

雷达手册

第八分册

[美] M.I. 斯科尔尼克 主编

国防工业出版社

雷 达 手 册

(第 八 分 册)

〔美〕 M. I. 斯科尔尼克 主编

谢 卓 译 张直中等 校

国 防 工 业 出 版 社

1 9 7 4

内 容 简 介

本《手册》系根据[美]M. I. 斯科尔尼克主编的《雷达手册》一书译出。

全《手册》共有三十九章。为了读者使用方便，译文不是按原书章次编排，而是大致按细分的专业将其分成十个分册。

《雷达手册》第八分册共有四章，即第二十七、二十八、二十九、三十章。第二十七章 脉冲多卜勒雷达；第二十八章 跟踪雷达；第二十九章 测高雷达；第三十章 合成孔径雷达。

本《手册》可供所有从事雷达工程的工人、科技人员和大专院校师生参考。

Radar Handbook

M. I. Skolnik

McGraw-Hill, Inc. 1970

*

雷 达 手 册

(第八分册)

[美] M. I. 斯科尔尼克 主编

谢 卓 译 张直中等 校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第074号

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

*

787×1092¹/₁₆ 印张6⁷/₈ 157千字

1974年7月第一版 1974年7月第一次印刷 印数：0,001—3,800册

统一书号：15034·1374 定价：0.75元

出版者的话

为了适应我国电子工业迅速发展的形势，我们组织翻译了由〔美〕M.I. 斯科尔尼克主编的《雷达手册》一书，以帮助读者了解雷达方面的情况。

在原书中，编者试图包含雷达技术领域的各种主要问题。看来，本书的内容比较广泛，但不很深。它省略了一般雷达方面的书籍中通常有的数学推导和详细说明。其实，讨论的许多题目本身都可以写成单独的书籍。为了帮助读者深入研究，原书的每章都提供了许多参考文献。

本《手册》共有三十九章。为了读者使用方便，译文不是按原书章次编排，而是大致按细分的专业将其分成十个分册。第一分册包括雷达简介、雷达检测能力、波形设计；第二分册包括目标特性、气候影响、电磁兼容性；第三分册包括接收机、显示器、自动检测理论、数字信号处理；第四分册专论发射机；第五分册包括馈线、移相器；第六分册包括天线、天线罩；第七分册包括连续波、调频、脉冲压缩和动目标显示雷达；第八分册包括脉冲多卜勒、跟踪、测高和合成孔径雷达；第九分册包括固态、民用航海、卫星监视、天文和航天雷达；第十分册包括多基地、激光雷达，以及雷达信标和无源检测。这十个分册先后出版以后，另外再出版一部分合订本。

原书主编者在前言中对全书未能采用单一标准符号作了说明。他认为，由于当前没有一致通用的符号，如果本书采用某种单一的标准符号，就意味着武断地确定某一种符号是优先选用的，因此，原书允许各章的作者采用自己惯用的符号，只要对它作出确切的定义就行。例如，雷达方程这样一种被认为是标准的和常见的公式，在本《手册》的几个不同部分就写成稍有不同但又是等效的形式，用不同的符号来表示距离、功率、最小可检测信号等等。我们认为上述处理办法是可行的，因此，我们对译文全书的符号也没有统一。

虽然本书偏重于雷达系统方面，但除了对从事雷达系统方面的工程技术人员有用外，还可供其他所有从事雷达工程的有关人员参考。

虽然本《手册》篇幅较大，但在有关厂、所、院校的大力协同下，译校工作开展得比较顺利。在此，谨向为《雷达手册》一书的出版作了不少工作的单位和个人表示衷心感谢。

由于水平有限，书中的缺点和错误在所难免，希望读者批评指正。

目 录

第二十七章 脉冲多卜勒雷达(19)●	8-5
27.1 特性和应用	8-5
27.1.1 术语	8-5
27.1.2 应用	8-5
27.1.3 优点和缺点	8-5
27.1.4 脉冲多卜勒频谱	8-5
27.1.5 模糊问题和脉冲重复频率的选择	8-7
27.1.6 基本组成	8-8
27.2 脉冲多卜勒杂波	8-9
27.2.1 概述	8-9
27.2.2 固定雷达中的地面杂波	8-9
27.2.3 运动雷达中的地面杂波	8-9
27.2.4 杂乱回波, 一般方程式	8-9
27.2.5 旁瓣杂波	8-11
27.2.6 主波束杂波	8-12
27.2.7 主波束杂波的滤波	8-13
27.2.8 垂线杂波的滤波	8-14
27.3 时间波门	8-14
27.3.1 发射脉冲抑制	8-14
27.3.2 距离波门	8-14
27.3.3 距离模糊的分辨	8-14
27.4 目标跟踪	8-18
27.4.1 单目标跟踪	8-18
27.4.2 多目标跟踪	8-19
27.5 稳定度要求	8-19
27.5.1 寄生调制的类型	8-19
27.5.2 正弦调制	8-20
27.5.3 脉间随机调制	8-23
27.6 距离性能	8-23
27.6.1 距离方程	8-23
27.6.2 平均信噪比	8-24
27.6.3 检测概率	8-25
27.6.4 通用曲线	8-26
参考文献	8-28
第二十八章 跟踪雷达(21)	8-30
28.1 前言	8-30
28.2 笔形波束跟踪雷达的基本性质	8-31
28.3 圆锥扫描和波束转换	8-32
28.4 单脉冲(同时多波束)	8-35
28.4.1 比幅单脉冲	8-36

