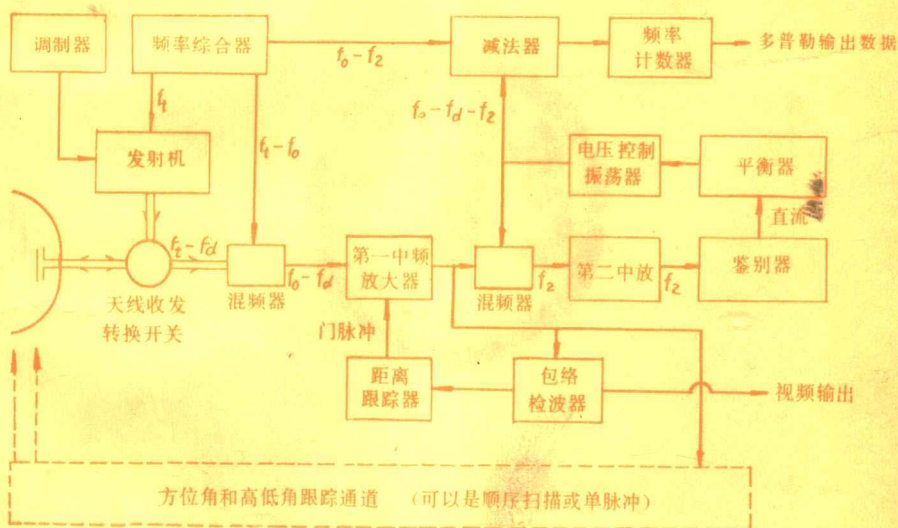


雷达系统分析

[美] D. K. 巴顿 著

陈方林 译 毕德显 校



国防工业出版社

雷 达 系 统 分 析

〔美〕 D. K. 巴顿 著

陈方林 译

毕德显 校

國防工業出版社

内 容 简 介

本书系统地概括了雷达系统的主要内容。全书分为五个部分。第一部分，阐明了雷达性能分析的理论基础。第二部分，讨论了搜索雷达的动目标显示技术、检测性能的计算以及搜索系统的综合和分析。第三部分，论述了测量角度、距离和多普勒速度的各种技术，还阐述了测量误差的来源以及估算各种误差的方法。第四部分，简述了雷达工作环境对雷达性能的影响。第五部分，叙述了鉴定搜索雷达系统和跟踪雷达系统的试验技术。

本书是从事雷达、电子对抗、电子工程等方面工作的工程技术人员、科研人员的参考书，也可供上述各专业的高等学校的师生参考。

RADAR SYSTEM ANALYSIS

D K Barton

Artech 1979

*

雷 达 系 统 分 析

〔美〕D K 巴顿 著

陈方林 译

毕德显 校

*

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

*

850×1168¹/₃₂ 印张17⁵/₈ 469千字

1985年7月第一版 1985年7月第一次印刷 印数：0,001—2,120册

统一书号：15034·2799 定价：3.60元

译 者 序

本书译自美国1979年第二版的《Radar System Analysis》，该书的特点是将雷达作为大系统的一部分，阐述了设计、分析和估价整个雷达的理论和实践。其主要部分包括检测理论和估值理论在雷达中的应用，目标特性和工作环境对雷达性能的影响，搜索雷达系统和跟踪雷达系统的分析、设计要点、性能估算以及鉴定试验等。

全书由毕德显教授作了十分仔细的审校，杨友烈同志参加了最后三章的校对工作。本书在翻译过程中还得到张锡熊等同志的热情帮助。现借本书出版之机，谨向他们致以衷心的感谢。

对于译文中的缺点或错误，诚恳地希望读者指教。

译 者

目 录

第一章 目标检测理论	1
第一节 雷达回波与噪声	1
第二节 单个接收脉冲的检测	10
第三节 脉冲列的积累	24
第二章 雷达测量理论	35
第一节 根据时间延迟测量距离	35
第二节 角度的测量	44
第三节 按照多普勒频移进行速度测量	53
第三章 雷达目标的描述	59
第一节 雷达横截面积的确定	59
第二节 复杂目标的描述	67
第三节 反射率的空间分布	75
第四节 作为雷达目标的信标和天线	80
第五节 雷达杂波的特性	86
第四章 雷达距离方程的运用	99
第一节 经典的雷达方程	99
第二节 信标方程	107
第三节 关于双基地雷达系统的方程式	109
第四节 目标位于波束轴上时的损失因子	110
第五章 理想搜索雷达理论	121
第一节 搜索雷达方程的推导	121
第二节 搜索雷达方程的其他形式	125
第三节 估算搜索损失	127
第四节 在系统设计中进行损失的估算	141
第六章 搜索雷达的检测和测量	145
第一节 雷达用于搜索问题	145
第二节 空间探测区域	148

