

机载脉冲 多普勒雷达

(美)G.V.莫里斯 等著

航空工业出版社



73.463
614
2

DG49/16

机载脉冲多普勒雷达

[美] G.V.莫里斯 等著

季 节 许伟武 等译



航空工业出版社

1990

1014430

内 容 简 介

本书是80年代阐述机载脉冲多普勒雷达技术最系统、最清晰、最具体实用的一本专著。内容包括五个部分(共18章),分述基本原理、三种脉冲重复频率模式、各种信号处理功能、噪声与杂波环境中性能的预测以及有关各阶段试验中的问题。本书不但在机载脉冲多普勒技术的理论方面可供参考,在具体的设计技术方面也可借鉴。全书概念清晰、论述严谨、文字简洁、图文并茂,可供从事雷达,特别是机载脉冲多普勒雷达研究、研制、使用和教学的有关科技人员和高等院校有关专业的师生参考。

译 校 人 员

季 节 许伟武 陈小林
石媛珍 潘心德 高逊之
赵生云 江琳兴 蔡涤泉

机载脉冲多普勒雷达

【美】 G.V.莫里斯 等著

季 节 许伟武 等译

航空工业出版社出版发行

(北京市和平里小关东里14号)

一邮政编码:100029—

全国各地新华书店经售

北京市通县向阳印刷厂印刷

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

187×1092毫米 1/16 印张:16.625

印数:1—2000 字数:406千字

ISBN 7-80046-301-X/V·063

定价:10.00元

译 序

1988年版《机载脉冲多普勒雷达》一书的翻译出版无疑有助于我国机载脉冲多普勒雷达的研制工作。因此，航空航天工业部机载设备总公司积极支持并资助；中国雷华电子技术研究所出资并组织翻译；航空工业出版社也抓紧编辑出版印制等工作，使本书能以最快速度与读者见面。

这本书是迄今为止阐述机载脉冲多普勒雷达基本技术的最系统、最清晰、最具体实用的一本专著。它概括了到1988年上半年为止美国国内外的有关研究成果，主编本人又是多年在休斯飞机公司从事这一体制雷达研制工作的专家，因此，这本书的内容不但在该雷达体制的理论分析上可供参考，在具体的设计技术方面也可以借鉴。当然，本书内容也并非完美无缺。与这一体制有关的关键部件的特殊技术（例如低旁瓣天线、低噪声稳定信号源、可编程处理机和显示技术等）均未详细阐述；与这一体制有关的一些兼容技术（例如单脉冲通道合并、数据总线、机内自检和电磁兼容性等）以及雷达测量精度的分析更未论及；而且由于该书是由讲稿改写而成，仓促之中不但编删及排版、印刷方面存在一些差错，内容与文词方面也有需更改之处。本书译校者本着对读者负责的态度尽力予以更正并加以标注。其它地方无论在用词与语气上尽量忠于原文，以便读者能直接理解原著的含意。

这本书由中国雷华电子技术研究所组织一批本行专家翻译与校对。各章译校者如下：

第1至5章均由陈小林译，季节校；

第6、10、11章由赵生云译，石媛珍、季节校；

第7、8章由潘心德译，高逊之校；

第9、12章由高逊之译，潘心德校；

第13章由季节译，蔡涤泉校；

第14、15章由石媛珍译，季节、蔡涤泉校；

第16、17章由江琳兴译，石媛珍校；

第18章由潘心德译，季节校；

原著前言、附录均由石媛珍译，季节校；并摘译作者简介附于译序之后。

全书经季节总技术校对后由许伟武作最后的精校。书中插图很多，均由张秀琴精心描绘。本书的筹资与出版受到中国雷华电子技术研究所所长的大力支持，特此谨致谢意。

由于译校者水平有限，书中差错在所难免，欢迎读者批评指正。



译校者
1990年4月

作者简介

G.V.莫里斯(G.V.Morris)毕业于南加利福尼亚大学电机系，获硕士学位。先后在休斯飞机公司、北美菲利普公司以及摩托罗拉公司任职。作为设计工程师，他从事过信号处理方面的工作；作为系统工程主管工程师，他参加了几部主要新型雷达研制与修改计划的执行工作，后任工程经理。1984年他成为佐治亚理工学院的一员。目前他是高级研究工程师和进修课程导师。