● 为了便于查对原文, 在每章题目后的圆括弧内用阿拉伯数字注明了相应的原书章次。——译注

28.4.2 比相单脉冲	8-48
28.4.3 用相控阵实行单脉冲跟踪	8-49
28.4.4 单通道和双通道的单脉冲	8-49
28.5 角跟踪技术的比较	8-51
28.5.1 圆锥扫描	8-51
28.5.2 顺序波束转换	8-51
28.5.3 单脉冲	8-51
28.5.4 比较	8-51
28.5.5 角跟踪	8-52
28.5.6 角误差斜率,有效波束宽度和增益	8-53
28.6 跟踪雷达的伺服系统	8-54
28.6.1 跟踪滞后误差的计算	8-55
28.7 目标捕获和距离跟踪	8-57
28.7.1 捕获	8-57
28.7.2 距离跟踪	8-59
28.7.3 n 次发射的距离跟踪	8-61
28.8 跟踪雷达的性能	8-62
28.8.1 角跟踪误差的来源	8-63
28.8.2 距离跟踪误差的来源	8-65
28.8.3 由正交极化能量引起的串扰	8-66
28.8.4 实时角误差校正	8-67
参考文献	8-70
第二十九章 测高雷达(22)	8-71
29.1 测高雷达技术	8-71
29.1.1 点头式测高雷达	8-71
29.1.2 V形波束雷达	8-72
29.1.3 多波束雷达	8-73
29.1.4 三座标扫描雷达	8-73
29.1.5 抽头传输线式测高雷达	8-76
29.2 雷达测高	8-77
29.2.1 “平面”地	8-77
29.2.2 “球面”地	8-77
29.2.3 大气折射	8-77
29.3 地面反射引起的仰角误差	8-80
29.3.1 同时幅度比较	8-80
29.3.2 同时相位比较	8-83
参考文献	8-85
第三十章 合成孔径雷达(23)	8-86
30.1 基本原理和早期历史	8-86
30.2 影响雷达系统分辨力的因素	8-88
30.2.1 常规技术	8-88
30.2.2 不聚焦合成孔径	8-89
30.2.3 聚焦情况	8-89
30.3 雷达系统初步介绍	8-90
30.4 信号处理理论	8-92
30.4.1 分辨力的详细分析	8-92
30.4.2 信噪比的考虑	8-98
30.4.3 相位误差的影响	8-99

30.4 4 信号处理	8-99
30.5 附加系统考虑	8-105
30.5.1 天线	8-105
30.5.2 接收机和发射机	8-105
30.5.3 存貯和记录	8-105
30.5.4 运动补偿	8-105
30.5.5 模糊	8-105
30.5.6 斜视方式	8-105
参考文献	8-106

第二十七章 脉冲多卜勒雷达

DAVID H. MOONEY WILLIAM A. SKILLMAN

27.1 特性和应用

27.1.1 术语 本章的脉冲多卜勒一词用于具有下列特性的雷达⁽¹⁾;

1. 具有足够高的脉冲重复频率, 以致不论杂波或所需目标都没有速度模糊。
2. 能实现对脉冲串频谱单根谱线的多卜勒 (即频率域) 滤波。
3. 由于脉冲重复频率高, 通常在所需的目标和杂波目标区域内具有距离模糊。

27.1.2 应用 脉冲多卜勒原则上适用于需要在地面杂波背景中检测运动目标的雷达系统。表 27-1 中列出了它的典型应用。本章只讨论机载应用, 当然其基本原理也适用于地面雷达。

表 27-1 脉冲多卜勒的应用和工作

雷 达 应 用	要 求	复 杂 性
机载预警	探测距离远; 距离数据精确	能容许有复杂的设备
机载截击	具有中等的探测距离和粗略的距离精度 (通常)	允许有中等的复杂程度
导弹寻的	可以不需要真实的距离信息	对振动和复杂性有严格限制
地面武器控制 ^(3,4)	探测距离近, 通常无距离模糊	简单
气象 ⁽⁵⁻⁷⁾	速度和距离分辨力高	中等复杂程度

27.1.3 优点和缺点 在表 27-2 中对脉冲多卜勒雷达和另外两种常用的多卜勒雷达做了比较。

27.1.4 脉冲多卜勒频谱 脉冲多卜勒雷达的发射频谱由载频 f_0 和边频 $f_0 \pm if_R$ 上的若干条离散谱线组成, 这里的 f_R 是脉冲重复频率, i 是整数⁽²⁾。频谱的包络由脉冲形状决定。通常采用的矩形脉冲产生 $(\sin x)/x$ 频谱包络。