第三节	实际的检测方法	156
第四节	多目标的测量和跟踪	166
第七章	搜索雷达的活动目标显示技术	174
第一节	多普勒原理的应用	174
第二节	关于简单活动目标显示的内部稳定度要求	184
第三节	活动目标显示系统对杂乱回波的响应	194
第四节	活动目标显示的改进	201
第八章	搜索雷达系统的综合和分析	209
第一节	关于搜索雷达性能的规范	210
第二节	实际搜索雷达的分析	219
第三节	雷达满足性能指标的综合	229
第九章	角度测量和跟踪	243
第一节	角跟踪的方法	243
第二节	对接收机噪声的跟踪响应	254
第三节	对目标噪声的响应	266
第四节	对目标运动的响应	272
第五节	跟踪特性摘要	288
第十章	角跟踪器的误差分析	293
第一节	误差的数学模型	293
第二节	角误差的分类和描述	300
第三节	角误差分析举例	317
第十一章	距离跟踪系统	323
第一节	距离跟踪装置的描述	323
第二节	距离测量中的热噪声和目标噪声	330
第三节	距离跟踪系统的误差分析	345
第十二章	多普勒跟踪系统	354
第一节	多普勒跟踪技术的描述	354
第二节	测速时的热噪声和目标噪声	363
第三节	多普勒跟踪系统的误差分析	372
第十三章	雷达数据的处理	378
第一节	数据的取样、变换和传递	378
第二节	数据的平滑	387

第三节	雷达数据的微分	394
第四节	处理系统的误差分析举例	401
第十四章	跟踪雷达的捕获	408
第一节	搜索理论的应用	408
第二节	捕获程序	415
第三节	从搜索到跟踪的转换	427
第四节	捕获计算举例	429
第十五章	传播效应概述	437
第一节	大气衰减	437
第二节	表面反射	444
第三节	对流层的折射	446
第四节	电离层的折射	457
第十六章	多站雷达网	461
第一节	搜索雷达网	461
第二节	跟踪雷达网	470
第三节	干涉仪雷达	478
第十七章	雷达的试验和鉴定	482
第一节	雷达参数的测量	482
第二节	搜索雷达的系统试验	493
第三节	跟踪雷达的系统试验	498
附录一	符号一览表	505
附录二	参考文献	519
附录三	关于雷达波束形状、频谱和波形的数学近似法	530
附录四	各种雷达波形的分辨力和模糊度	538
附录五	附表	551
附录六	中、外文人名对照表	556

第一章 目标检测理论

自从1608年发明望远镜以来,二十世纪前半期雷达的发展,标志着发现远距离物体的方法有了巨大进步。由于雷达本身具有可以适当控制的照射源,使得雷达不仅能够探测目标,而且能够测量目标精确的径向距离。由于无线电波具有在各种气候条件下穿透大气的 ability,在雷达使用的频段上,如果没有强烈的周围照射,雷达就能比电磁频谱的可见光部分得到更远的作用距离、更高的灵敏度。本章将讨论接收机的“热”噪声对雷达目标检测的限制。以后各章将讨论这种噪声对目标位置和速度测量的影响,并讨论其他噪声成分(例如,背景回波和人为干扰)的来源和影响。

第一节 雷达回波与噪声

检测是在由背景辐射、不需要的回波或雷达接收机噪声产生的干扰中发现所寻找的物体或目标的过程。雷达是靠目标反射雷达本身发射机发射的射频频率能量发现目标的[●]。典型的雷达的几何关系如图1.1所示。雷达发射机连接到天线,天线照射立体角 ψ ,通常根据方位角波束宽度 θ_a 和高低角波束宽度 θ_e 来确定。波束在空间的界限并非精确地被确定的,有些能量要进入边瓣,这些边瓣将照射不需要区域内的物体或由地面反射到目标上与直接射线相干涉。距离为 R 的目标截获发射功率的一小部分,并将它向各个方向散射,散射功率的一部分返回到雷达接收天线。对于给定的情况,这个回波信号强度的正确计算将在第四章中叙述。在检测计算中,目标的性质是重要的,这个问题将在