前 言

本书根据佐治亚理工学院开设的一门进修课的讲稿整理编撰。该课程的任课教师除作者本人外还有学院中的同事们以及顾问们。

本书第一部分阐述脉冲多普勒雷达的基本原理。为了简明起见，尽量避免繁琐的数学推导。第二部分介绍高、中、低脉冲重复频率三种模式及各自的优缺点。第三部分讲解有关多普勒滤波、脉冲压缩、跟踪、合成孔径、中脉冲重复频率的选择，以及解距离模糊等主要的信号处理功能，最后列举一部假想但实用的多工作方式机载雷达信号处理机作为例子。第四部分说明如何预测脉冲多普勒雷达在噪声与杂波环境中的性能。第五部分简要讨论有关试验的问题。

G. V. 莫里斯

英文缩写词汇

AEW	机载预警
AI	机载截击
AGC	自动增益控制
BT	带宽时间乘积
CFAR	恒定虚警率
COHO	相参振荡器
CRT	阴极射线管
CW	连续波
DAGC	数字自动增益控制
DFT	离散傅里叶变换
DBS	多普勒波束锐化
ECCM	电子抗干扰
FFT	快速傅里叶变换
HPRF	高脉冲重复频率
I	同相分量
IFF	敌我识别
LO	本机振荡器
LPRF	低脉冲重复频率
MPRF	中脉冲重复频率
MTI	动目标显示
PRF	脉冲重复频率
PRI	脉冲重复周期间隔
PSP	可编程信号处理(机)
Q	正交分量
RCS	雷达横截面积
SAR	合成孔径雷达
SNR	信噪比
STALO	稳定本机振荡器
STC	灵敏度时间控制
TWS	边扫描边跟踪
VCO	压控振荡器

目 录

英文缩写词汇	(IV)
第一部分 基本原理(各章作者均为G.V.莫里斯)	
第1章 脉冲多普勒雷达原理.....	(3)
第2章 平台运动对杂波的影响.....	(12)
第3章 脉冲波形的频谱特性.....	(19)
第二部分 各种工作模式(各章作者均为G.V.莫里斯)	
第4章 低脉冲重复频率模式.....	(29)
第5章 高脉冲重复频率模式.....	(37)
第6章 中脉冲重复频率模式.....	(45)
第三部分 信号处理(除另有标明的第8、9、13章外,作者均为G.V.莫里斯)	
第7章 多普勒滤波.....	(55)
第8章 脉冲多普勒雷达系统中的脉冲压缩(作者: M.N.科恩)	(65)
第9章 合成孔径处理(作者: M.A.理查兹)	(84)
第10章 中脉冲重复频率的检测能力和距离的模糊分辨	(101)
第11章 中脉冲重复频率各值的选择	(108)
第12章 跟踪技术	(115)
第13章 信号处理机综合举例(作者: J.M.伯鲁姆).....	(135)
第四部分 性能预测(各章作者均为小M.L.贝尔彻)	
第14章 机载雷达的目标检测	(163)
第15章 杂波对检测性能的影响	(183)
第16章 目标起伏的影响	(199)
第17章 自动检测	(212)
第五部分 其它题目	
第18章 系统试验(作者: G.V.莫里斯).....	(227)
附 录	
附录A 距离-多普勒盲区图的计算机程序.....	(237)
附录B 中脉冲重复频率杂波图计算机程序	(245)
主要术语英汉对照	(251)