由一个孤立的反射体产生的接收频谱具有正比于雷达站和反射体之间的径向速度 V 的多卜勒频移的谱线。双程多卜勒频移为 $f_d = 2V/\lambda$, 式中 λ 是雷达波长。如果 V_R 是雷达站的地速, ψ 是地速矢量与一小块杂波之间的夹角, 此多卜勒频移则为 $f_d = (2V_R/\lambda) \cos \psi$ 。图 27-1 表示的是诸如大地或云等连续目标和诸如飞机、汽车、坦克、卫星等离散目标回波的脉冲串频谱。

脉冲多卜勒雷达只利用频谱中与某一条谱线 (通常是载频) 相关联的部分。图 27-2 表示雷达站以速度 V_R 作水平运动时的这一部分频谱。无杂波区定义为频谱中不可能有地

表27-2 脉冲多卜勒相对于动目标显示（延迟线类型）雷达及连续波多卜勒雷达的特性

其它多卜勒雷达	脉冲多卜勒的优点	脉冲多卜勒的缺点
动目标显示	不因站速或偏离速度矢量的大扫描角引起的杂波扩展而降低作用距离 改善了对固定和慢运动地面目标的抑制 检波前带宽能与天线扫过目标的时间相匹配 探测只受热噪声限制，而不受旁瓣杂波限制（对于旁瓣杂波频率区域以外的目标而言） 地面杂波起伏由于有许多距离模糊而平均了 目标径向速度可用以跟踪	因为模糊距离引起杂波重迭，所以要求较大的杂波抑制度 由于杂波重迭形成的较大杂波，对发射的稳定度和纯度要求严格 真实的距离信息要求更高的复杂性 站的高度低时，旁瓣杂波中的目标探测性会降低
连续波	由于采用时间波门，距离性能不受发射泄漏的限制 因无隔离问题，发射和接收可用同一天线 从脉冲信息可实现精确测距	由于有距离模糊，使时间波门引起了遮蔽损失 跟踪必须克服遮挡过程中的信号丢失 必须防止波门谐波产生的寄生信号

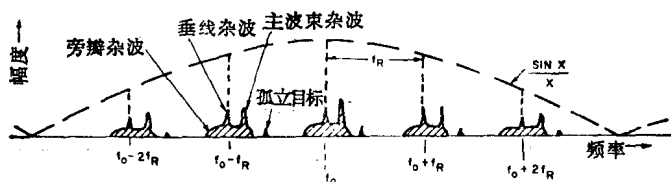


图27-1 由一个水平运动的站产生的杂波和目标频谱

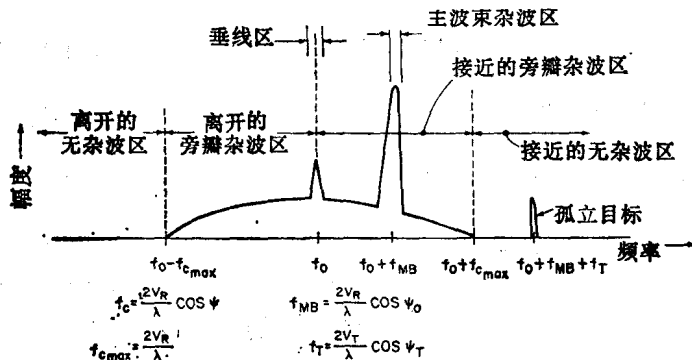


图27-2 通过接收机单边带滤波器后的频谱

面杂波的部分。旁瓣杂波区（宽度为 $2f_{cmax}$ ）包含天线旁瓣进入的地面杂波功率，在部分区域内杂波功率可能低于噪声电平。处于 $f_0 + f_{MB}$ 上的主波束区域包含在扫描角 ψ_0 （从速度矢量测量）上碰到地面的天线主波束产生的强回波。如果雷达站速度无垂直分量，由雷达站正下方近于垂直倾角上的地面杂波产生的垂线杂波处在零多卜勒频率上。在 $f_0 + f_{MB} + f_T$ 处为一个孤立目标的回波，这里的目标速度为 V_T ，目标速度矢量和雷达目标视线之间的角度为 ψ_T 。

图 27-3 说明不同多卜勒频率区随天线或目标方位变化的情况，这时方位角是指径向线和相对于速度矢量的水平分量的夹角。纵座标是目标的径向或视线速度分量，因而主波束杂波区位于零速度，而旁瓣杂波区随天线方位作正弦变化。