● 对于合作目标,雷达的目标信号是“信标”或应答器的放大信号,在这种情况下,这个检测理论也是适用的。

第三章叙述。现在，我们只假设：被目标的运动、目标反射特性和传播媒介修正过的部分发射信号，和各种不需要的回波和噪声一起到达接收机。

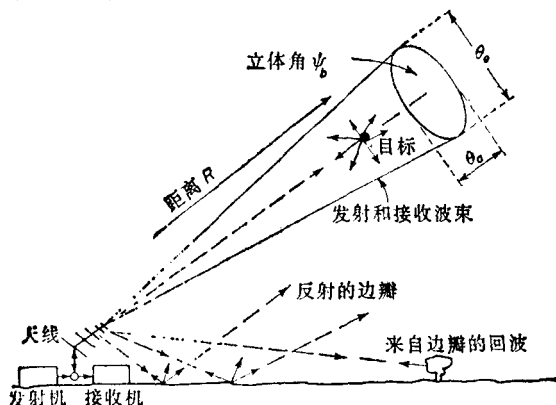


图1.1 典型的雷达-目标几何关系

一、雷达回波的性质

由简单的点源目标返回的回波，将正确地复制发射信号，但位移了与距离延迟量相应的一段时间，频率上变化了由于目标径向速度所引起的“多普勒频移”，并且按照雷达-目标情况的几何关系在幅度上有所变化。如果雷达发射信号由一系列调制正弦载波的矩形脉冲组成，在目标位于雷达天线波束之内的这一期间，回波将是一系列延迟了的脉冲。根据关系式 $t_r = 2R/c$ ，每个回波脉冲相对于发射脉冲的延迟时间 t_r ，将指示目标的距离 R 。式中， c 是光速。接收脉冲的中心频率将从发射频率 f_r 变为 $f_r + f_d = f_r(c + v_r)/(c - v_r)$ ，或 $f_d \cong 2f_r v_r/c$ 。接收的脉冲列达到最大值的时间指示出最接近于雷达波束中心的位置，如图1.2(b)所示。在实际情况下，由于目标上不同反射面之间的干涉、传播媒介的变化和多路径反射的存在，回波将偏离有规律的图形。因此，回波的平均幅度可以减小或增大，返回的回波包络，一般都要失真和被调制，如图1.2(c)所示。在这个包络中，回波的距离延迟和回波的多普勒频移均有相应的变化。

