二、接收机对噪声调幅干扰的功率和频谱的影响.....45	第九章 干扰方程及有效干扰空间122
三、干扰效果及干扰参数选择.....47	§9-1 干扰方程(反雷达方程).....123
§7-7 噪声调频干扰.....49	§9-2 目标的有效反射面积.....126
一、噪声调频干扰的基本性质.....49	§9-3 有效干扰距离、有效干扰区及有效干扰扇面.....128
二、噪声调频干扰对雷达信号接收的影响.....54	一、有效干扰区.....128
三、噪声调频干扰的参数选择.....64	二、干扰机的最小干扰距离和最大干扰距离.....130
§7-8 噪声调幅调频干扰.....65	三、干扰扇面.....131
一、噪声调幅调频干扰的信号特点.....65	§9-4 干扰机掩护运动目标时的有效干扰区.....134
二、噪声调幅调频干扰对雷达信号接收的影响.....68	§9-5 干扰机掩护固定目标时的有效干扰区.....136
三、干扰参数的选择.....72	§9-6 干扰机的功率配合.....139
第八章 对雷达自动跟踪系统和遥控系统的干扰73	一、干扰机的掩护角.....139
§8-1 概述.....73	二、干扰机的功率配合.....140
§8-2 对圆锥扫描系统的干扰.....74	

§9-7 对利用通信原理工作的系统的干扰方 程及有效干扰区	141	二、干扰机的功率要求及计算	203
一、干扰方程	141	三、天线及收发隔离	205
二、有效干扰区	142	四、回答式干扰机的整机延迟时间	206
第十章 引导式干扰机的构成原理	146	§11-3 回答式干扰机所用的行波管及其主 要特性	206
§10-1 引导式干扰机的基本组成及基本 要求	146	§11-4 对雷达角跟踪系统干扰的回答式干 扰机	210
一、干扰机的基本组成	146	一、对圆锥扫描跟踪系统的回答式干扰机	210
二、对干扰机的基本要求	147	二、对线性扫描、单脉冲等角跟踪系统的干扰	211
三、对干扰机引导时间的要求	149	三、机载回答式倒相干扰机举例	213
四、缩短引导时间的办法	151	§11-5 储频技术	220
五、利用雷达旁瓣完成干扰机的引导	152	一、储频环路的储频原理	221
§10-2 干扰机的频率引导方法	152	二、储频条件及储频精度	222
一、测频法频率引导	153	三、对延迟线的要求	225
二、比较法频率引导	157	四、储频的建立过程及对行波管的要求	226
三、综合法频率引导	160	五、储频的持续时间	229
四、记频的方法	162	六、相位微调法储频	231
§10-3 快速频率引导的引导式干扰机	165	§11-6 距离欺骗和假目标回答式干扰机	232
一、快速引导干扰机的类型	165	一、对距离跟踪系统的回答式干扰机	232
二、搜索式接收机对大功率电调振荡器快速引导 的干扰机	166	二、假目标回答式干扰机	234
三、搜索式接收机对行波管放大式发射机引导的 干扰机	168	§11-7 对自动速度跟踪系统的回答式干 扰机	235
四、矩阵式接收机引导的干扰机	170	一、使载频频移的方法	235
五、数字式快速引导的干扰机	173	二、对速度跟踪系统的回答式干扰机	238
§10-4 干扰机的功率要求	177	§11-8 时间压制区	239
一、干扰机的空间能量计算	177	一、干扰机、目标、雷达在一个平面上时的时间 压制区	240
二、干扰机实现大功率的方法	181	二、干扰机、目标在地面而雷达具有一定高度H 时的时间压制区	241
§10-5 干扰机的输出系统和波束控制	184	三、时间压制区的掩护角	243
一、单波束输出系统	184	四、回答式选通干扰的时间压制区	244
二、多天线、波束开关控制输出系统	185	五、回答式干扰机进行模拟干扰时的空间时间 特点	246
三、用混合接头构成的输出系统	189	六、能量压制区和时间压制区的统一考虑	247
§10-6 干扰机的收发隔离	190	第十二章 消极干扰	248
一、收发隔离度	190	§12-1 箔条(干扰丝/带)	248
二、增大收发隔离度的方法	191	一、箔条干扰的一般特性	248
§10-7 干扰效果监视	193	二、箔条的有效反射面积	249
一、实现干扰效果监视的方法	193	三、箔条的频率响应	254
二、几种干扰效果监视技术	194	四、箔条的极化	255
§10-8 干扰机的程序控制	197	五、箔条回波信号的频谱	256
一、干扰机的程序控制	197	六、箔条云对电磁波的衰减	257
二、具有程序控制器的干扰机原理举例	198	七、箔条的遮挡效应	258
第十一章 回答式干扰机的构成原理	201	八、箔条的运用参数和机械特性	259
§11-1 回答式干扰机的基本组成、类型和 特点	201	§12-2 反射器	261
一、基本组成和特点	201	一、角反射器	262
二、回答式干扰机的类型	202	二、双锥反射器	267
§11-2 回答式干扰机的主要技术要求及功 率计算	203	三、龙伯透镜反射器	268
一、干扰机的频率要求	203	四、万-阿塔反射阵	271