第一部分 基本原理

第一章 脉冲多普勒雷达原理

“多普勒雷达”一词指的是能够测量发射频率和所接收的从物体反射的频率间偏移的雷达。多普勒雷达最常用于区分所需目标的回波和不需要的背景回波(通常为地杂波)。本章介绍脉冲多普勒的基本原理,但不依靠过多的数学论述。雷达专业人员所需的方程式将在后续几章中详细论述。原理论述将从采用连续波(CW)发射和接收的最简单的固定多普勒雷达开始,然后逐步深入到较为复杂的脉冲波形雷达。讨论的题目包括:

1. 脉冲多普勒雷达的类型;
2. 术语的定义;
3. 固定CW雷达的频谱和波形;
4. 固定脉冲多普勒雷达的频谱和波形。

1.1 多普勒雷达的类型

图 1.1 给出了多普勒雷达的各种类型。每种雷达在性能上都有很大差别。最佳选择取决于对雷达的使用要求。许多雷达要在相当大的条件范围内使用,单一雷达类型是不能满足要

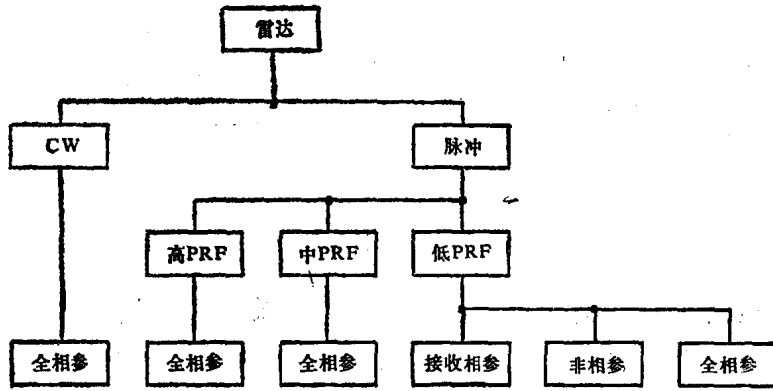


图1.1 雷达的类型

求的。许多现代雷达是多种工作方式的,也就是说,它们能起到图 1.1 中所示的两种或两种以上雷达的作用。

CW 雷达,顾名思义,发射和接收连续波。图 1.2 给出一个简化的方框图。为了防止接收机灵敏度降低,要求发射和接收天线分开,并有足够的隔离度。由于不容易达到

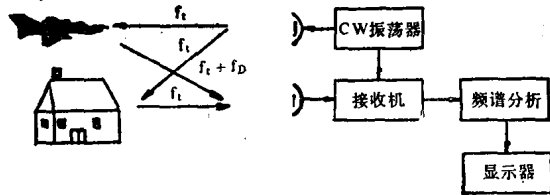


图1.2 CW 雷达方框图

所需的天线隔离度，CW雷达不用于机载监视。对接收信号的频谱分析可提供地面回波与运动目标间的鉴别，并可对目标速度进行不模糊测量。

低脉冲重复频率雷达定义为脉冲重复频率(PRF)足够低，可不模糊地测量距离的雷达。在下一个脉冲发射之前的脉间周期中，发射脉冲要能传播到所需的最大距离并从那里返回。不模糊距离 R_u 由下式算出

$$R_u = \frac{c}{2PRF} \quad (1.1)$$

其中 c =光速。

低和中PRF之间的分界线没有一个特定的数字，而在某种程度上依赖于应用。一部典型的机载雷达的PRF可能为1000赫，其不模糊距离为150千米(80海里)。低PRF多普勒雷达一般不能不模糊地测量速度(即多普勒频移)。

高PRF雷达定义为其PRF足够高，能对所有感兴趣的目标速度都不模糊地测量的雷达。可以不模糊地测量的最大多普勒频移由下式给出

$$f_{dmax} = PRF = \frac{2fv_{max}}{c} \quad (1.2)$$

式中 f =发射频率。

一部在2马赫速度的飞机上工作的典型的X波段(9吉赫)雷达的PRF可能为250千赫，以便确保对一个同样的高速目标进行探测和不模糊地测量其速度。从(1.1)式我们可以看到，对应的不模糊距离仅为600米(2000英尺)。因此，一个在150千米(80海里)距离上的目标是距离高度模糊的。

