

脉冲多普勒雷达

毛士艺 张瑞生 许伟武
李少洪 苗楠 朱谷川

编著

国防工业出版社

73.463

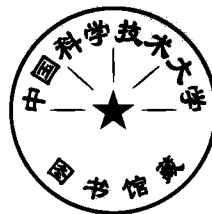
145

1

9649/15

脉冲多普勒雷达

毛士艺 张瑞生 许伟武
李少洪 苗楠 朱谷川 编著



国防工业出版社

1014123

内 容 简 介

本书是一本介绍“脉冲多普勒雷达”的专著。它综合了二十多年来国内外有关论述脉冲多普勒雷达的原理、技术与应用等方面的主要文献；介绍了信号处理、数据处理、低旁瓣天线、高稳定信号源、多普勒杂波、模糊度函数与波形设计、距离性能和应用实例等内容。本书可供从事雷达工程的科技人员，高等院校高年级学生、研究生和教师参考。

脉 冲 多 普 勒 雷 达

毛士艺 张瑞生 许伟武 编著
李少洪 苗楠 朱谷川

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张25¹/₂ 594千字

1990年2月第一版 1990年2月第一次印刷 印数：0,001—1,065册

ISBN 7-118-00267-4/TN50 定价：13.00元

前 言

在航空、防空、大气遥感等领域逐渐广泛应用与发展的脉冲多普勒雷达是一种先进的全相参制的脉冲雷达。脉冲多普勒雷达包含了连续波雷达和脉冲雷达两方面的优点。它通常工作在一组较高的脉冲重复频率上,并采用主振放大链型的信号源和距离门-窄带滤波器链的信号处理器。因此在性能上、设计思想上,它与采用磁控管功率源、延迟线对消器的动目标显示是根本不同的。它具有较高的速度分辨能力,从而可以更有效地解决抑制极强的地杂波干扰问题。此外,脉冲多普勒雷达能够同时敏感地测定距离、速度信息;能够利用多普勒处理技术实现高分辨率的合成孔径图像。

脉冲多普勒雷达的应用与发展是雷达理论与技术发展,特别是新型电子器件和数字信号处理技术发展的结果;是战略战术任务、目标环境变化,以及下视、下射、反低空突防任务的迫切需要。为了获得优良的抑制严重地杂波干扰的性能,对脉冲多普勒雷达信号源的稳定性、寄生调制提出了极高的要求,对其天线旁瓣电平提出了甚严的限制。同时还要求具有高运算能力和大存储空间的处理机。一部实际的脉冲多普勒雷达几乎包含了现代雷达的主要波形、测角体制和先进的数字信号处理技术;采用了各种现代优化的设计思想。因此,研制脉冲多普勒雷达是一个较为艰巨的工作。

在五十年代后期出现了脉冲多普勒雷达之后,人们在六十年代研制了适用于机载的样机并开始批量装备飞机。七十年代是脉冲多普勒雷达在技术上有重要突破的年代,在此期间研制和成批生产了各种型号的脉冲多普勒雷达。目前脉冲多普勒技术已广泛地应用于机载预警雷达、机载和地面火力控制雷达、超视距雷达和气象雷达之中。

根据我们多年来有关脉冲多普勒雷达的文献收集工作和部分研究工作,编写了这本专著。全书共分概论、脉冲多普勒杂波、模糊度函数与波形设计、信号处理、数据处理、距离性能、高稳定度信号源、低旁瓣天线、脉冲多普勒雷达的实例等九章。本书在由张瑞生编写第一、二稿的基础上,由毛士艺主持编写第三稿。在第三稿中,许伟武编写第一、七、八、九章,张瑞生编写第二章,李少洪编写第三、六章,苗楠编写第四章,朱谷川编写第五章。最后,由毛士艺和张瑞生统一审阅全书。

在编写本书的过程中,曾经得到林茂庸、孙种豪两位教授的指导以及聂大同、杨兴洲、董树人、陈小林等同志的帮助,特此向他们表示致谢。

由于水平所限,该书中难免有些错误或不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 概论	1	§ 3.1 模糊函数的定义和主要性质	59
§ 1.1 历史的回顾	1	3.1.1 模糊函数的定义	59
§ 1.2 非相参到相参是雷达技术的飞跃	2	3.1.2 模糊函数的意义和应用	63
§ 1.3 多普勒效应	3	3.1.3 模糊函数的基本性质	66
§ 1.4 连续波雷达	4	3.1.4 模糊函数的适用条件与推广	70
§ 1.5 动目标显示(MTI)雷达	7	§ 3.2 PD雷达中的可用信号	
§ 1.6 脉冲多普勒(PD)雷达信号	8	及其模糊函数	71
1.6.1 单色信号	8	3.2.1 模糊函数在PD雷达中的物理意义	72
1.6.2 PD雷达的发射信号	10	3.2.2 PD雷达对信号的要求	72
1.6.3 PD雷达的回波信号	11	3.2.3 相参脉冲串信号	74
1.6.4 机载PD雷达的回波信号	11	3.2.4 线性调频脉冲信号	82
§ 1.7 PD雷达的定义	14	3.2.5 伪随机序列	86
§ 1.8 PD雷达系统概述	16	§ 3.3 PD雷达中的几个波形设计问题	90
1.8.1 主振放大式相参发射机	16	3.3.1 PD雷达的波形设计考虑	90
1.8.2 低旁瓣天线	17	3.3.2 PD雷达脉冲重复频率的选择	94
1.8.3 主杂波抑制	18	参考文献	99
1.8.4 高度杂波抑制	19	第四章 PD雷达的信号处理	100
1.8.5 单边带滤波器	19	§ 4.1 PD雷达信号处理的基本问题和	
1.8.6 信号处理机	20	基本方法	100
1.8.7 数据处理机	22	§ 4.2 典型信号的处理方法	104
§ 1.9 动目标检测(MTD)雷达	23	4.2.1 匹配滤波理论概要	104
§ 1.10 PD雷达的应用现状	25	4.2.2 相参脉冲串信号的处理	106
1.10.1 气象探测	25	4.2.3 线性调频信号的处理	111
1.10.2 陆基防空	26	4.2.4 巴克码信号的处理	114
1.10.3 机载预警	27	§ 4.3 数字处理技术	117
1.10.4 机载火控	29	4.3.1 离散傅里叶变换(DFT)和快速傅	
参考文献	30	里叶变换(FFT)	118
第二章 脉冲多普勒杂波	31	4.3.2 PD雷达信号的数字处理	133
§ 2.1 地面杂波的分析及其频谱	31	4.3.3 可编程程序数字信号处理机	144
2.1.1 地面杂波的分析	32	§ 4.4 CCD/SAW 处理技术	147
2.1.2 地面杂波的频谱	35	4.4.1 CCD的原理与主要特性	147
§ 2.2 PD雷达杂波的杂波方程、		4.4.2 SAW器件的原理与主要特性	149
数学模型和杂波模型	36	4.4.3 采用CCD/SAW的PD雷达信号	
2.2.1 杂波方程	37	处理系统	150
2.2.2 地面杂波的数学模型	46	§ 4.5 CFAR 处理技术	163
2.2.3 杂波模型	48	4.5.1 杂波的统计特性	163
§ 2.3 用计算机计算机载PD雷达的		4.5.2 参量法CFAR处理技术	165
地面杂波	49	4.5.3 非参量法CFAR处理技术	168
2.3.1 需要用程序解决的计算问题	49	4.5.4 自动检测技术	173
2.3.2 程序的概述和它的独特性能	53	§ 4.6 多普勒补偿技术	175
2.3.3 程序验证	55	§ 4.7 高分辨力处理和多普勒	
参考文献	58	波束锐化	179
第三章 模糊函数和 PD 雷达		4.7.1 高分辨力处理	180
波形设计问题	59	4.7.2 多普勒波束锐化和聚束式地图测绘	190
		§ 4.8 气象PD雷达的信号处理	196
		参考文献	201