§12-3 假目标和雷达诱饵.....272

- 一、带有发动机的假目标272
- 二、火箭式雷达诱饵272
- 三、拖曳式雷达诱饵274
- 四、投掷式雷达诱饵276

§12-4 反雷达涂层.....280

- 一、减小目标有效反射面积的方法280
- 二、吸收型反雷达涂层281
- 三、干涉型反雷达涂层282
- 四、谐振型反雷达涂层283
- 五、放射性同位素反雷达涂层284

第七章 对雷达接收显示系统的干扰

对雷达施放干扰的目的是破坏雷达的正常工作以掩护和保卫自己。具体地说，就是使雷达的信号系统和控制系统不能正常地有效地工作。

雷达的类型很多，性能各异，而干扰信号样式和干扰的方式又是多种多样的，怎样来分析各种干扰对雷达的干扰效果呢？透过现象看本质，我们只需研究几种主要的干扰样式对雷达的主要工作系统的作用过程，通过对这几种干扰信号的干扰效果的分析，就可以了解各种干扰对雷达的作用实质。

在雷达的工作系统中，干扰能够起作用的有两个系统：接收显示系统（包括接收机和终端显示设备）和自动跟踪系统。

接收显示系统是各种雷达所必不可少的系统。警戒和引导指挥雷达，主要靠接收显示系统来发现目标和获取目标的数据。精密跟踪雷达，虽然它的主要工作系统是各种自动跟踪系统（包括自动方向跟踪系统、自动距离跟踪系统、自动速度跟踪系统等），但接收显示系统仍是不可少的。信号总是通过接收机然后才进入自动跟踪系统。

本章先讨论干扰对雷达接收显示系统的影响。对雷达自动跟踪系统的干扰问题，将在下一章讨论。

讨论将根据干扰对象（雷达的各种工作系统）的原理和特点，研究干扰的方法和途径，选择有效的干扰样式，进行干扰效果的分析，确定干扰参数，以此作为干扰机总体设计和分机设计时的依据。

§ 7-1 概 述

雷达接收显示系统包括雷达接收机和雷达显示终端设备，这是两种性能不同的设备。雷达接收机的作用是在干扰背景下接收和放大目标回波，因而它首先要在有用的回波和无用的干扰之间进行选择，使回波信号最佳的通过，而使干扰受到最大的抑制。雷达显示终端设备则是雷达操纵员用来检测目标的存在、获取目标信息的设备。因此，干扰对接收显示系统的影响就包括了对接收机的影响和对显示器的影响两个方面。

一、干扰通过接收机

雷达接收机需具有良好的选择性和高的灵敏度，因而都采用超外差电路，其原理方框如图 7-1(a) 所示。如果从线路的性质和对信号的影响来看，一部雷达接收机又可归结为三部分电路所组成，如图 7-1(b) 所示。

高频部分，包括高频、混频和中频，其作用是对信号进行频率选择和微弱信号的放大。它们对信息的转换来说，都属于线性变换。混频器对信号频谱的变换来说是非线性的，但它将信号不失真地由高频变到中频，因此，对信息的传输来说是线性的。雷达接收机对信号的选择性，主要由中频放大器的带宽决定。

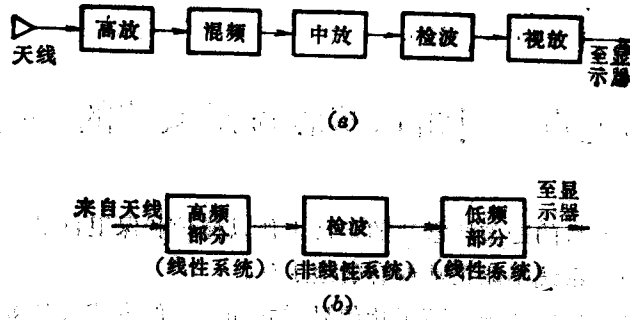


图7-1 雷达接收机的原理组成

(a) 原理方框图; (b) 简化方框图。

检波器，它用以检出射频信号的包络，滤除高频成分，取出调制信息，是非线性系统。视频放大器将检波信号进行放大，加至显示终端设备，是线性系统。

由此可见，干扰通过雷达接收机也就归结为干扰通过线性系统和通过非线性系统（检波器）两类问题。

二、干扰作用于终端显示设备

雷达显示器把目标回波信号以一定的形式显示于荧光屏，操纵员根据荧光屏上的信号标志来发现目标的存在、判断目标的性质和测定目标的空间坐标数据。因此，雷达显示器是雷达信息和操纵员之间的联系环节。而对接收显示系统的干扰效果也集中地反映在显示器上干扰信号对目标回波的压制、掩盖和模拟作用，使雷达不能正确获取目标信息。

雷达显示器约有十多种型式，其中常用的约五六种。从干扰特点上可分为三类：一类是幅度偏转的显示器，以A型显示器为代表，其他如J型、K型、L、M、N型是它的改进或变型；一类是亮度调制的显示器，以P型、B型显示器为代表，其他如C型、D型、E、H、I型则是P型和B型的改进或变型；一类是数字和字符显示器。

A型显示器是一度空间显示器，时基线代表距离，目标回波在时基线上以脉冲尖头形式出现，操纵员根据脉冲前缘来测读目标距离。当回波比接收机内部噪声大时，则在显示器上回波的幅度比噪声的茅草尖头高，而且时基线上有缺口。由于荧光屏对脉冲有一定的积累作用，回波通常也比噪声亮，但是雷达为了根据回波的波形和跳动的特点以获取更多的目标信息（目标的性质及机群中的架数等等），荧光屏的余辉时间又不宜太长，所以一般都是中等或中短余辉时间（中短余辉时间为 $10\mu\text{s}\sim 1\text{ms}$ ，中等余辉为 $1\sim 100\text{ms}$ ）。