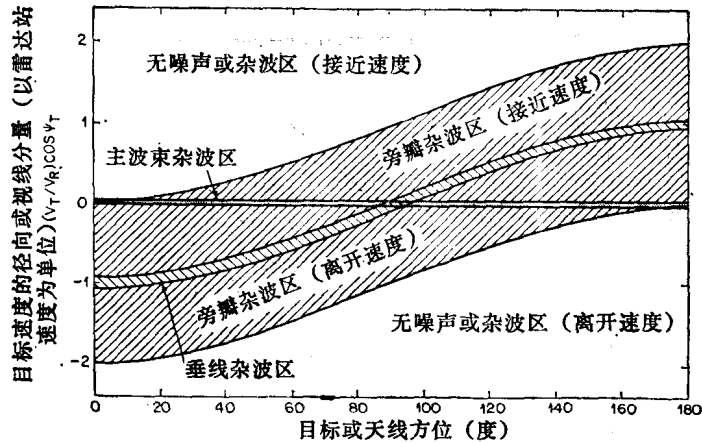


图27-3 杂波区及无杂波区与目标速度及方位的关系

注：垂线和主波束杂波区的宽度随条件而变化；方位是从雷达站速度矢量测到天线瞄准线或到目标的视线；水平运动情况。

27.1.5 模糊问题和脉冲重复频率的选择 由于按照定义不允许有速度模糊，因此脉冲重复频率必须高到足以使相邻谱线产生的目标回波不产生重叠。若假定接收机单边带滤波器相对于主波束杂波频率是固定的（如图27-4 a 所示），且所要观察的最大目标频率（相对于地面）是 $\pm f_{Tmax}$ ，则脉冲重复频率的最小值 f_{Rmin} 为

$$f_{Rmin} = 2f_{Tmax} = \frac{4V_{Tmax}}{\lambda} \quad (1)$$

脉冲重复频率的最小值和 V_{Tmax} 及 λ 的关系表示于图27-5。若单边带滤波器相对于发射频率 f_0 是固定的，为了适应迭加于目标频率上的主波束杂波频率的变化，则脉冲重复频率必须更高一些。在这种情况下，脉冲重复频率的最小值 f'_{Rmin} 应为

$$f'_{Rmin} = 2f_{Tmax} + f_{MBmax} - f_{MBmin} = \frac{4V_{Tmax}}{\lambda} + \frac{2V_R(\cos \psi_{min} - \cos \psi_{max})}{\lambda} \quad (2)$$

式中 ψ_{min} = 偏离速度矢量的最小扫描角；

ψ_{max} = 偏离速度矢量的最大扫描角。

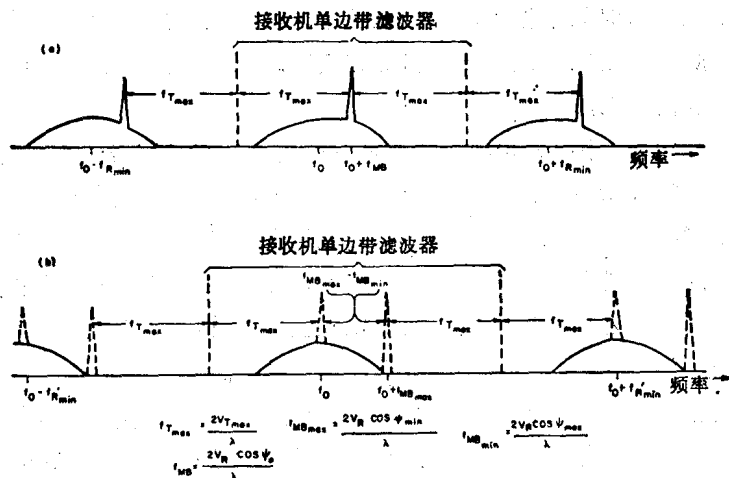


图27-4 克服速度模糊的脉冲重复频率的选择。接收机单边带滤波器相对于 (a) 主波束杂波频率和 (b) 发射频率是固定的 (虚线所画的主波束杂波尖峰表示天线扫描引起的最大频率偏移)

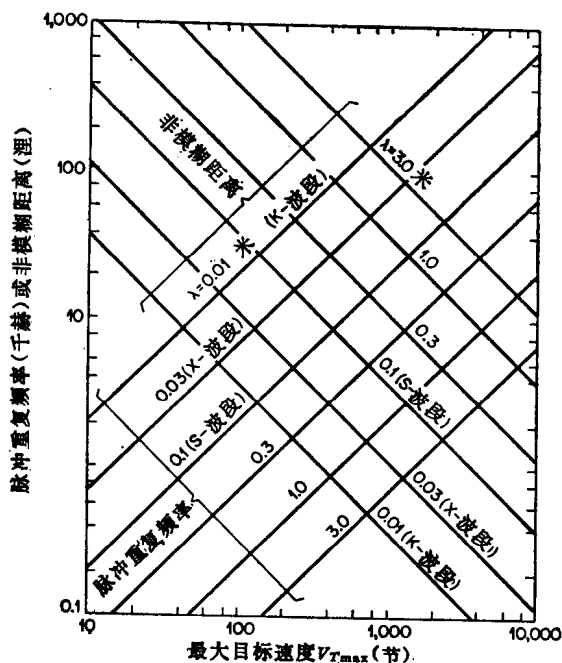


图27-5 非模糊距离和没有速度模糊的脉冲重复频率与最大目标速度的关系

这种情况说明于图27-4 b。

非模糊距离 R_n 由 $c/2f_r$ 给出。若采用脉冲重复频率的最小值，则最大非模糊距离在图27-4 a 情况下为：

$$R_{n \max} = \frac{c\lambda}{8V_{T \max}} \quad (3)$$

式中 c = 光速。这个关系也表示于图 27-5。

由于接收机在发射时间中被关闭，故在这个时间中接收的目标也被丢失或“遮挡”。利用通常采用的高脉冲重复频率值，一个目标在实际距离间隔内可能被遮挡许多次。这些遮挡发生在 $R_{n \max}$ 的倍数上。