中PRF雷达定义为其PRF使距离和多普勒二者都产生模糊的雷达。中PRF雷达看起来像是综合了高和低PRF雷达二者的缺点。但是，在第6章我们将阐明，中PRF往往是机载雷达的最佳波形选择。

1.2 定义

上面我们已未经定义而引用了几个在雷达技术中常用的术语。下面我们对应用于雷达的这些术语进行定义，因为，它们在其它学科中并不总是准确地表示同样的内容。

1.2.1 多普勒频移

多普勒频移是发射的射频载波和从运动物体反射的回波之间频率的偏移。这种频率偏移是在Christian Johann Doppler(1803~1853年，他最先预告了这种现象)之后命名的。在图1.3中，地面上的观察者接收到的频率 f_1 ，据相对论预测可由下式给出

$$f_1 = f \frac{c+v}{\sqrt{c^2-v^2}} \quad (1.3)$$

式中 f = 发射频率；

v = 飞机速度在观察者方向上的分量；

c = 光速。

多普勒频移定义为 $f_d = f_1 - f$ ，根据飞机速度与光速相比很小这一事实，方程 (1.3) 简化为

$$f_d = \frac{fv}{c} \quad (1.4)$$

地面的反射可视为频率 f_1 的再辐射。方程 (1.3) 或很准确的近似方程 (1.4) 可用于计算飞机上观察到的多普勒频移。观察到的总多普勒频移量为单程频移的两倍，由常见的公式给出

$$f_d = \frac{2fv}{c} = \frac{2v}{\lambda} \quad (1.5)$$

式中 $f\lambda = c$;

λ = 波长。

多普勒频移可由对雷达应用可能更为有益的其它方式给出。假设一个目标距离为 R ，往返距离为 $2R$ ，发射和接收波间的总相位差由下式给出

$$\phi = -2\pi \left(\frac{2R}{\lambda} \right) \quad (1.6)$$

其中负号表示相位滞后。利用频率的定义，

$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{d\phi}{dt} \right) \quad (1.7)$$

从雷达来看，一个距离变化的目标所产生的频率的变化(即多普勒频移)可由下式给出

$$f_d = -\frac{2}{\lambda} \left(\frac{dR}{dt} \right) = \frac{2v}{\lambda} \quad (1.8)$$

1.2.2 变换到零中频

方程 (1.8) 表明，多普勒频移将是负的，也就是说，如果目标在接近 (dR/dt 为负值) 则频率更高，如果目标离开则相反。区分接近和离开(拉开)目标的能力在机载雷达中往往是一个很有价值的属性。绝大多数雷达不直接在射频(RF)进行发射波和接收波间的频率比较，而是将接收信号下变频至适当的中频(IF)。在现代雷达中提供频谱分析功能的最普遍的方法是快速傅里叶变换(FFT)数字信号处理。接收频谱被变换得使其零多普勒频移对应于零频(基带)。另一种选择是机载雷达常见的，将主瓣杂波对应的频率变换到零频。这将在第 2 章中讨论。

图 1.4 所示的下变频法可保持对接近和离开目标的鉴别。图 1.5 对具有同样速度量值的离开和接近目标的视频的同相(I)和正交(Q)分量进行了比较。注意 Q 分量的相位反转。一个 I/Q 对表示一个复数采样。一系列复数采样的频谱分析用复数 FFT 来实现。在所得频谱中，离开和接近的目标明显出现在不同的位置。