P型显示器是二度空间显示器，采用极坐标形式，扫描线由中心向外扫描，代表距离数据，扫描线随同天线主瓣同步转动，扫描线的方向代表目标的方位。目标回波是一个亮点或短的圆弧。操纵员以亮点的位置测读目标的距离和方位，以亮点的大小和强弱来判断目标的大小。P型显示器为了不使过强的信号造成荧光屏过亮和光点散焦，通常在显示器前级对信号限幅。P型显示器一般都采用长余辉的示波管，以便连续地掌握空中多个目标的变化和目标的航迹（长余辉管的余辉时间为 $100\text{ms}\sim 1\text{s}$ ）。

数字显示和字符显示是在现代雷达中越来越广泛采用的显示技术。早期的雷达直接将雷达回波的原始图象显示于荧光屏上（如A型、P型显示器），采用的是模拟技术。现代雷

达显示器,除了要求显示雷达的原始图象外,还要求显示出经过数字电路和计算机处理的雷达数据(如批号、高度、航迹、机数、机型、敌我性质等)。这种显示器称为情况显示器,它由阴极射线示波管来显示雷达信号的原始图象,再将经计算机处理的雷达数据通过字符产生器,将数字编码数据变换成图象形式的字符,显示到目标处或列表显示在荧光屏的合适位置上。数字显示和字符显示器还有一类较简单的显示器,即数码管显示器和表格显示器,这可以通过专门的硬件来完成,也可以设计专用的软件来完成。

在这三类显示器中,幅度偏转的显示器比亮度调制的显示器的抗干扰性能强。因为,当干扰噪声超过回波信号时,在P型显示器上将形成比目标回波亮的连续的干扰扇面而不能观察目标,但在A型显示器上,还可以在噪声的随机起伏的波形中,根据回波的跳动或扫描线上的缺口来观察目标。数字显示和字符显示是自动化数据处理设备,它要求有更大的信号噪声(干扰)比才能正常工作。

三、干扰信号样式

雷达的型式很多,体制各异,因此,用来干扰雷达的干扰信号样式的种类就很多。但从信号特点上可以归为三类:脉冲干扰、噪声干扰和规则信号调制的干扰。对脉冲雷达的接收显示系统进行干扰时,干扰信号样式主要是两类:脉冲干扰和噪声干扰。而规则信号调制干扰多复合调制到脉冲干扰、噪声干扰上或调制到载波上,主要用于干扰自动跟踪系统。

脉冲干扰主要起模拟干扰的作用,其信号参数和雷达信号的应尽量相同。噪声干扰则是为了压制雷达对信号的接收,掩盖雷达对回波的观察,降低雷达的作用距离。

噪声干扰是具有多种干扰效果的干扰样式,因而是对任何雷达系统都有效的一种干扰样式。

在噪声干扰中,对接收显示系统干扰效果最好的是接收机的内部噪声,它的掩盖性能最好,也就是噪声的质量最好。但为了得到强的干扰功率以压制雷达对信号的接收,实际干扰机发射的噪声干扰绝大多数都是噪声调制干扰。根据发射机型式和干扰对象的不同,噪声调制干扰又有噪声调幅干扰、噪声调频干扰和噪声调幅调频干扰等。

噪声调幅干扰和噪声调频干扰对雷达接收显示系统的作用过程,其物理实质是不同的,但其干扰的目的都是以强的干扰噪声压制和掩盖雷达回波的接收和显示。因此,它们都存在一个干扰信号参数的选择问题,以期得到良好的掩盖性能和强的有效的干扰功率。

在这一章里,我们将主要讨论噪声、噪声干扰对接收显示系统的作用过程和噪声干扰的参数选择问题。

§7-2 载波干扰对信号接收的影响

载波干扰就是强功率的不加任何调制的连续波正弦信号,它对雷达信号接收的影响是各种连续波干扰的干扰载波(例如噪声调幅干扰、噪声调幅调频干扰等)都有的干扰效果,具有一定的共性。

载波干扰对信号接收的影响表现在两个方面:一个是干扰对雷达接收机线路的工作性能的影响;破坏接收机正常工作的能力,例如使电路处于非线性状态,使接收机电路过载;

一个是雷达在信号的接收过程中，干扰对雷达信号的作用，引起信号的波形跳动、失真和强干扰压制弱信号的现象。

一、正弦波干扰对脉冲信号波形的影响

假设干扰为正弦波，被干扰的信号是矩形脉冲波，它们的表示式可写为：

$$u_s(t) = \begin{cases} U_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) & |t| \leq \frac{\tau}{2} \\ 0 & \text{其它 } t \end{cases} \quad (7-1)$$

$$u_j(t) = U_j \cos(\omega_j t + \varphi_j) \quad (7-2)$$

式中 U_s, U_j —— 信号及干扰的振幅，

ω_s, ω_j —— 信号及干扰的角频率， $\omega = 2\pi f$ ，

φ_s, φ_j —— 信号及干扰的初相角，

τ —— 信号的脉冲宽度。

由干扰和信号的合成波电压，参看图 7-2 可得：

在脉冲宽度 τ 之内为： $u_{sj}(t) = U_{sj} \cos(\omega_j t + \varphi_{sj})$ (7-3)