第五章 PD 雷达的数据处理	203
§ 5.1 脉冲多普勒雷达数据的提取	203
5.1.1 单目标跟踪系统	203
5.1.2 四维分辨系统	207
5.1.3 多目标跟踪系统	210
§ 5.2 测距和测速模糊的解算	211
5.2.1 测距和测速模糊的基本概念	211
5.2.2 测距模糊的解算	212
5.2.3 测速模糊的解算	220
5.2.4 用多重脉冲重复频率方法消除遮挡	221
§ 5.3 数据处理的数学方法	223
5.3.1 滤波、平滑和预测	223
5.3.2 最小二乘法	224
5.3.3 不变量嵌入方法	229
5.3.4 常增益滤波方法	235
5.3.5 离散时间的卡尔曼滤波	238
5.3.6 雷达中的非线性滤波问题	244
§ 5.4 机载四坐标卡尔曼滤波跟踪系统	247
5.4.1 滤波的数学模型	248
5.4.2 天线控制和伺服系统	252
5.4.3 距离和速度跟踪系统	256
5.4.4 最佳距离-速度互耦跟踪	257
§ 5.5 多目标跟踪系统	259
5.5.1 边扫描边跟踪体制	260
5.5.2 杂波环境下的跟踪算法	261
5.5.3 最佳跟踪滤波器	264
5.5.4 密集目标环境下的多目标跟踪	266
5.5.5 极大似然互联算法	269
5.5.6 机载雷达中的坐标变换	273
参考文献	274
第六章 PD 雷达的距离性能	277
§ 6.1 PD 雷达的距离方程	277
6.1.1 PD 雷达的工作特点	277
6.1.2 PD 雷达的距离方程	279
6.1.3 PD 雷达的平均距离性能	280
6.1.4 PD 雷达与常规脉冲雷达距离性能的比较	283
6.1.5 中脉冲重复频率 PD 雷达的距离性能	284
§ 6.2 PD 雷达的发现概率	284
6.2.1 常规脉冲雷达的检测概率	285
6.2.2 PD 雷达的发现概率	288
参考文献	293
第七章 高稳定度低噪声相参发射机	294
§ 7.1 引言	294
§ 7.2 微波信号源的噪声和频率稳定度	294
7.2.1 调幅噪声	295
7.2.2 调频噪声	296

7.2.3 一般情况	298
7.2.4 频率稳定度	298
§ 7.3 PD 雷达对信号频稳度的要求	299
§ 7.4 几种微波信号源	303
7.4.1 晶振-放大-倍频系统	303
7.4.2 雪崩二极管微波源	305
7.4.3 耿氏二极管微波源	306
7.4.4 注入锁相微波源	308
7.4.5 锁相环微波源	310
7.4.6 几种微波源的性能比较	311
§ 7.5 频率综合器	313
7.5.1 直接综合法	313
7.5.2 间接综合法	314
§ 7.6 微波信号的功率放大	316
7.6.1 概述	316
7.6.2 正交场微波管(M型)	317
7.6.3 线性注微波管(O型)	318
7.6.4 行波管	321
7.6.5 微波功率放大器件的失真和噪声	331
参考文献	334
第八章 高效率低旁瓣天线	335
§ 8.1 引言	335
8.1.1 高效率低旁瓣天线对现代雷达的一般意义	335
8.1.2 高效率低旁瓣天线对PD雷达的特殊意义	337
§ 8.2 反射器天线	339
8.2.1 反射器天线的基本特性	339
8.2.2 反射器天线的馈源	341
8.2.3 反射器天线的综述	351
§ 8.3 平面隙缝阵天线	361
8.3.1 隙缝天线的基本特性	362
8.3.2 平面隙缝阵天线的口径分布函数	367
8.3.3 波导隙缝阵天线的设计原则	375
参考文献	376
第九章 PD 雷达体制的应用实例	378
§ 9.1 预警系统	378
9.1.1 战术特点	378
9.1.2 技术特点	380
9.1.3 雷达的工作方式	382
9.1.4 雷达的组成	383
9.1.5 雷达的主要参数	384
§ 9.2 机载火控雷达	384
9.2.1 火控雷达 I	384
9.2.2 火控雷达 II	391
§ 9.3 气象PD 雷达	395
9.3.1 气象雷达的现状及其发展趋势	395
9.3.2 气象 PD 雷达举例	396
参考文献	401