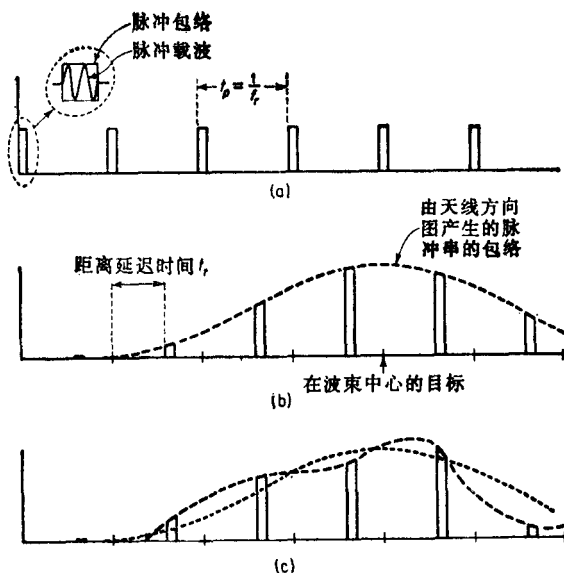


图1.2 典型的回波脉冲列

(a) 发射机的脉冲列；(b) 接收的脉冲列；
 (c) 来自起伏目标的接收脉冲列。

可以描述回波信号性质的参数包括：各个脉冲的幅度、平均幅度、距离延迟、多普勒频移、脉冲列的持续时间和单个脉冲宽度等以及其他因素。对于给定的观测，由脉冲列的所有脉冲返回到雷达的总能量可以作为雷达探测能力和测量能力的指标。如下节所示，雷达的目标探测性能的上限完全取决于这个总能量与接收机的噪声频谱密度之比。所以，雷达探测目标的能力，依赖于发射机的平均功率及其照射到目标上的时间，也依赖雷达-目标情况的几何关系，但同发射信号的调制类型无关。早期的脉冲雷达，接收的能量可以表示为接收的脉冲功率、脉冲宽度和脉冲列中脉冲数的乘积。另一方面，可以用平均接收功率与观察时间 t_o 的乘积来测量接收的能量。使用已调连续波发射的其他类型的雷达，所接收的能量应等于平均接收功率乘以观察时间。实际上，接收的信号是脉冲的或是某种形式的连续波，会产生许多差别。不同

的信号处理系统将降低效率或引入损失因素，这些损失因素随着使用的波形而变化，甚至使雷达不能接近最佳性能。在基本的探测理论发展的今天，将更详地讨论单个脉冲信噪比、接收机带宽、脉冲宽度或调制波形以及实际的探测要求。

二、雷达中噪声的来源

雷达的首要问题是在接收机内部和周围“黑体”辐射产生的随机噪声的自然背景中检测目标。这种噪声，无论起源于雷达设备的内部或外部，均称为“热噪声”。热噪声的典型来源是接收机中前级放大器的电子管的“散弹噪声”、中频放大器前面的晶体检波器或混频器引入的噪声、连接天线和接收机的波导元件的电阻损耗以及接收天线收集的来自大气和地面的射频辐射，如图1.3所示。早期的雷达，接收机的性能是相当拙劣的，以致于噪声电平几乎完全能够根据接收机的噪声系数进行计算^[118]。在典型的接收机中，这个噪声电平相当于温度3000K~50000K的电阻输入端的输出。与这个温度相比，周围环境温度（约290K）的

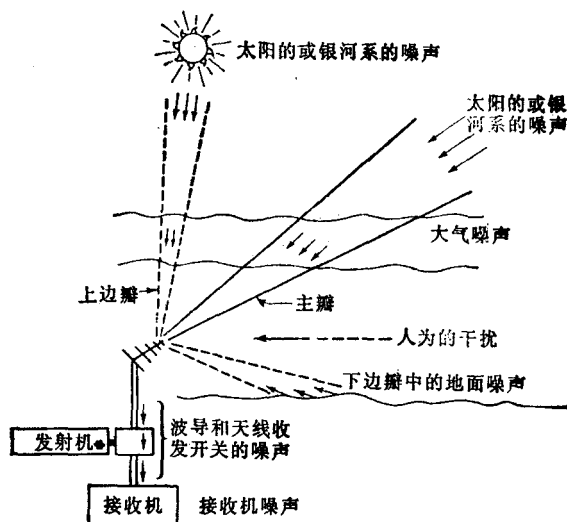


图1.3 雷达噪声的来源

影响是可忽略的。大气衰减和天线与接收机之间射频传输线衰减的重要性仅仅在于：它们减小了信号幅度。最近，当参量放大器和量子放大器把接收机噪声电平降低到几度或几百度绝对温度时，在射频信号路径中，由有损耗元件耦合到接收机中的辐射噪声成了雷达噪声的重要成份^[98]。

以后各章，将讨论来自不希望回波的非热噪声或杂波的影响^[125]。这类噪声的特性的变化是非常迅速的，以致于它们不能包括在检测理论的一般讨论中，而必须和专门的雷达应用或雷达技术一起考虑。在少数有限的场合，电子噪声或杂波的随机变化可以当成热噪声类型来分析。因此，在计算信噪比时，噪声功率的可变部分可以代替热噪声功率。然而，在应用检测理论之前，必须细究干扰信号的频率和振幅分布，以证明它们十分接近假定的热噪声分析。