式中 U_{sj} 和 φ_{sj} 分别为合成波的振幅和初相角：

$$\begin{cases} U_{sj} = \sqrt{U_s^2 + U_j^2 + 2U_s U_j \cos \varphi} \\ \varphi_{sj} = \varphi_s - \arctg \frac{U_j \sin \varphi}{U_s + U_j \cos \varphi} \end{cases} \quad (7-4)$$

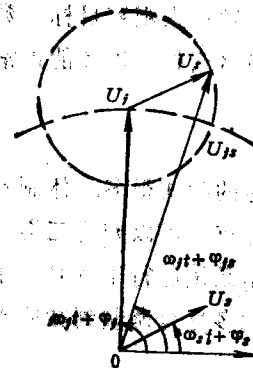


图 7-2 干扰和信号的合成矢量

其中

$$\varphi = (\omega_j - \omega_s) t + (\varphi_j - \varphi_s) = \Delta\omega t + \Delta\varphi \quad (7-5)$$

在脉冲宽度 τ 之外为：

$$u_{sj}(t) = U_j \cos(\omega_j t + \varphi_j) \quad (7-6)$$

在强干扰情况下，即 $U_j \gg U_s$ 时，将 (7-4) 式的合成波的振幅改写为：

$$U_{sj} = U_j \left[1 + \frac{U_s^2}{U_j^2} + 2 \frac{U_s}{U_j} \cos \varphi \right]^{1/2} = U_j (1 + a^2 + 2a \cos \varphi)^{1/2}$$

式中 $a = U_s/U_j$ ，由级数展开式

$$(1+x)^{1/2} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{2 \cdot 4}x^2 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6}x^3 - \dots \quad |x| \leq 1$$

可将上式展开为：

$$U_{sj} = U_j \left[1 + \frac{1}{2}a^2 + a \cos \varphi - \frac{1}{2}a^2 \cos^2 \varphi - \frac{1}{2}a^3 \cos \varphi - \frac{1}{8}a^4 + \dots \right] \quad (7-7)$$

当 $U_j \gg U_s$ ，即 $a \ll 1$ 时，忽略高次项得：

$$\begin{cases} U_{sj} \approx U_j (1 + a \cos \varphi) = U_j + U_s \cos \varphi \\ \varphi_{sj} \approx \varphi_j - \frac{U_s}{U_j} \sin \varphi \end{cases} \quad (7-8)$$

实际上，当 $U_j \gg 3U_s$ ，即 $a \ll 1/3$ 时，上式就已比较准确了。

从上述分析可知，当脉冲信号受到连续波干扰后，合成的电压是一个振幅和相位都变

化了的信号。由此产生的干扰效果，下面我们分别加以说明。

(一) 干扰引起脉冲信号跳动

根据图 7-2 和 (7-4) 式及 (7-5) 式可以定性定量地得出脉冲信号在连续波干扰下产生波形跳动的现象。

波形跳动现象是在 $f_j = f_s$ 的情况下，由于每个高频脉冲波和连续波的初始相位差作随机变化而引起的。

由 (7-5) 式和图 7-2 的矢量图可明显地看出：当 $\varphi = (\omega_j - \omega_s) t + (\varphi_j - \varphi_s) = \varphi_j - \varphi_s = 0$ 时，脉冲信号的高频正弦振荡和连续波干扰的高频正弦振荡是同相相加的，因而合成信号是幅度为 $|U_j + U_s|$ 的矩形脉冲；当 $\varphi = 180^\circ$ 时，两者相减，合成信号是幅度为 $|U_j - U_s|$ 的矩形脉冲；当 φ 为其他值时，合成信号仍是矩形脉冲，但其幅度则介于最大值 $|U_j + U_s|$ 和最小值 $|U_j - U_s|$ 之间。

所以，在连续波干扰之下，在 $f_j = f_s$ 的情况下，由于脉冲信号和连续波的高频振荡的相位差是在 0 至 2π 范围内的任意值，因此，雷达所接收的脉冲信号就不是幅度不变的，而是幅度作随机跳动的。

图 7-3 是干扰后合成信号的波形图（高频、中频的波形图相同，只是载波频率不同而已），图 (a) 是 $U_j > U_s$ 时的情况，图 (b) 是 $U_j < \frac{1}{2} U_s$ 时的情况。可以看出，此时正弦波干扰的影响，好象把脉冲信号掳起来，使之在正弦波的幅度上做随机的跳动。