27.1.6 基本组成 图 27-6 表示脉冲多卜勒雷达的典型组成。包含有距离波门电路、单边带滤波器、主波束杂波抑制电路和一个检测滤波器组。虽然只画出了一个接收机通道，但为了减小遮挡损失和在边跟踪边扫描时进行多脉冲重复频率距离测量，可采用多路距离通道。为了连续跟踪单个目标，还可以加装速度、距离和角度跟踪的伺服机构。

发射脉冲抑制器 发射脉冲抑制器和天线收发开关连在一起，降低进入接收机的发射机泄漏功率电平，使发射机噪声边带不致降低雷达性能。

单边带滤波器 单边带滤波器的带宽近似等于脉冲重复频率，且具有将输入脉冲信号变换成一个连续波信号的作用。通常选择回波信号的载波谱线，因为这个谱线含有最大的功率，且即使采用不同的脉冲重复频率数值时也不偏移。

信噪比不因单边带工作而降低，因为频带中的噪声也同样减小。获得的优点是杂波和

信号的滤波在单一谱线上比在整个频谱上更容易实现。必须注意,所有时间波门必须加在单边带滤波之后的接收机其余部分,实质上 and 连续波雷达中相同(见第二十三章)。

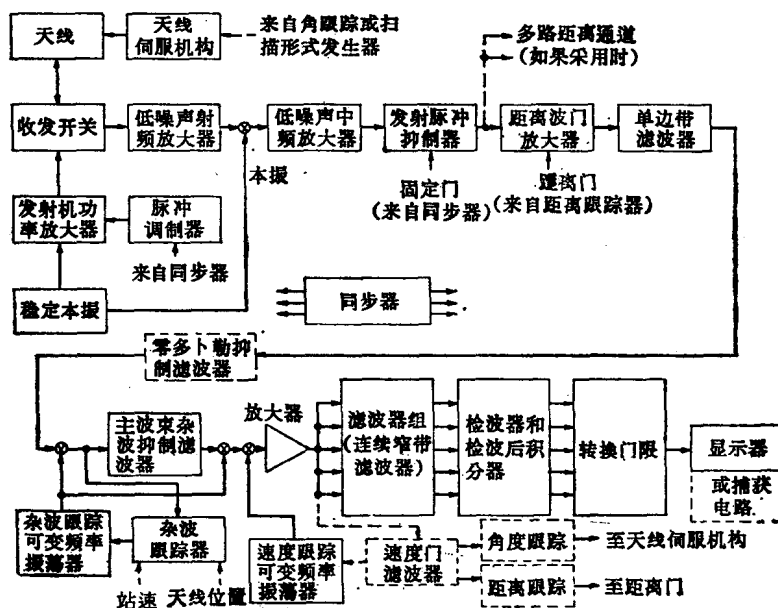


图27-6 典型的脉冲多卜勒雷达的组成

27.2 脉冲多卜勒杂波

27.2.1 概述 杂波频谱密度的形状决定了雷达对不同多卜勒频率的目标所能达到的灵敏度。通常这个频谱是多卜勒频率和距离二者的函数。但是,如果脉冲重复频率足够高,则由于杂波重叠,频谱将跟距离无关,且其形状和连续波雷达的频谱形状很相似(但比较小一些)。

27.2.2 固定雷达中的地面杂波 在理想的固定脉冲多卜勒雷达中,地面杂波密度函数是在发射频率上的单一谱线(经距离波门和窄带滤波之后)。因此,回波功率可以象在脉冲雷达中一样地计算,不同之处是必须把各距离模糊点上的功率加起来。

27.2.3 运动雷达中的地面杂波⁽⁸⁾ 当雷达相对地面以速度 V_R 运动时,杂波频谱被运动展宽,其多卜勒范围处于相应于雷达速度的多卜勒频率的正边与负边,如图27-2所示为水平运动情况。

恒定频率或恒定 ψ 角的曲线称为等多卜勒线,如图27-7平面视图图中所示。图中的距离圆环表示单个距离波门的几个模糊位置。这个图表示出水平运动的特殊情况。一个距离波门中的杂波密度函数是在相隔单位带宽的两条等多卜勒线之间微小的阴影面积产生的回波之总和。

27.2.4 杂乱回波:一般方程式 用图27-8的几何关系来说明沿等多卜勒线的接收功率的积累。雷达站在离地面高度 H 上以速度 V_R 运动。速度矢量沿 x 方向,并与水平面成 D 角(俯冲角)。一个微小杂波片 dA 的位置由下列座标给定: ψ 是等多卜勒线的角度, α 是到此小片的视线围绕速度矢量的转角。其相对速度是 $V_c = V_R \cos \psi$ 。