有些简单雷达是单通道的，只提取一个分量，例如 I 分量，一系列单路(或“实数”)采样由

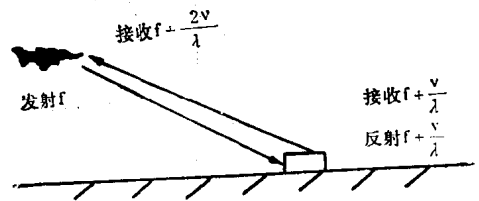


图 1.3 观察到的多普勒频移

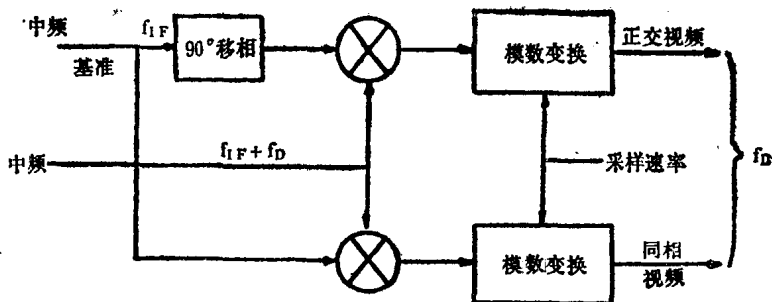


图1.4 变换到零中频

“实数”FFT进行分析，在其所得频谱中离开目标和接近目标便不能区分。

1.2.3 脉冲雷达中的多普勒模糊和盲速

方程(1.8)说明任何的目标速度量值都可以测量。但是，众所周知的尼奎斯特准则指出：正确地获取信号的频率成分所需要s的最小采样频率等于信号带宽的2倍。对于脉冲雷达，采样频率是PRF。(一个进行采样和使用数字频谱分析的CW雷达也服从于相同的采样原则。)上面谈到的那种简单的单通道雷达在每个脉冲重复间隔(PRI)上提取一个采样，因此在一个不模糊频率间隔上所能测量的多普勒频移等于PRF/2。每个PRI提取两个采样(即I和Q采样)的雷达有效采样率为2倍PRF，因而可提供等于PRF的不模糊频率间隔。

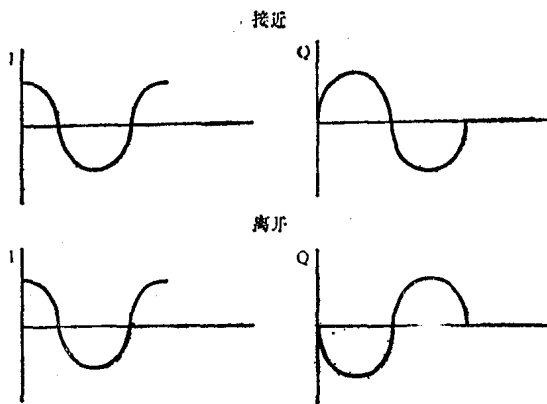


图1.5 离开和接近目标的波形

方程(1.6)表明发射和接收波形间总的相位滞后。脉冲(即采样)间的相位变化是

$$\Delta\phi = 2\pi\left(\frac{2\Delta R}{\lambda}\right) \quad (1.9)$$

式中 ΔR =脉冲间的距离变化。如果脉冲间的频率变化小于 2π ，则多普勒频率可以不模糊地测量。如果相位变化等于 2π ，那么多普勒频率等于PRF。显然偏移 2π 不能与偏移 2π 的任何整数倍(包括0)相区分。产生多普勒偏移为 2π 的整数倍的速度在历史上被称为盲速，因为在零频率上出现大的地面回波时能阻止对所需目标的检测。如果相位变化大于 2π ，目标通常可被检测，但所观察到的多普勒频移不能准确地表达目标速度。观察到的多普勒频率将会差PRF的整数倍。多PRF被用于消除盲速和解决模糊目标速度测量问题。