三、人工操作员的检测

回波信号的视觉观察往往是检测雷达目标的最普通手段。典型的雷达显示器如图 1.4 所示。大多数搜索类型显示器利用阴极射线管电子束的强度调制表示回波信号的幅度，以两个偏转轴描写角度或距离坐标（在某种情况下，或者是与角度或距离结合的径向速度）。即使没有速度分辨力，雷达也是三坐标系统，所以，在平的阴极射线管屏幕上呈现数据时，总会存在问题。选定两个坐标作为直接显示以后，第三个坐标仍然是混淆的。在许多情况下，从这些无用坐标的所有雷达分辨单元来的信号和噪声一起被“丢失”或者投射到两度显示器的相应单元上。所以，在搜索雷达中，在高低角的探测范围内，如果一系列窄波束垂直地堆积起来，那么，当雷达在方位上扫描时，垂直波束的输出可以由视频混合器结合起来并显示在普通的 PPI 显示器上，如图 1.4(a) 所示。合成显示的每个单元将表示几个噪声电压的总和，这几个噪声电压独立地在每个波束的接收机中产生。使用分离的、较高方向性的方向图接收来自不同高低角的目标信号时，所得到的增益，会被这种类型信号处理所造成的检测损失抵消一部分。使用单一的

宽波束覆盖所有高低角来显示雷达数据，可以不丢失几路接收机的输出，但是低增益的接收天线将在单一接收机中产生较低的信噪比。宽的波束还使人们不能分辨两个同样距离和方位角而不同高低角的目标，而这两个目标在使用堆积波束天线时，可以在辅助显示器上被分离开。

当企图检测和测量单一天线波束位置(或者位置有缓慢变化)内的目标时，所用的显示器，往往不去改变阴极射线的强度，而用调制电子束离开它正常位置的方法去指示信号的幅度(见图1.4的A、J、K和R图形)。操作员在这些显示器上可以比在亮度调制显示器上更精确地判断实际的信号幅度。但是这时，只有一个偏转坐标用来指示目标位置。这个坐标通常用来取得距离数据，

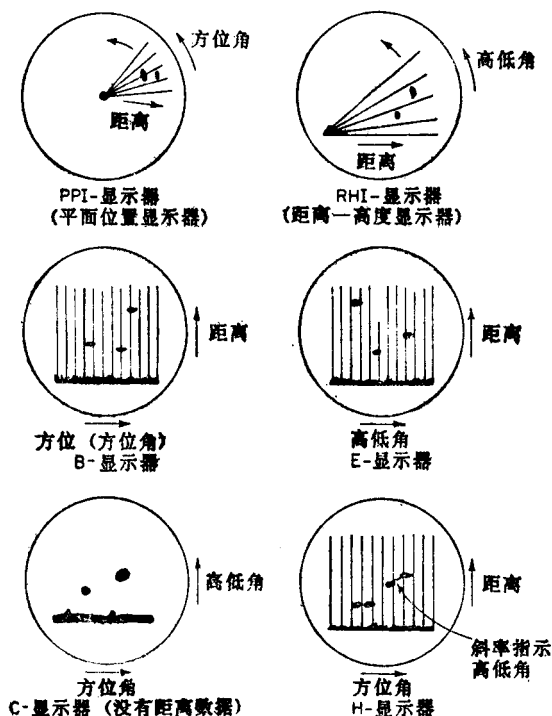
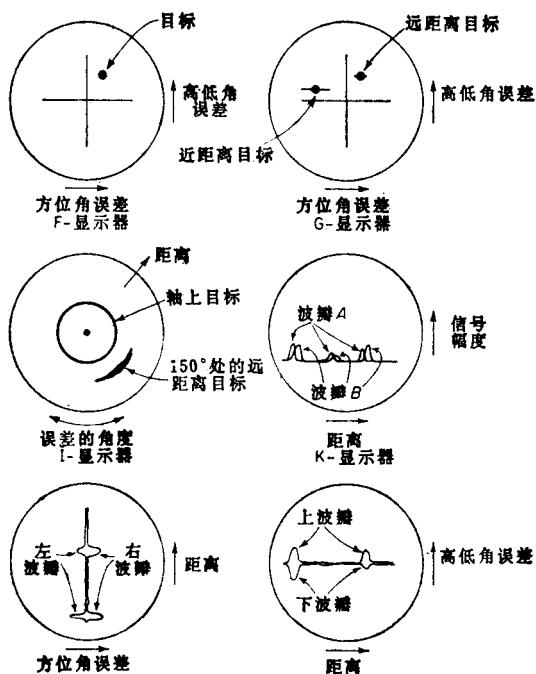