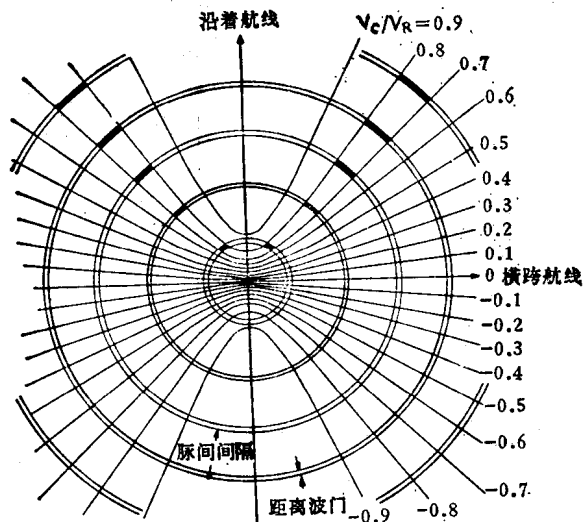


图27-7 地面上等多卜勒线和距离门圆环的平面图
(雷达站高度=0.219c/f_R)

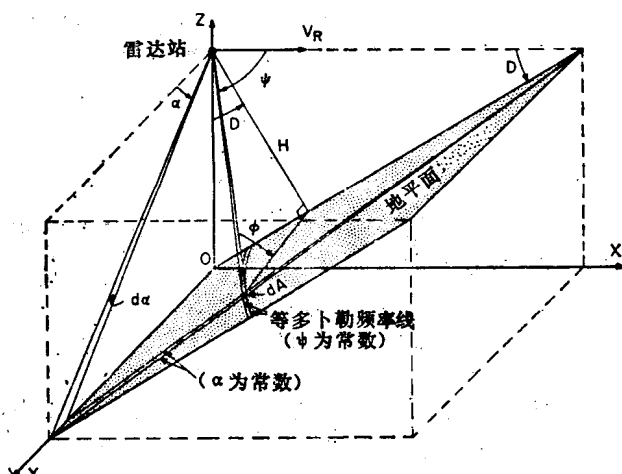


图27-8 用于沿等多卜勒线积累的微小杂波片的几何关系

用一个对发射脉冲延迟 T_G 的距离波门从所有模糊距离上接收到的单位带宽的 全部的中心谱线功率和单位带宽的接收机噪声功率的密度比 C/N_0 是归一化杂波速度 V_C/V_R 的函数,由式(4)给出。在推导此式时假设杂波反射系数 γ 是常数,并把地面近似看作为平面。

$$\frac{C}{N_0} = K_D \int_{\alpha_0}^{\pi-\alpha_0} [G(\psi, \alpha)]^2 \tau_s^2 \left\{ \sin \alpha + \tan D \left[\left(\frac{V_R}{V_C} \right)^2 - 1 \right]^{-1/2} \right\}^2 d\alpha \quad (4)$$

$$K_D = \frac{P_{av} \lambda^3 \gamma (\cos D)^2 [1 - (V_C/V_R)^2]}{2(4\pi)^3 V_R H^2 L k T_0 F_n \tau_s}$$

式中 P_{av} = 平均发射功率;

L = 系统损失;

$k = 1.38 \times 10^{-23}$ 瓦/赫/°K;

$T_0 = 290^\circ K$;

F_n = 接收机噪声系数;

c = 光速;

$\gamma = \sigma^0 / \sin \phi$ = 单位投影面积的杂波横截面积;

σ^0 = 单位截面积的杂波横截面积;

ϕ = 从水平面测量到小片杂波视线的俯冲角;

$$\begin{aligned} \tau_e &= T_R - T_G + \tau & T_G - \tau < T_R < T_G \\ &= (\tau, \tau_G) \text{ 中较小的一个} & T_G < T_R < T_G + |\tau - \tau_G| \\ &= T_G + \tau_G - T_R & T_G + |\tau - \tau_G| < T_R < T_G + \tau_G \\ &= 0 & \text{其他情况} \end{aligned}$$

T_G = 距离波门对发射脉冲的延迟;

τ_G = 接收机距离波门宽度;

τ = 发射脉冲宽度;

$$T_R = \frac{2h}{c[1 - (V_C/V_R)^2]^{1/2} \cos D \{ \sin \alpha + [(V_R/V_C)^2 - 1]^{-1/2} \tan D \}} \left(\text{模} \frac{1}{f_R} \right),$$

$G(\psi, \alpha)$ = 在微小杂波片方向上的天线增益;

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \sin^{-1} \left(-\frac{\tan D}{\tan \psi} \right) & |D| \leq \psi \leq \pi - |D| \\ &= -\frac{\pi}{2} & \begin{cases} 0 \leq \psi \leq D & D \text{ 为正数} \\ \pi - |D| \leq \psi \leq \pi & D \text{ 为负数} \end{cases} \\ &= \frac{\pi}{2} & \begin{cases} \pi - D \leq \psi \leq \pi & D \text{ 为正数} \\ 0 \leq \psi \leq |D| & D \text{ 为负数} \end{cases} \end{aligned}$$