脉冲雷达观测到的多普勒频移可以用方程(1.8)的修改式更准确地表示，它读为：

$$f_d = \left(\frac{2v}{\lambda}\right) \text{模PRF} \quad (1.10)$$

1.2.4 快速傅里叶变换

许多现代雷达是在一个采用FFT的数字信号处理机中进行频谱分析。第七章将详细地

说明为什么FFT比其它数字频谱分析方法更快。在这里只要了解一些较重要的特性(而不作详细的数学研究)就足够了。采用FFT是因为它是一个比其它傅里叶变换算法要求更少的倍乘次数的有效数字式频谱分析法。为实施FFT已研制出几种不同的软件和硬件结构, 每种都有其优缺点。

FFT的输入是一个 2^m 个时间采样的序列, 这里 m 是整数。输出是代表频谱的 2^m 个复数(即具有I和Q分量)。其输出等效于一组覆盖了从0到PRF频率范围的均匀间隔滤波器, 如图1.6所示。频率间隔等于 $PRF/2^m$ 。如果输入由复数采样组成, 则从0到PRF的整个频率范围是不模糊的。如果输入取样是实数, 则不模糊区为 $PRF/2$ 。滤波器的高频半段是低频半段的复数共轭, 不含另外的信息。由于这个原因, 有些使用实数数据输出的FFT算法仅有一半滤波器。

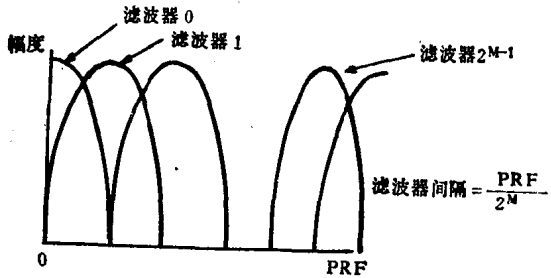


图1.6 快速傅里叶变换

因为多普勒滤波器的数目只与时间采样的数目有关, 因此, 如果为了消除盲速或解多普勒模糊而使PRF变化, 则滤波器的带宽和频率间隔也会自动调整。因此, 即使多普勒频移是不模糊的, PRF改变时目标回波也可能从一个滤波器移到另一个滤波器。

1.2.5 相参

相参发射脉冲从脉冲到脉冲具有相位连续性, 就像它们是从一个连续RF信号上选通出的几个部分, 如图1.7所示。事实上, 相参脉冲常常是先产生低电平连续RF信号, 然后经一级或多级脉冲放大处理, 如图1.8所示。与此相反, 由脉冲振荡器(例如磁控管)产生的脉冲串与CW基准对比, 则具有随机的起始相位, 称为非相参。(已为低PRF雷达研制了几种采用非相参发射而在接收机产生相参脉冲串的方法, 这些技术称作“接收相参”。)在文献中常用MOPA(主振功率放大器)这个术语来描述一个包含低电平连续波振荡器和脉冲功率放大器的雷达发射机。往往用“全相参”这个术语来阐述具有MOPA发射机的雷达。

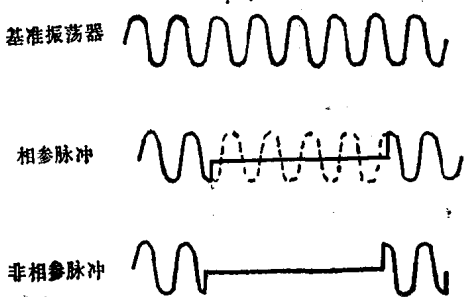


图1.7 相参

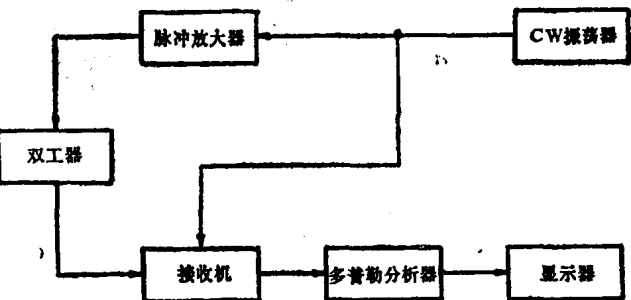


图1.8 全相参脉冲多普勒雷达

发射相参脉冲串的主要好处是可对回波脉冲序列进行多普勒分析。与IF带宽相比, 多普勒分析带宽很小, 因此这种处理会使信噪比改善。然而, 最主要的优点是能区分相当小的速度差别。第7章会给出更严格和更科学的论述, 但下面这个启发性例子会有助于说明这