第一章 概 论

§ 1.1 历史的回顾

在本书的开篇，首先回顾一下雷达的发展历史是必要而有益的。

雷达作为一种装备开始效益于人类是本世纪三十年代的事。但对其原理的发现和探讨，至少要追溯到上世纪末。

赫兹于1886年首先验证了电磁波的发生、接收和散射。1922年马可尼说了下面一段对研究雷达历史非常有意义的话：“正如赫兹第一个所证明的那样，电磁波能够被导体所反射。在我所做的一些试验中，我也注意到了这种反射效应，并在金属物体几英里之外，检测到了这些电磁波。看来可以设计一种装置，把它装在舰船上，向任一所需方向上发射电磁波，如果碰到金属物体，就会被反射到发射船上，被一个与发射机隔开的接收机所接收，以表明另一舰船的存在，并进而确定其位置。”这段话相当完整地描述了雷达的概念。虽然粗浅，但是确有卓识远见。同年美国海军试验室的 A. H. 泰勒和 L. C. 杨用一部波长为 5 m 的连续波试验装置，探测到了一只木船，当时因缺乏适用的天线收发双工开关和有效的隔离方法，装置的收发机是分置的，实际上这是一个双基地雷达。有趣的是六十年以后的今天，双基地雷达技术又重新唤起了人们的重视，借以摆脱雷达在电子战环境中的困境。1925年美国霍普金斯大学的 G. 伯瑞特和 M. 杜威第一次在阴极射线管的荧光屏上观测到了从电离层反射回来的短波窄脉冲回波。进入三十年代，很多国家都在致力于探测飞机和舰船的脉冲雷达的研究工作。1934年美国海军试验室的 R. M. 佩奇第一次拍下了从飞机反射回来的电磁脉冲的照片。1935年英国人用一部 12MHz 的雷达探测到了 60km 外的轰炸机。1938年由美国信号公司(Signal Corp)开始制造了第一部 SCR-268防空火力控制雷达，以后陆续生产了近3000部。该雷达频率为 200MHz，探测距离达 180km。同年出现了第一部实用的舰载雷达 XAF，装在美国战舰“纽约”号上，它对海面船只的探测距离为 20km，对飞机为 160km。次年，即 1939 年，英国在一架飞机上装了一部 200MHz 的雷达，用以搜索入侵飞机。当时英国在研制厘米波的功率发生器件方面居于领先地位，于三十年代末期首先制造出了能产生 3000MHz、1 kW 功率的磁控管。高功率厘米波器件的出现，大大促进了雷达技术的发展。1941年 12 月 9 日日本偷袭珍珠港，美国海军遭受重大损失，第二次世界大战以此为起点。事实上，那时美国已生产了近 100 部 SCR-270/271 警戒雷达，其中一部就架设在火奴鲁鲁，用来监视日本对珍珠港的入侵，不幸的是那天美国指挥官误把荧光屏上日本飞机的回波当成了自己飞机的回波。

由于战争的需要，当时交战双方都集中了巨大的人力、物力和财力来发展这门新兴技术，到了战争末期，雷达已在陆海空三军中得到了广泛的应用，被誉为“战争的眼睛”和“二次大战的天之骄子”。这时雷达不仅能在各种复杂气象条件下，发现远在几百公里以外的入侵飞机和舰队，而且能精确地测定它们的位置。不仅如此，这时雷达已经进入

了控制领域，火炮射击和飞机轰炸都要借助雷达进行瞄准控制。曾经有过这样的统计，二次大战初期，高射炮平均消耗5000发炮弹才能击落一架飞机；而大战末期，虽然飞机性能更好，但用雷达控制的高炮，用装了无线电引信的炮弹进行射击，平均只用50发炮弹即可击落一架飞机，命中率提高了100倍。战争期间雷达在飞机上的应用也取得了很大的进展。1941年末，美国麻省理工学院辐射实验室和海军制定了第一部用于舰载战斗机的X波段雷达的基本战术技术性能指标。研制工作分为两部分进行：第一部分是AIA夜间战斗机雷达，由西屋公司负责；第二部分是ASD搜索雷达，由斯佩里公司负责。前者即为AN/APS-6的前身，1944年装备部队，成为美海军当时制式夜间战斗机装备，一直成功地用到战争结束，它是一部具有搜索和跟踪功能的雷达。后者，即ASD计划是AN/APS-3的前身，1943年装备部队，装载于多种巡逻机和轰炸机上。

战后美国聚集了众多为发展雷达技术做出贡献的科学家和工程师们，从理论和技术实践方面进行了极有价值的总结工作，其成果就是1947年以麻省理工学院名义出版的雷达丛书，共28册。这部丛书不仅是经验的总结，而且成为雷达技术的经典著作，直到三十多年后的今天，还在发挥着重大作用。

战争中发展起来的雷达技术，战后更加扩展了它的应用领域，加快了前进的步伐。在航空、航天、航海、导弹、气象探测、资源调查、遥感、测绘和农业等国民经济的很多领域，雷达都在发挥着重要作用。雷达不仅有显赫的历史，更有辉煌的前程。它从只能探查目标的存在，到能测定目标的位置、速度，甚至其形状和位置；从只能在无干扰的环境中工作，到能在严重的自然干扰（地物、海浪和气象杂波）和人为干扰的恶劣环境中发现小尺寸的固定目标或是高速运动目标；从只能分辨地形地物的粗浅轮廓，到能给出接近光学摄影那样精细的高分辨率地图；从只能探测几公里的近处，到能探测38万公里的月球或是更遥远的星际空间；……。

雷达性能的提高和完善是同雷达技术的迅速进步分不开的。脉冲压缩技术使雷达可以用宽脉冲波形发射，在不增加脉冲重复频率的情况下，可以增大雷达的平均功率，提高雷达的作用距离，而同时又使雷达仍能保持窄脉冲系统的距离分辨力。相控阵技术的出现从根本上解决了天线的机械惯性对波束扫描速度的限制，并使雷达能够实现同时以多种方式工作。综合孔径技术可以极大地改善雷达的角度分辨力，以小口径尺寸天线的雷达获得大口径尺寸天线的雷达才能达到的分辨力，使雷达图象几乎象光学照片那样清晰，而却又不象光学照象那样受云雨雾等气象条件的影响，这种技术目前已广泛应用于航空和航天，如军用侦察、资源勘测、农业产量预测和遥感等许多方面。