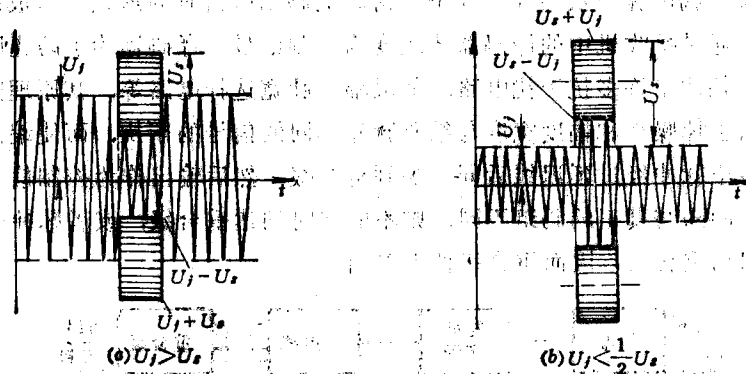


图7-3 正弦波干扰引起脉冲波形跳动

这种合成波经过检波器之后，就变成单边的视频信号，如图 7-4 所示。视频信号经过视放，加到 A 型显示器的波形如图 7-4 (c) 所示。由于此时滤除了直流，所以 $U_j > U_s$ 时为双极性跳动的脉冲，在时基线上下跳动， $U_j < U_s$ 时则只在时基线上边跳动。实际的脉冲信号是钟形的，所以在示波面上画的钟形脉冲。

脉冲波形跳动的结果，给雷达操纵员在显示器上发现目标增加了困难。因为，在正常情况下，即只有噪声时，在 A 型显示器上雷达操纵员可以根据雷达回波信号比噪声幅度高、回波信号比噪声明亮和利用时基线上的缺口等特点从噪声中分出回波来。但在正弦波干扰的情况下，检波后的噪声也变成双极性的，因此波形跳动只会增加起伏，不可能再用缺口等方法来发现回波。在 P 型显示器上，由于波形跳动的影响，使得信号的平均能量减小，

光点亮度减弱，也造成发现目标的困难，而且比A型显示器受干扰的影响要大。另外，由于波形跳动和双极性脉冲的交替出现，使用积累法反干扰的雷达增加了反干扰的困难。

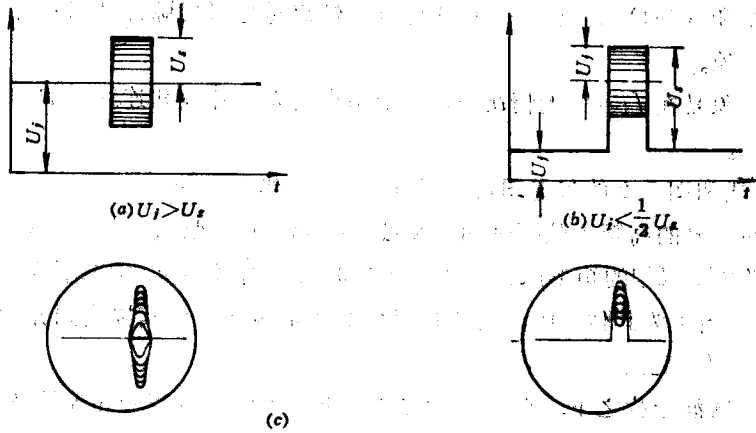


图7-4 视频脉冲波形跳动

正弦波干扰使脉冲信号产生波形跳动的现象，也是对脉冲编码系统的基本干扰之一。脉冲编码信号能够容纳很多指令信号并有很好的抗干扰性和保密性，因而广泛地用于制导及遥控系统。脉冲编码信号中，以脉位编码和密码编码最为常用，它们有着更多的优点，例如脉位编码，其码组中的脉冲个数是不变的，根据各脉冲的时间间隔不同而形成不同的码组。码组的最佳编码脉冲数为3~5个。密码编码则以密码的形式来形成码组。

脉冲编码要通过接收机中的译码器才能变为控制信号。译码器为了防止噪声或其他干扰信号的影响，采取了许多抗干扰电路，如限幅、脉宽选择电路等。其原理图如图7-5所示。这样，可以去掉噪声和幅度宽度与编码脉冲不同的信号的干扰，而使编码组中具有不同时间间隔的各个脉冲经过延迟线后同时加到重合级，然后输出作为控制信号。如果接收的信号，其脉冲间隔与真正的码组不同，则不能同时到达重合级；或者脉冲个数与码组的不同，都不能启动重合级，因而重合级便无输出。

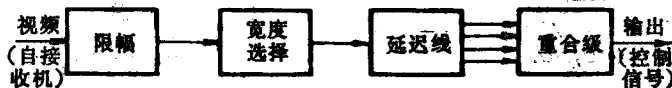


图7-5 译码器的原理组成

正弦波干扰对脉冲编码的干扰效果之一是使脉冲的幅值跳动。如果某一脉冲的幅值低于限幅电压，则整个码组便不能通过译码器，也就使这一码组失效。

设一个脉冲码组由 K 个脉冲组成，其中一个脉冲被干扰掉（低于限幅电平）的概率为 P_{10} ，则这个脉冲未被干扰掉的概率为 $(1 - P_{10})$ ，设码组中各脉冲被干扰掉的可能性是相互无关的，则 K 个脉冲都未被干扰掉的概率为 $(1 - P_{10})^K$ ，因此，整个码组被干扰掉（即码组中只要至少有一个脉冲被限幅掉）的概率为：

$$P_{K0} = [1 - (1 - P_{10})^K] \quad (7-9)$$

P_{10} 可由正弦波干扰和脉冲波的合成电压振幅的概率分布密度表示式求得。合成电压振幅 u ，即(7-4)式的振幅表示式中的 U_{Σ} 是 φ 的函数，其概率密度 $W(u)$ 可由下式