一点。滤波器(包括多普勒滤波器和各种FFT)是谐振电路。当输入频率与滤波器的自然谐振频率相同时,其输出最大。设想推动一个睡在吊床上的小孩,吊床是一种摆动体(它代表一个调谐电路),如果推动的时间(即相位)得当,一系列的微小推力就会使吊床大幅度摆动;相反,推的时间不对,则会减小摆幅。这种摆动的模拟很像一系列相参脉冲作用在一个用于进行多普勒分析的谐振电路上。

1.3 固定式CW雷达的频谱和波形

固定式CW雷达的理想时间波形示于图1.9。固定目标的回波是发射波形经延迟了的复制品,频率与发射波相同。如果它本身能观察运动目标回波,那么它可能会像所示的那样。特意将运动目标回波画得比固定回波小得多,因为在多普勒雷达的应用中通常情况都是这样。运动目标回波在频率上相对发射波有偏移。但是,如果我们用我们假想的频率比多普勒频移(如30兆赫)高得多的示波器观察微波载频或中频,则这种频率差别是觉察不到的。总的回波信号是固定(杂波)和运动目标回波的和。由于信杂比低,总信号与固定目标回波相似,只是看上去稍有畸变。

将接收信号进行频谱分析,得出如图1.10所示的频谱。比固定目标小得多(例如-60分贝,或0.001的幅度比)的运动目标在频谱显示中可以被发现,然而在时间波形中显示是不可能的。

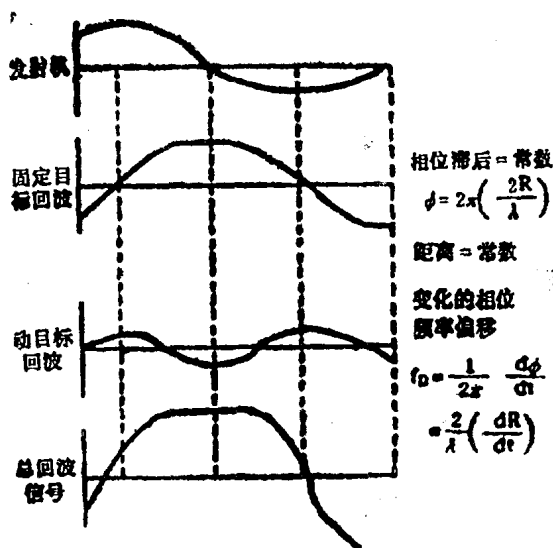


图1.9 CW时间波形

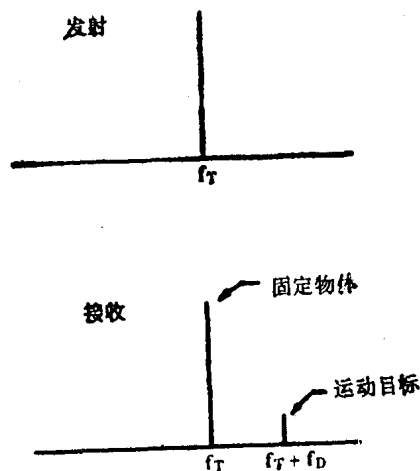


图1.10 CW频谱

1.4 固定式高PRF雷达的波形和频谱

高PRF发射波形是一列有RF载频的相参脉冲,如图1.11所示。典型的发射机占空因子为0.3至0.5,但也可能采用较低的值。在发射机脉冲工作时间内接收机关闭,反之亦然,因而雷达可使用单一天线工作。事实上是需要CW雷达的高平均功率和多普勒检测性能,又