脉冲多普勒技术目前已广泛应用于空中预警和防空系统，它使雷达能在极为恶劣的地物、海浪和云雨等强杂波背景中有效地发现运动目标；在气象探测中它可以精确测定云雨的运动速度，显示台风和龙卷风的强度和运动状态。本书就是对脉冲多普勒技术的原理和应用进行论述的一本专著。

§ 1.2 非相参到相参是雷达技术的飞跃

“相参”即英文的“Coherent”，国内不少文献中也称之为“相干”。它是一个从光学领域中引伸而来的术语。在雷达中的含义是指目标回波信号与发射信号之间应保持严格的相位关系，并用以提取目标的有关信息。

早期的普通脉冲雷达都是非相参系统，它们只是利用发射脉冲与回波脉冲的时间差提取目标的距离信息。当在与目标相等距离上，存在着大量的干扰物体的反射波（地物和海浪杂波、云雨气象杂波以及投放物金属箔条杂波等）时，微弱的目标回波淹没其中，而使雷达失效。在军事上，作战双方愈来愈多地利用雷达的这个弱点。五十年代攻击飞机所广泛运用的高空高速突防方式，六十年代以后已逐渐被低空高速突防方式所代替。大地和海浪杂波为进攻飞机提供了隐蔽和安全的保证。直到目前，美国的B-52G/H改型、FB-111、A-6E和研制中的B-1B，苏联的图-26“逆火”、苏-24和米格-27等进攻性飞机都是以低空突防为其主要作战方式。为保证低空飞行安全，都装有地形跟踪或地形回避雷达^[10]。

现代巡航导弹的出现，使低空突防能力更趋完善。这种导弹的射程从几百公里到数千公里。导弹可以从陆上、海上或水下发射，也可以从轰炸机或是经过改装的运输机上发射，使空中突防任务由飞机移交给巡航导弹来完成。导弹载机于对方防空系统作用范围外投放导弹后，即可返航。巡航导弹体积小（雷达截面积仅为战斗机的几分之一或更小），飞行高度低（几十米到几百米），因此雷达发现这种导弹比低空突防的飞机更为困难^[11]。

非相参的普通脉冲体制的雷达，无论架设在地面、舰船或是飞机上都无法对付这些来自低空的袭击。雷达工程师们很快地想到了相参技术，这是一个在声学，光学中早已为人们熟知的物理概念，此刻却为雷达技术带来了生机。当用时间差无法区分目标与背景干扰时，而用速度差却可轻易地把它们区分开来。对于地面架设的雷达，与周围地物不存在相对运动，因此从这些地物来的雷达回波信号的频率与反射信号的频率相同；而从运动目标来的回波信号频率，则有别于发射信号，而且这种差别的大小正比于目标的速度。对于机载雷达，地物背景与雷达虽然存在着相对运动，但这种相对运动的速度和方向是可知的，并有别于机载雷达和空中运动目标的相对速度。以雷达载机同运动目标和地物的速度差为基础发现运动目标的技术途径（即通过对发射信号和回波信号的频率相位差检测运动目标，滤除背景干扰）是可行的。但要具体实现这种发射信号和回波信号的有效相参并不十分容易。它要求发射信号具有很高的稳定性，否则微小的回波频率变化是无法觉察的。一般使用磁控管振荡器的脉冲雷达，在不使用隔离器的情况下，由于振荡器与负载直接耦合，频率受其牵引，再加上其它各种不稳定因素，通常频稳度只有 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。以10000MHz载频为例，其变化可达几兆赫，当然脉冲之间的频率变化远小于此值，不过要检测出只有几百到几千赫的目标回波频率的变化仍然是非常困难的。所以要实现相参就必须改进发射机。主振放大式发射机就是当前广泛用来获得高功率、高稳定的发射信号的主要设备。它由高频晶体主振器、倍频器和功率放大器三部分组成。尽管比单级振荡器发射机复杂的多，成本也高，但这是雷达实现全相参所必须的。雷达实现了全相参，它的性能和应用领域才有可能大为扩展。相参不仅是脉冲多普勒雷达，动目标显示和检测雷达，而且也是脉冲压缩雷达和综合孔径雷达等各种先进体制雷达赖以实现的基础。

§ 1.3 多普勒效应

很多物理学文献中都对多普勒效应作了完整的叙述。它是由奥地利物理学家多普勒

于十九世纪在声学领域中首先发现的。当观测者向着声源运动时，他收到的声波频率高于他在静止时收到的声波频率；当观测者远离声源而去时，他收到的声波频率低于他在静止时收到的声波频率。显然当声源运动，而观测者静止时，也会产生同样的效应。这就是众所周知的多普勒效应。

对于雷达而言，当雷达与目标之间存在相对运动时，多普勒效应体现在回波信号的频率与发射信号的频率不相等。雷达发射电磁波信号后并遇到一个朝着雷达运动的目标时，由于多普勒效应，从这个目标返回的电磁波信号的频率将高于雷达的发射频率。由于运动目标对电磁波的散射作用，目标再发出的电磁波频率同它当时收到的电磁波频率相同。因此，雷达发射信号在雷达与目标之间往返传播之后，雷达收到的是更高频率的电磁波信号。

雷达发射信号与回波信号的相位变化：

$$\varphi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} 2R(t) \quad (1-1)$$

式中 $R(t)$ 表示雷达与目标相对运动时，它是随时间变化的单程距离； λ 为雷达信号波长。当运动目标以速度 v 向着静止的雷达作匀速运动时，则 $R(t) = Vt$ 。于是式 (1-1) 可写成

$$\varphi(t) = 2\pi \frac{2V}{\lambda} t = 2\pi f_d t \quad (1-2)$$

式中 $f_d = \frac{2V}{\lambda}$ ，这就是由运动目标产生的多普勒频移。当雷达信号波长一定时，多普勒频移正比于目标与雷达之间的相对速度。

利用目标与雷达之间相对运动而产生的多普勒效应进行目标信息提取和处理的雷达叫做多普勒雷达。如果这种雷达发射的是连续的射频信号，则称之为连续波多普勒雷达，简称为连续波雷达；如果发射的是脉冲调制的射频信号，则称之为脉冲多普勒雷达，简称为PD雷达。