求得:

$$W(u) = W(\varphi) \frac{d\varphi}{du} \quad (7-10)$$

将 (7-4) 式写为 φ 的表示式, 则:

$$\varphi = \arccos \frac{u^2 - (U_j^2 + U_s^2)}{2U_j U_s}$$

φ 在 $0 \sim 2\pi$ 间均匀分布, 所以

$$W(\varphi) = \frac{1}{2\pi}$$

φ 为 u 的多值函数, 周期为 2π , 在 $0 \sim \pi$ 区间有

$$\frac{d\varphi_1}{du} = \frac{-2u}{\sqrt{4U_j^2 U_s^2 - [u^2 - (U_j^2 + U_s^2)]^2}}$$

因此可得:

$$W(u) = W(\varphi) \cdot 2 \left| \frac{d\varphi_1}{du} \right| = \frac{2u}{\pi \sqrt{4U_j^2 U_s^2 - [u^2 - (U_j^2 + U_s^2)]^2}} \quad (7-11)$$

由 (7-10) 式就可求得合成电压 u 小于译码器限幅电平 U_L 的概率为:

$$P_{10} = \int_{U_j - U_s}^{U_j + U_L} W(u) du \quad (7-12)$$

当 $U_j = U_s$ 时, 上式为:

$$\begin{aligned} P_{10} &= \int_0^{U_j + U_L} \frac{2udu}{\pi \sqrt{4U_j^2 - (u^2 - 2U_j^2)^2}} \\ &= \left[\frac{1}{\pi} \arcsin \frac{U_L^2 + 2U_L U_j - U_j^2}{2U_j^2} \right] + \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (7-13)$$

只要计算出 P_{10} , 就可由 (7-9) 式算得 K 联码组被压制掉的概率。

设译码器的限幅电平为 $U_L = 0.3U_s$, 对于三联码, 即 $K=3$, 在 $U_j = U_s$ 情况下, 一个码组被压制掉的概率可由上式求得 $P_{10} = 0.45$, 因而, $P_{30} = 1 - (1 - P_{10})^3 = 0.83$ 。可见, 正弦波干扰在频率瞄准 ($\omega_j \approx \omega_s$) 时的干扰概率是很高的。

(二) 干扰引起脉冲波形的失真

当 $f_j \approx f_s$ 时, 正弦波干扰和脉冲波的合成波包络就不再是矩形脉冲, 而是由两个正弦波进行差拍所形成的低频正弦包络的一部分, 如图 7-6 所示。如果是两个连续的正弦振荡相互作用, 即形成拍频现象, 其合成波就是包络呈低频的正弦变化的连续振荡, 包络的频率就是两正弦振荡频率之差, 称为拍频。对于正弦波与脉冲波, 则拍频现象只在脉冲宽度之内发生, 合成波的包络就只是拍频波形的一部分。图 7-6 所画的是拍频频率 $\delta f = |f_j - f_s| = 1/\tau$

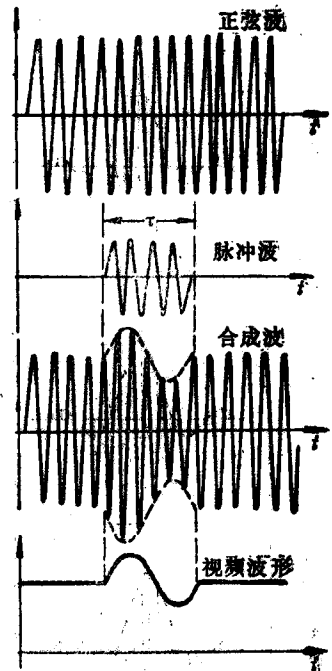


图 7-6 拍频现象引起脉冲波形失真

的情况，因而脉冲宽度内所“截取”的包络正好是拍频的一个周期。

根据 (7-8) 式，即 $U_j \gg U_s$ 时合成波的振幅表示式为：

$$U_{js} = U_j + U_s \cos \varphi$$

式中

$$\varphi = 2\pi(f_j - f_s)t + (\varphi_j - \varphi_s)$$

也可以说明合成波的振幅是在等幅的 U_j 上再叠加上一个余弦变化的量，其幅度等于 U_s ，其频率为 $|f_j - f_s| = \delta f$ ，即拍频频率。具体的波形还和拍频的初相角差 $\Delta\varphi = (\varphi_j - \varphi_s)$ 有关。 $\Delta\varphi$ 不同，表明合成波所截取的波形是拍频包络的不同部分。

正弦波干扰引起脉冲信号的波形失真和频谱变化如图 7-7 所示⁽¹⁾。图中只给出了干扰频率瞄准误差（即拍频频率） $\delta f = |f_j - f_s|$ 为 0 、 $1/2\tau$ 、 $1/\tau$ 和 $3/2\tau$ 等几个特定值时，初相角差 $\Delta\varphi$ 为零和 $-\pi/2$ 的几种情况。