不需付出在飞机上安装两部天线的代价这一原因促进了高PRF雷达的发展。高PRF雷达与CW雷达有许多共同点。例如：不模糊的多普勒测量；为了测量距离需要采用二次调制；以及信号处理的方法。高PRF雷达的一个描述性的(但从未广泛使用)名称是间断CW雷达。

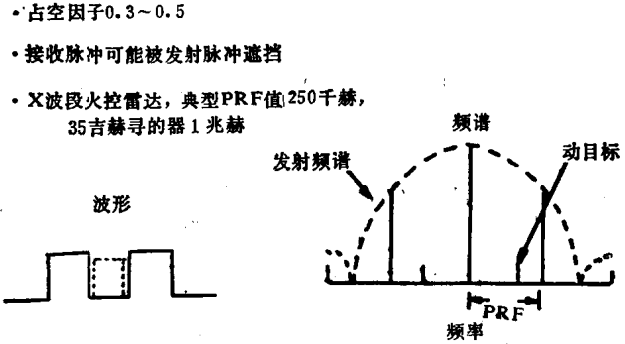


图1.11 高PRF的波形和频谱

图1.11中还示出了发射波形的频谱。除了载频上的中央谱线之外，在载频上下PRF的整数倍处还有其它一些谱线。发射频谱的包络取决于脉冲形状，例如，矩形脉冲时为 $(\sin x/x)^2$ 形。运动目标的

频谱是发射频谱偏移后的复制品，也含有一些间隔为PRF的谱线。PRF要选得足够高，使运动目标回波的每条谱线都邻近于其相应的发射谱线，每条接收谱线都易于与发射谱线发生联系。另一种很简单的陈述方法如下：即PRF要选得足够高，以便提供不模糊的多普勒频率的测量。对于一部X波段火控雷达，典型的PRF为250千赫，对于一个K波段的导弹寻的器则达1兆赫。

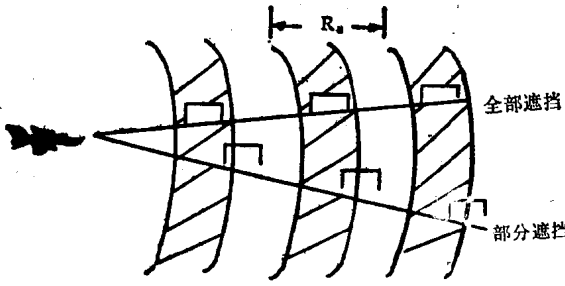


图1.12 遮挡区

我们再来参看图1.11，接收脉冲是在完全偶然的时间到达的。当发射机关闭时，所有脉冲均能接收。当目标运动时，总往返路径的传播时间是变化的。全部目标回波中可能有一部分在接收机关闭时到达，致使部分或全部被遮挡。对于一给定PRF的遮挡区(如图1.12所示)，就像一组同心球外壳，它们随着飞机向前推进，而目标的飞行则穿过它。

壳体间的距离为不模糊距离 R_u ，由下式给出

$$R_u = \frac{c}{2PRF} \quad (1.11)$$

目标渡过遮挡状态的时间取决于相对接近速率。高PRF雷达使用多重PRF来减小这些盲区或遮挡距离的影响，但不可避免会有盲速。

1.5 固定低PRF雷达的频谱和波形

低PRF雷达发射脉冲后打开接收机的时间等于所感兴趣的最大距离的往返行程传播时间。典型的发射机占空因子在0.001量级。剩余的时间可用于接收。图1.13示出当一个示波器连接到视频的I或Q分量时的时间波形。请注意，回波视频相对于发射基准可能为任何相位关系*：同相、正交、180°反相或任何相差。视频被称为双极性的。当许多脉冲的回波重叠在示波器上时，固定目标的回波将重叠。当一个固定目标和一个运动目标距离相同时(传播

*应补上“或任何相差”。——校者注