§ 1.4 连续波雷达^{[1][2]}

连续波雷达的发射信号是连续的射频正弦振荡信号，借助于回波信号所产生的多普勒频移，探测与雷达台有相对运动的目标，并测定其径向速度。

连续波雷达是相参雷达中技术最简单的一种。它具有很多明显的优点：

(1) 设备简单，不需要发射机调制器，单谱线的接收和发射使得信号处理电路也很简单。

(2) 发射功率通常比脉冲雷达的峰值功率低，因此可以更多采用固态器件，功率击穿问题大为减少。

(3) 测速简便、准确，不存在速度模糊。

(4) 由于单谱线工作，占用频带极窄，因此既不易被侦察，也不易受人为或自然杂波干扰。

但连续波雷达的明显缺点也限制了这种系统的发展：

(1) 不能取得目标的距离信息，为得到距离信息必须施加某种调制。这样必然展

宽了信号频谱，削弱了连续波雷达所固有的一些优点。

(2) 发射机信号和噪声向接收机的泄漏，严重地阻碍了连续波雷达的实际应用。如果发射机发射纯连续波信号，不伴随有任何寄生的噪声调制，泄漏问题易于处理，用抵消发射频率和扩大接收机的动态范围即可消除泄漏的影响。不幸的是发射机的信号总是伴随有噪声，通常的解决办法是使收发天线分离，以增加收发之间的去耦。

纯连续波雷达的实际应用不多，除在一些炮弹和导弹的引信中采用外，目前应用最多的还是雷达寻的制导导弹⁽⁸⁾。在这种应用中，通常把连续波雷达发射机装在地面、舰上或战斗机上，而接收机装在导弹上。发射的电磁波照到目标，并被散射后，由装在导弹前面的天线所接收，而装在导弹尾部的喇叭天线接收由连续波发射机直射过来的照射波。对前后两个信号相参检波，所形成的频谱中包含有多普勒频移的目标信号。此多普勒频移近似正比于导弹接近目标的速度。导弹接收机中的窄带频率跟踪器搜索这一频谱，并截获目标的多普勒频率，提取目标速度信息。以地面为基地的半主动连续波制导系统的多普勒关系示于图1-1。

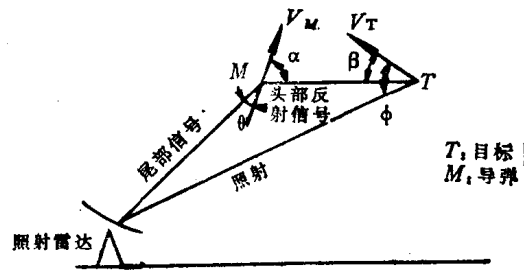


图1-1 半主动连续波制导的几何关系

以地面为基地的半主动连续波制导系统的多普勒关系示于图1-1。

$$f_{a尾} = -\frac{f_0}{c} V_M \cos \theta \quad (1-3)$$

$$f_{a头} = \frac{f_0}{c} (V_T \cos \phi + V_T \cos \beta + V_M \cos \alpha) \quad (1-4)$$

$$f_a = f_{a头} - f_{a尾} = \frac{f_0}{c} (V_M \cos \theta + V_M \cos \alpha + V_T \cos \phi + V_T \cos \beta) \quad (1-5)$$

式中 $f_{a尾}$ ——导弹尾部接收的发射信号的多普勒频移；

$f_{a头}$ ——导弹头部接收的发射信号的多普勒频移；

V_M ——导弹速度；

V_T ——目标速度；

θ , β , α 和 ϕ 各角如图1-1所示。

导弹和目标的接近速度；

$$V_c = V_M \cos \alpha + V_T \cos \beta \quad (1-6)$$

在迎头攻击情况下 α 、 β 、 θ 和 ϕ 都等于零，因此

$$V_c = V_M + V_T \quad (1-7)$$

由式(1-5)得

$$f_a = \frac{f_0}{c} 2V_c \quad (1-8)$$

令 $f_0 = 10,000\text{MHz}$, $c = 3 \times 10^8\text{m/s}$

得 $f_a \approx 66V_c$ (1-9)

式(1-9)说明导弹与目标迎头飞行时，1m/s的相对速度约引起载频有66Hz的多普勒频移。这对3cm波段雷达大致估算多普勒频移是方便的。

对舰载或机载的照射器而言，一个附加分量——照射器本身的速度——必须考虑。

它对杂波频谱有展宽作用。图 1-2 示出了照射器静止（地对空）和运动（空对空）两种情况时的杂波和信号频谱。

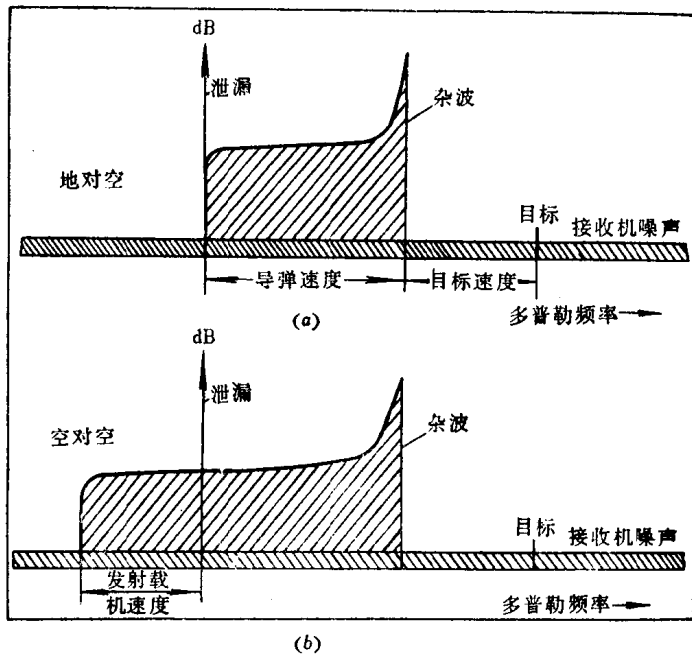


图1-2 杂波和信号频谱
(a) 地对空；(b) 空对空。

用于半主动系统导弹导头的连续波雷达简化框图示于图 1-3。它由尾部接收机、头部接收机、信号处理装置和控制头部天线运动的伺服回路组成。尾部接收机的用途是为头部接收的目标信号提供一个相参基准。由头部天线来的目标信号经混频变成中频，并