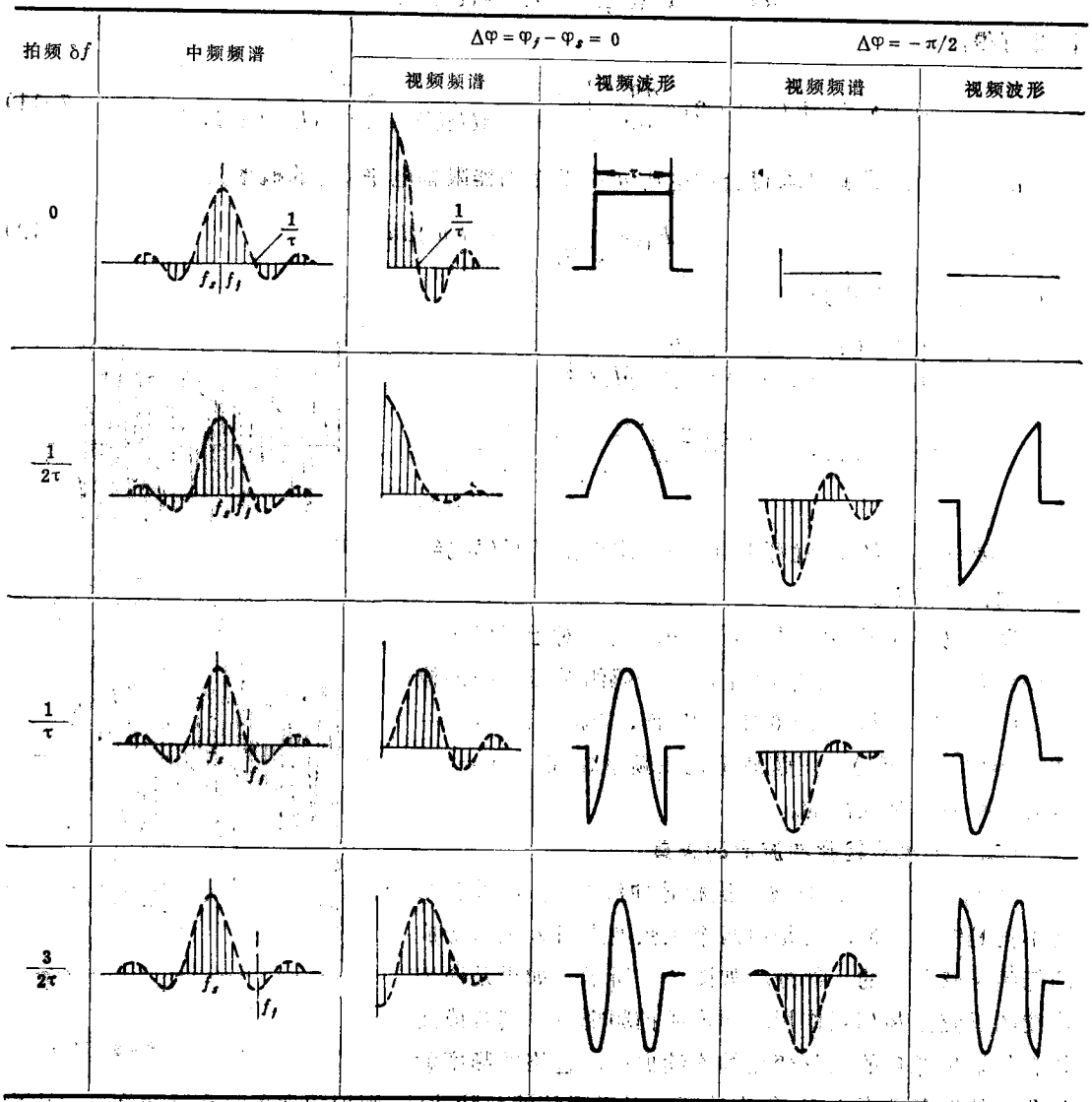


图7-7 正弦波干扰引起脉冲信号的波形失真和频谱变化

$\delta f = 0$ 时, 随着 $\Delta\varphi = \varphi_0 \rightarrow \varphi_0$ 为不同值, 视频信号为幅度不同的矩形脉冲。这就是上面所述的波形跳动的情况, 见图 7-4 所示。 $\Delta\varphi = 0$, 为正的脉冲, 幅值最大; $\Delta\varphi = \pi$, 为负的脉冲, 幅值也最大; $\Delta\varphi = \pm\pi/2$, 幅值为零; $\Delta\varphi$ 为其它值, 则脉冲幅值介于零和正、负最大幅值之间。

$\delta f = 1/2\tau$ 时, 则视频信号的波形为:

$$U_s \cos\left(\frac{\pi}{\tau} t + \Delta\varphi\right)$$

当 $\Delta\varphi = 0$ 时, $t = 0$, 幅度为 U_s ; $t = \pm\tau/2$, 幅度为零, 因而是半个余弦波; 当 $\Delta\varphi = -\pi/2$ 时, 视频波形则为正弦波。

可以看出, 随着 δf 的增大, 也就是干扰频率瞄准误差越大时, 引起的波形失真也越大。这种波形失真, 将完整的矩形脉冲变成以拍频率作正弦变化的波形, 在干扰电平的上下作双极性的变化。而且在波形失真的同时, 由于不同脉冲波与正弦波的相位差 $\Delta\varphi$ 是随机变化的, 波形也同样产生跳动现象。这种波形失真和跳动比矩形脉冲波形单纯地上下跳动对雷达发现目标造成的困难更大, 而且波形失真使雷达利用脉冲前沿测距增加了困难。

在图 7-7 中还画出了正弦波干扰引起的视频信号频谱的变化。这可以看成脉冲信号的中频频谱以干扰频率为轴摺叠后相加而成。对于 $\Delta\varphi = 0$, 频谱摺叠后各相应频率成分(即和干扰频率之间的频率差相等的成分)同相相加; 对于 $\Delta\varphi = -\pi/2$, 频谱摺叠后各相应频率成分相减, 即低于干扰频率的频谱成分反相后与高于干扰频率的相应成分相加。