如果脉冲重复频率足够高并且距离足够大, 以致模糊点之间的距离比斜距小, 则 τ_e^2 可以用它的平均值 $\overline{\tau_e^2}$ 代替。因此, 对于任一距离波门, 总的中心谱线功率与接收机噪声之比是:

$$\frac{C}{N_0} = K_D \overline{\tau_e^2} \int_{\alpha_0}^{\pi - \alpha_0} [G(\psi, \alpha)]^2 \left\{ \sin \alpha + \tan D \left[\left(\frac{V_R}{V_C} \right)^2 - 1 \right]^{-1/2} \right\}^2 d\alpha \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } \overline{\tau_e^2} &= f_R \tau^2 \left(\tau_G - \frac{\tau}{3} \right) & \tau_G \geq \tau; \\ &= f_R \tau_G^2 \left(\tau - \frac{\tau_G}{3} \right) & \tau_G \leq \tau. \end{aligned}$$

在水平运动情况下, $D = 0$, 式 (5) 简化成

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_0 = K_0 \overline{\tau_e^2} \int_0^\pi [G(\psi, \alpha)]^2 \sin^2 \alpha d\alpha \quad (6)$$

式中的 K_0 是 D 等于零时的 K_D 。

27.2.5 旁瓣杂波 如果已知旁瓣增益函数, 则可由式 (4)、(5) 或 (6) 算出天线旁瓣辐射产生的地面杂波的频谱。在系统的初步设计时还不可能知道精确的增益函数, 因此一个有用的近似是把旁瓣辐射取为各向均匀的常数增益 G_{sl} 。

图 27-9 画出了水平飞行并具有距离波门时的式 (4) 的性能, 其中取 G_{sl} = 常数, 发射和接收的占空系数为 0.2。对于几个不同的俯冲角 D 值由式 (5) 得到的平均旁瓣杂波

(SLC) 频谱表示于图 27-10。在水平运动情况下, 式 (6) 给出的平均频谱为

$$\left(\frac{SLC}{N_0}\right)_0 = \frac{\pi K_0 \tau_e^2 G_e^2}{2} \quad (7)$$

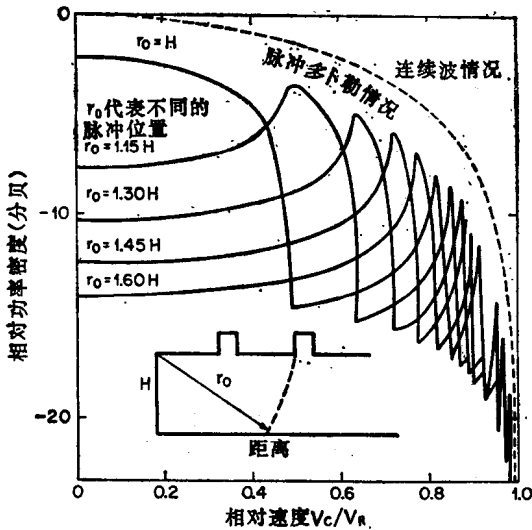


图27-9 旁瓣杂波频谱和距离波门位置的关系⁽⁹⁾

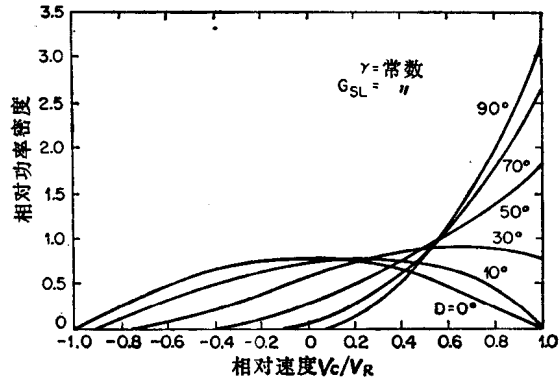


图27-10 旁瓣杂波频谱和俯冲角的关系

在高重复频率脉冲多卜勒雷达中测量距离的一种方法是以斜率 j 对发射机和本振进行线性调频。这时接收机中的杂波信号产生一个正比于距离的频率偏移, 因此相对于载频的总频率偏移为:

$$(f_d)_{FM} = \frac{2V_R}{\lambda} \cos \psi + \left(\frac{2j}{c} H / \sin \phi \right) \quad (8)$$

在高重复频率和水平运动时所得到的旁瓣杂波和热噪声的功率密度比 $(SLC/N_0)_{FM}$ 为:

$$\left(\frac{SLC}{N_0}\right)_{FM} = K_{FM} \tau_e^2 \int_0^{\pi/2} \frac{[G(\phi, A_e)]^2 \sin^2 \phi \cos \phi d\phi}{\{\cos^2 \phi - [V_C/V_R - jH\lambda(\csc \phi)/cV_R]^2\}^{1/2}} \quad (9)$$

式中 $K_{FM} = K_0 [1 - (V_C/V_R)^2]^{-1}$;

$G(\phi, A_e)$ = 天线增益, 它是 ϕ 和 A_e 角的函数;