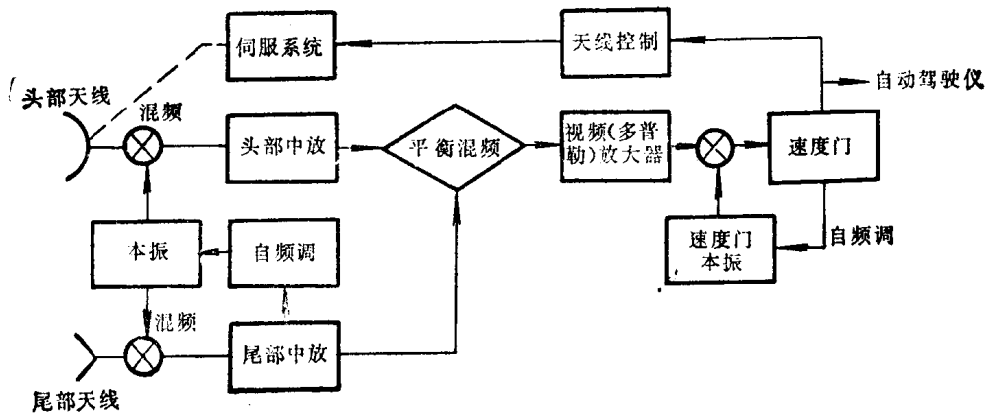


图1-3 连续波半主动导引雷达框图

在宽带中放中放大，而后在相参检波器中与尾部接收机来的中频信号实现相参检波，得到多普勒信号。由视频放大器放大多普勒信号，视放带宽按多普勒频率设计范围选择。放大的多普勒信号与速度门本振差拍，在窄带速度门内跟踪信号（亦称多普勒跟踪）。目标的截获是由速度门本振在多普勒频率范围内的扫频实现的。实质上就是移动速度门的

频率窗来检验频谱。当信号频率进入窗内，扫频停止，跟踪开始，并向导弹自动驾驶仪提供制导信息。

连续波相参雷达在机载多普勒导航系统中也得到了较为广泛的应用。它利用多普勒效应测量载机相对于地面的运动速度（地速和偏流）。采用连续波的信号波形，导航雷达的收发系统比较简单。发射机产生并通过天线向地面发射频率稳定度很高的单频等幅连续波信号 f_0 ，同时接收由地面反射回来的信号，它是包含有飞机运动信息的信号 $f_0 + f_d$ 。在接收机混频器中，接收信号与由发射机直接耦合过来的基准信号进行混频，就可以得到包含飞机运动信息的多普勒频率 f_d 。

最简单的连续波多普勒雷达中采用“零中频”接收机。其混频器输出的差频信号是以 f_d 为中心的低频多普勒频谱信号。因此在接收机中不需要中频放大器，而只采用一般的低频放大器，将信号放大后送往频率跟踪器。这种接收机的优点是比较简单，但它的缺点是在多普勒频率范围内（0~20kHz），噪声电平比较高。这种噪声主要来自晶体混频器本身。此外，设备和元器件的机械振动也会在上述频率范围内产生噪声。另外，由于噪声谱密度的不均匀性，会使多普勒信号频谱分布变得不对称，给所测量的地速带来误差。因此，“零中频”接收机仅应用在要求不高的多普勒导航雷达中。

为了消除低频噪声对接收机灵敏度的影响，可以采用两次变频的超外差式接收机。在这种接收机中，接收信号和本振信号先进行一次混频，取出位于中频频段的差频信号，使差频（多普勒频率）在中频频段上被放大。由于中频频率通常选择为几兆到几十兆赫，因而避开了低频噪声对多普勒信号谱的影响，提高了接收机的灵敏度和测量精度。

连续波多普勒导航雷达的主要缺点是接收机受发射机直漏信号及邻近物体反射的影响大。当直漏信号过大时，可能损坏混频晶体，至少也会给接收机带来附加噪声，从而降低了接收机灵敏度和增加了测量误差。一般说来，发射机产生的振荡不是一个纯正弦波。由于杂散效应、发射机及其零部件的振动、电源电压的起伏等原因，引起振荡信号的幅度、频率和相位的随机变化，因而，发射信号的频谱中的这些噪声分量必然加到接收机的输入端，增加了接收系统总的噪声电平。其次，发射信号从位于天线的临近物体（如天线罩、飞机机体、发动机工作引起的空气涡流和云雨等）反射以后，直接进入接收机。若天线与邻近物体有相对位移或振动时，进入接收机的信号受到随机调制，这也会使接收系统总的噪声电平增加。这种邻近物体的反射信号还可能形成另外的频率分量，使频率跟踪器错误跟踪，产生很大的测量误差。

为了减小上述影响，连续波多普勒雷达采用收发分离天线，使收发通道之间有足够高的隔离度（通常为70~90dB）。显然，当该隔离度确定后，直漏信号和邻近物体反射信号的功率与发射信号功率成正比关系，而与飞行高度无关。但是从地面反射回来的信号功率与飞行高度的平方成反比关系，这样就限制了雷达的最大使用高度。

连续波多普勒雷达的优点是设备简单，不需要调制，没有高度死区，起始高度可为零。由于发射信号是未经调制的单一频率，雷达所接收的有用信号功率都集中在载频附近，因而它的功率利用系数相对于其它信号波形的多普勒雷达而言是最高的。

§ 1.5 动目标显示(MTI)雷达^[10]

动目标显示雷达亦称为 MTI 雷达，MTI 即是英文 Moving Target Indication 的缩

写。这是一种利用运动目标回波信号的多普勒频移来消除固定目标回波的干扰,而使运动目标得以检测和显示的脉冲雷达系统。当雷达辐射的高频脉冲能量被各种地形地物等固定物体和飞机等运动物体反射时,由于前者回波信号相对于发射信号的相位差是固定的,而后者的回波信号相对于发射信号的相位差是变化的,于是经相位检波后,固定目标视频信号的幅度不变,而活动目标视频信号的幅度按多普勒频率的余弦关系变化,把视频信号延时一个重复周期后,和未延时信号加以对消,就可以消除固定目标而只选择活动目标。