根据傅里叶分析可知, 信号的波形和频谱(时间函数和频谱函数)对于规则信号是完全等效的, 其物理实质是相同的, 只是考虑的角度和处理方法不同而已。

二、强干扰对弱信号的压制作用

干扰和信号通过检波器(非线性元件)时, 存在着强干扰压制弱信号的现象。下面仍以正弦波干扰和脉冲信号通过线性检波器为例来加以说明。

设检波器的特性为:

$$i = \begin{cases} \beta u & u > 0 \\ 0 & u < 0 \end{cases} \quad (7-14)$$

式中 β 为检波特性的斜率, 为一常数。

检波器输入电压为中频的合成信号电压 $u_{js}(t)$, 则检波器输出的电流为:

$$i = \frac{\beta}{\pi} U_{js} \left[1 + \frac{\pi}{2} \sin \omega_j t - \sum_{n=2,4,\dots} \frac{2}{n^2-1} \cos n \omega_j t \right] \\ = I_0 + I_1 \sin \omega_j t + I_2 \cos 2 \omega_j t + \dots \quad (7-15)$$

式中 $I_0 = (\beta/\pi) U_{js}$, $I_1 = \frac{1}{2} \beta U_{js}$, \dots , 经滤波后从检波负载 R_d 输出的检波电压为:

$$U_d = I_0 R_d = \frac{\beta}{\pi} R_d U_{js} = K_d U_{js} \quad (7-16)$$

式中 K_d 为检波器的传输系数。

将(7-4)式代入上式, 则:

由于 $U_i \gg U_s$, 将上式展为级数, 并忽略高次项, 则有:

$$U_s = K_d U_i + K_d \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{U_s^2}{U_i} \right) + K_d U_s \cos \varphi \quad (7-17)$$

在脉冲信号之外, 只有干扰, 其电压为:

$$U_s = K_d U_i \quad (7-18)$$

上述结果说明, 在没有信号脉冲时, 检波后只有干扰产生的直流电压成分 $K_d U_i$, 当有信号脉冲时, 由于干扰的存在使信号成分只能在干扰引起的直流电压基础上形成一个直流分量 $\frac{1}{2} K_d (U_s^2 / U_i)$ 和一个脉冲分量 $K_d U_s \cos \varphi$ 。

如果和没受干扰时的情况作一比较就可看出: 未受干扰时, 检波后信号脉冲的幅度为 $K_d U_i$, 而受干扰时, 检波后信号脉冲的幅度为 $\frac{1}{2} K_d (U_s^2 / U_i) U_s$ 。也就是说, 在强干扰作用下, 检波后信号成分减小了 $\frac{1}{2} (U_s / U_i)$ 倍。干扰越强, 信号减小的倍数也越大。

(7-17) 式中的第三项, 是干扰引起的脉动成分, 也是脉冲信号能量的一部分。在强干扰条件下, 经过隔直流, 它们都是双极性的脉冲, 减弱了接收机对信号成分的接收。

从频谱角度来分析 (参看图 7-7), 由于 $\delta f \neq 0$, 在强干扰条件下, 将引起检波后信号频谱的偏移。在图中只画出了检波后频谱变化了的形状, 并没有考虑这种变化了的频谱将受到视放带宽的限制而造成信号能量的减弱。通常雷达视放带宽取为 $\frac{1}{2} \Delta f \approx \frac{1}{2\tau}$, 所以只有在这一带宽之内的能量才能通过视放进入显示器。

三、强干扰造成接收机的过载

强干扰引起接收机过载是各种压制性干扰普遍具有的干扰效果。

大家知道, 雷达接收机的灵敏度是很高的, 但它只对比较微弱的信号才能线性的放大, 信号过强它就不能正常放大甚至产生过载现象。实际上, 任何接收机和显示器都有其一定的动态范围, 所以也都有一个使其过载的干扰信号强度。

接收机的过载可能是视放过载、中放过载, 很强的干扰也可使高放过载。通常中放过载的可能性大。接收机的过载用其输出输入特性 ($U_o \sim U_i$ 特性) 来表示, 如图 7-8 所示, U_i 为接收机的输入信号, U_o 为接收机的输出信号。当接收机过载时, 就不能得到有用信号的输出, 此时即使信号比较大, 也不能观察到目标信号。图中说明, 当干扰很强使接收机过载时, 信号脉冲已被挤得很小了。干扰再强, 就根本没有信号输出了。

雷达接收机的视放末级常常采用限幅放大级, 用来对强脉冲进行限幅, 以免造成显示器过亮。这时, 在强干扰下, 跳动的脉冲信号就会被完全削掉, 如图 7-9 所示。因此, 有限幅放大级的雷达接收机最易在强干扰情况下丢失信号。

接收机过载时, 因为视放无信号输出, 故在 A 型显示器上, 只剩下一条时基线, 连接接收机的内部噪声也被抑制掉了, 这时的画面如图 7-10(a) 所示。P 型显示器上, 将在很宽的被打亮的干扰扇面中心出现一个黑暗的扇形区, 在它上面什么信号也没有, 甚至距离刻度环也被抑制掉了, 其画面如图 7-10(b) 所示。