A_e = 视线的方位角 = $\cos^{-1} \left[\frac{V_C - jH\lambda(\csc \phi)/c}{V_R \cos \phi} \right]$ 。

27.2.6 主波束杂波 从式 (4)、(5) 或 (6) 可算出由天线的主波束辐射产生的杂波频谱。若假定采用高重复频率、水平运动、高斯形状的天线波束, 并且波束的俯角大于波束宽度, 则主波束杂波功率与接收机噪声功率的密度比为

$$\left(\frac{MBC}{N_0}\right)_0 = 1.9 \times 10^{-4} \frac{P_{av} \tau_e^2 \lambda^3 \gamma \theta_p \sin^2 E_s G^2(\psi - \psi_0)}{LV_R H^2 k \tau \tau_c T_0 F_n (1 - \cos^2 E_s \cos^2 A_s)^{1/2}} \quad (10)$$

式中 $G(\psi - \psi_0)$ = 天线增益, 它是在从等多卜勒线的法线方向上测量的角度之函数;

ψ_0 = 天线瞄准线与速度矢量的夹角;

E_s = 天线瞄准线的仰角;

● MBC为英文 main-beam clutter 的缩写, 此处代表主波束杂波功率。——译注

A_s = 天线瞄准线的方位角;

θ_p = 沿波束峰值的等多卜勒线测量的波束宽度 (弧度)。

频谱形状可看作是由等多卜勒线法线方向上的波束形状的平方给出的。

由于主波束与地面相交的部分比旁瓣的小, 因此在式 (10) 中必须使脉冲重复频率高到足以保证在与主波束相交的地域之内至少有一个 (最好是两个或更多的) 距离波门模糊点。若假设处在主波束下半部照射的地域之内至少包含一个脉间周期, 则脉冲重复频率的最小值为

$$\min f_R = \frac{c \sin E_s \sin(E_s + \theta_E/2)}{2H \sin(E_s + \theta_E/2) - \sin E_s} \quad (11)$$

式中 θ_E = 仰角波束宽度。

若假定波束在 ψ 角上为高斯形状, 则主波束中总功率与大于 $B_{n \min}$ 的带宽 B_n 中的接收机噪声之比为:

$$\left(\frac{MBC}{N} \right)_B = 2.85 \times 10^{-4} P_{av} \tau_e^2 \lambda^2 \gamma \theta_E \theta_A G_s^2 \sin^2 E_s (k \tau \tau_G T_0 B_n F_n H^2 L)^{-1} \quad (12)$$

式中 θ_A = 方位波束宽度 (弧度);

G_s = 天线增益峰值。

基本上包含全部主波束功率的最小带宽为

$$B_{n \min} = 1.52 \theta_\psi V_R \lambda^{-1} (1 - \cos^2 A_s \cos^2 E_s)^{1/2} \quad (13)$$

式中 θ_ψ = 垂直于等多卜勒线测得的波束宽度 (弧度)。

27.2.7 主波束杂波的滤波 在理想情况下, 主波束杂波滤波器的频率特性应是杂波加噪声频谱的倒数, 以使杂波滤波器输出的频谱是平坦的。但是, 实际上滤波器的定位总有一些误差, 因此滤波器应该稍宽一些, 如图 27-11 所示。

主波束杂波滤波器的定位可以用闭环频率跟踪或通过从雷达速度和雷达天线位置计算杂波频率的方法来实现。

杂波暂态抑制 在某些情况下, 例如当在多重频率测距中改变脉冲重复频率时, 杂波可以看作在一个工作周期开始时接通而在结束时断开。这个方波产生的边带是大的, 并且可以延伸到部分目标检测区。为了减小这种影响, 可采用下述两种方法之一。

第一种方法是在杂波滤波器之前对接收信号采用一个加权函数, 用以减小调制边带。频谱扩展就是加权函数的傅里叶变换。

第二种方法称做暂态消隐, 是当杂波滤波器产生杂波暂态时关闭杂波滤波器的输出端。加至检测滤波器的合成频谱取决于陷波特性、消隐时间和工作时间。

这两种调制边带抑制方法都会引起一些检测能力的损失, 但由于信号和噪声都被调制, 故这种损失通常很小。

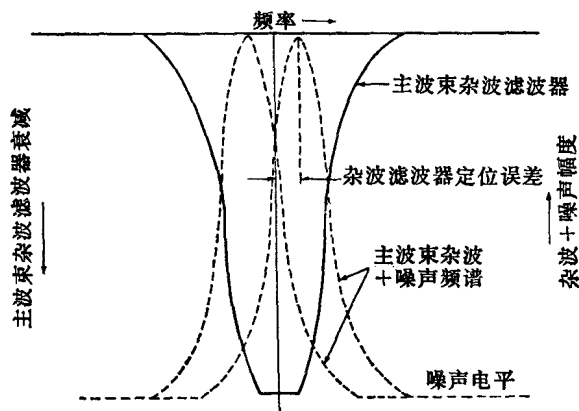


图27-11 主波束杂波的滤波