MTI 雷达技术在二次大战后发展很快,并取得了极为广泛的应用,中、外已有很多专著论述^{[11][12]}。

在很多情况下,固定目标所形成的杂波背景十分严重,仅靠 MTI 技术尚不能有效地抑制杂波和实现对目标的检测。通常 MTI 雷达的信杂比改善只有 20~30dB,经过改进的数字式 MTI 雷达可达 30~40dB。对于某些情况,如在复杂地形上空工作的机载雷达,如欲俯视发现低空飞行目标,则至少应有 50dB 或更大的信杂比改善,才能发现目标。因此,必须在 MTI 对消的基础上进一步滤除剩余的背景杂波,这就是 PD 雷达的任务。PD 雷达是一种比 MTI 雷达具有更好的抑制固定目标能力,技术更为复杂的相参体制的雷达。

§ 1.6 脉冲多普勒(PD)雷达信号

本书是有关脉冲多普勒雷达的专著,以后各章将就这种雷达的原理、特性、实现方法和有关系统进行详细论述。但在概论中首先浅析一下 PD 雷达信号是必要的,因为它是认识和掌握 PD 雷达技术的基础。

1.6.1 单色信号

假定雷达发射机发射的信号是单色的:

$$u_1(t) = U_1 \cos \varphi_1 = U_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1-10)$$

式中 U_1 为信号幅度; φ_1 为信号瞬时高频相位; ω_0 为信号角频率; φ_0 为信号初始相位。

发射信号遇到目标,被其反射后的回波信号为

$$u_2(t) = U_2 \cos \varphi_2 = U_2 \cos[\omega_0(t - \tau) + \varphi_0 + \varphi_r] \quad (1-11)$$

式中 U_2 为回波信号幅度; φ_2 为回波信号瞬时高频相位; φ_r 为电磁波被目标反射时的初始相位; τ 为回波信号相对发射信号的延迟时间,它可表示为

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (1-12)$$

其中 R 为雷达到目标的距离; c 为光速。

以下就两种类型的目标进行讨论。

一、与雷达无相对运动的目标

发射信号与回波信号的高频相差为

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\omega_0 \tau + \varphi_r = \text{常数} \quad (1-13)$$

二、与雷达有相对运动的目标

由于目标与雷达之间有相对运动 V_r ，所以目标与雷达之间的距离是时间的函数：

$$R = R_0 - V_r t \quad (1-14)$$

式中 R_0 为发现目标时的初始距离。将式 (1-14) 代入式 (1-12) 得

$$\tau = \frac{2(R_0 - V_r t)}{c} \quad (1-15)$$

这时发射信号与目标回波信号的高频相差为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \varphi_2 - \varphi_1 = -\omega_0 \tau + \varphi_r = -\omega_0 \frac{2(R_0 - V_r t)}{c} + \varphi_r \\ &= -\frac{2V_r}{c} \omega_0 t + \frac{2R_0}{c} \omega_0 + \varphi_r \end{aligned} \quad (1-16)$$

由式 (1-16) 知，相差 $\Delta\varphi$ 是时间的函数。将式 (1-15) 代入式 (1-11) 并求导，即可得到回波信号的角频率：

$$\omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_0 + \frac{2V_r}{c} \omega_0 \quad (1-17)$$

式 (1-17) 可以写成

$$f_2 - f_0 = \frac{2V_r}{c} f_0 = \frac{2V_r}{\lambda} \quad (1-18)$$

式中 $f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi}$ ， $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ ， $\lambda = \frac{c}{f_0}$ 。

令 $f_d = f_2 - f_0$ ，则式 (1-18) 可以变成

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} \quad (1-19)$$

显然 f_d 即是由目标与雷达之间相对运动所形成的多普勒频率。它在数量上等于发射信号与收到的回波信号的频率差。

以 Hz 为单位表示 f_d ，m/s 为单位表示 V_r ，cm 为单位表示波长 λ ，则式 (1-19) 改写成

$$f_d = 200 \frac{V_r}{\lambda} \quad (1-20)$$

以式 (1-20) 作出曲线，如图 1-4 所示。该图示出不同雷达波长，不同的目标与雷达之

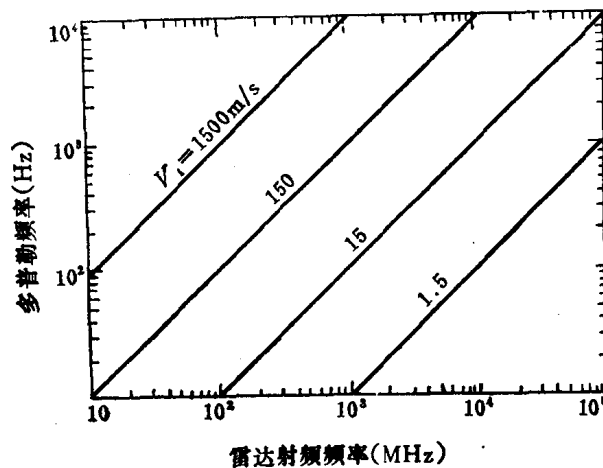


图1-4 多普勒频率与雷达波长和相对速度的关系

间的相对速度，雷达回波信号与发射信号之间所产生的多普勒频移。

1.6.2 PD 雷达的发射信号

PD 雷达信号发生的简化方框图如图 1-5 所示。它由射频振荡器，功率放大器及脉冲形成器组成。振荡器以连续波形式激励功率放大器。该放大器受脉冲形成器所产生的脉冲来控制。因此放大器输出的是一串射频脉冲。其中每个射频脉冲都是从高稳定连续正弦波中截取下来的，具有很好的相参性，而不象磁控管那样，每个射频脉冲的起始相位都是随机的。上述相参射频脉冲串，可以用傅里叶变换求出它的频谱。显然单色信号（即连续波振荡信号）的频谱为单根谱线，而射频脉冲串的频谱则是由一族离散谱线所组成。以下分别叙述脉冲列以不同方式截取高稳定连续射频信号的频谱^[4]。

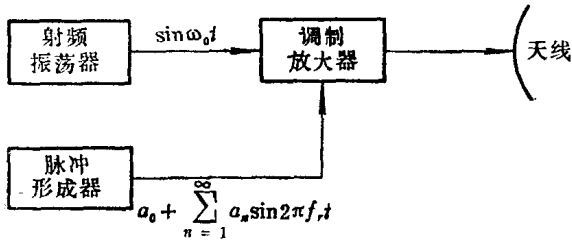


图1-5 PD雷达信号发生的简化方框图

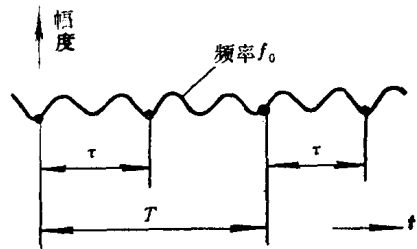


图1-6 脉冲列截取连续射频信号方式之一

(1) 截取方式如图 1-6 和图 1-7 所示。每隔 T 秒从频率为 f_0 的稳定正弦信号中截取持续时间为 τ 的射频脉冲，形成发射信号。这类射频脉冲串的频谱示于图 1-8。由图可知最大幅度谱线均位于射频频率 f_0 。两者的区别在于图 1-6 波形的最大谱线位置 f_0 是谱线间隔的整倍数。

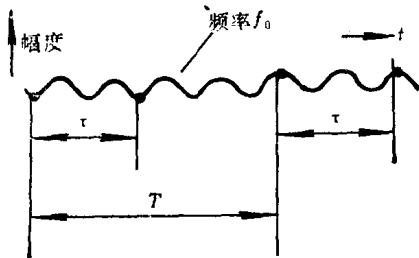


图1-7 脉冲列截取连续射频信号方式之二

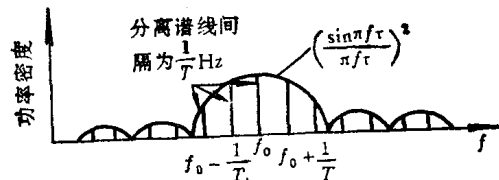


图1-8 用图1-6和图1-7截取方式的射频脉冲列所对应的频谱

(2) 截取方式如图 1-9 所示。每隔 T 秒发射一段持续时间为 τ ，频率为 f_0 的正弦信号。每一个射频脉冲的起始相位仍然相同，但脉冲重复周期 T 不是射频正弦振荡的整数倍。这种时间波形所对应的频谱如图 1-10 所示。其包络形状仍为 $(\frac{\sin \pi f \tau}{\pi f \tau})^2$ ，但最大幅度谱线位于最接近 f_0 的 $\frac{1}{T}$ 整倍数处。

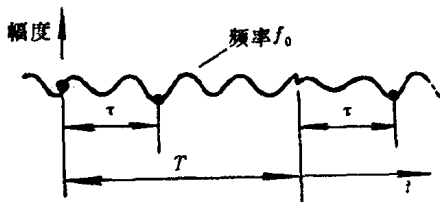


图1-9 脉冲列截取连续波射频信号方式之三

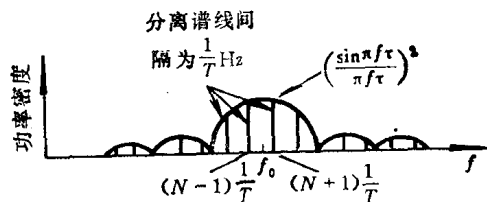


图1-10 用图1-9截取方式的射频脉冲列的频谱

(3) 在一般磁控管发射机中，每个射频脉冲的起始相位是随机的，其相应的频谱

示于图 1-11。频谱包络仍为 $\left(\frac{\sin \pi f \tau}{\pi f \tau}\right)^2$ 形式，但频谱已由一根根分离谱线变成连续频谱。

第一、二种截取方式的时间波形是在 PD 雷达中所采用的全相参波形。

第三种截取方式各脉冲的相位是确定的，而脉冲之间的相位是随机的，雷达接收机的本地振荡器可以补偿这个脉间变化的相位角，这项技术有时称为接收相参，在二次大战期间及以后的若干年内都使用过，当时多以非相参的磁控管作为发射管。这种方法有两个主要缺点：能获得的相参度不高，并只限于低 PRF 使用。

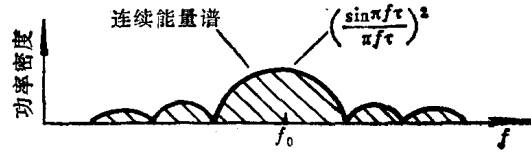


图1-11 一般磁控管的射频脉冲列所对应的频谱

对一般磁控管发射信号，速度分辨力极低，它已经不是相参波形。

1.6.3 PD 雷达的回波信号

第四章将详细说明第一种相参脉冲串是 PD 雷达的一种优良的信号波形。对于同雷达台无相对运动的目标回波，其频谱无异于发射脉冲串的频谱；对于同雷达台有相对运动的目标回波，其频谱将不同于发射脉冲串的频谱，每一根谱线都移动了多普勒频率 f_d ，如图 1-12 所示。

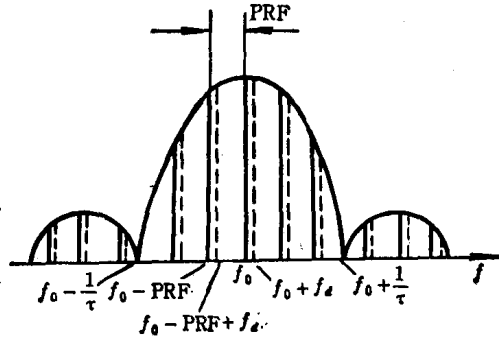


图1-12 目标与雷达存在相对运动时发射信号与回波信号的频谱

1.6.4 机载 PD 雷达的回波信号^[6]

机载雷达是脉冲多普勒体制应用的最为广泛和重要的领域。同时，机载条件下的回波信号频谱结构也最为复杂。由于载机的运动，所以不运动的地物和一些固定目标的回波信号也都产生多普勒频移。这时要想有效地检测空中或地面运动目标，要比地面雷达困难得多。

假如载机水平飞行，地速为 V_R ，雷达天线主波束下俯角为 ψ ，则典型的空中运动目标和地形地物等固定目标的回波频谱如图 1-13 所示。通常 PD 雷达只利用频谱中主谱线 f_c 以及附近区域提取目标信号，如图 1-14 所示。现就主谱线结构和有关物理意义进行具体分析。