图1.4(a) 搜索雷达显示器



L-显示器的两种类型

图1.4(b) 角跟踪显示器

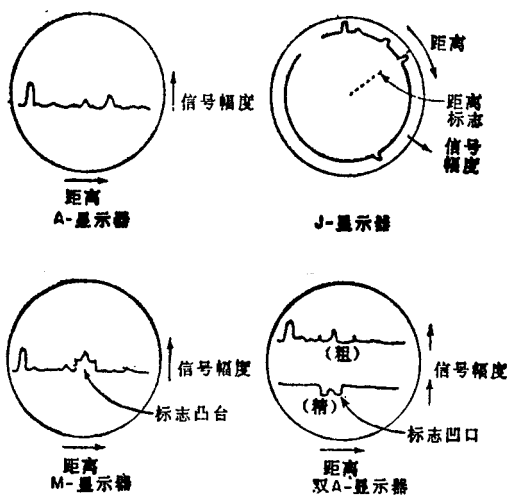


图1.4(c) 距离跟踪显示器

而两个角坐标却被压制、时间分割或丢失。那样的显示器用于搜索广阔的区域是拙劣的。研究结果已经指出，只要使用得当，这两种类型的显示器，对于目标检测，几乎是等效的⁽²⁰⁾。操作员的视觉和阴极射线管屏幕的余辉相结合，可提供约一秒钟的信号积累。当人们根据总的光输出或扫描的积累偏转（离开它平常的图形）进行测量时，检测的基础就是接收信号能量与噪声功率密度的比值。为了制造特别的显示器，以便提高检测性能，人们使用非线性的强度或位置调制进行过各种尝试，但是没有一种比原始的A式或PPI显示器有任何改进。比较实验结果可知，基本的显示器具有由检测理论预示的最佳性能。这就说明：没有留下多少改进的余地，沿着这条路线作进一步努力是没有效果的。

四、自动的目标检测

为了克服人工操作员检测目标时的不确定性和不稳定性，已发展了许多类型的自动检测器。虽然这些装置并不比机敏而又适当训练的人工操作员好，但是它们具有在长时间内以一致的和可预测的形式进行工作的优点。它们还能以更快的速度把数据转换给常常和雷达系统一起使用的自动计算机。某些更精细的自动检测方案能够适应各种输入条件，比如，只要不产生饱和或假目标，即使存在过分的输入噪声、干扰和杂波，这些自动检测方案也能适应。

简单的目标检测器采取单一“距离门（或称距离选通脉冲）”的形式，这个距离门在指定的距离延迟间隔（相应于一个或更多的脉冲长度）上对回波和噪声进行取样，如图1.5所示。在这个距离上，接收机的输出在简单的积分器中进行扩展或平均；这种积分器由一个电阻和电容组成，它的时间常数等于几个重复周期。 $R-C$ 积分器的输出加到偏置二极管或“阈”（门限器）上。在几个重复周期中，当接收机的平均输出超过预定电平时，这个“阈”产生输出。如果门限电平调整到大大超过接收机的均方根噪声输出，那么，由热噪声造成的虚警可以保持在任何需要低的概率上。使用高门限装定值却要丧失对较弱的小信号目标的检测。因而，

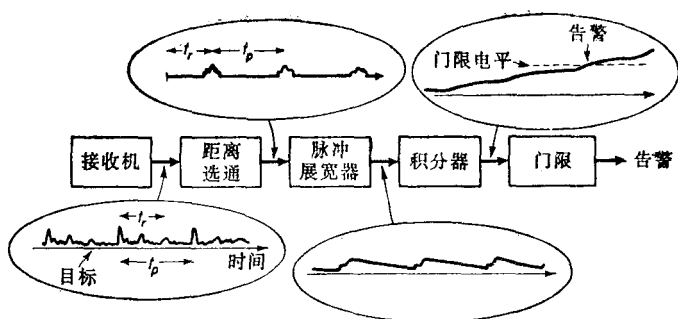


图1.5 简单的自动检测器

检测概率将是信噪比和门限装定值或虚警概率的函数。下一节将推导并讨论这些参数的正确关系。

上述的简单电路，在搜索雷达中可以用来自动报警。在那种场合，操作员不必始终连续地保持警觉，而且所有感兴趣的目标必须通过被选择的距离间隔。然而，弱目标会被漏掉，除非自动警报闸门的距离取在雷达最大检测距离之内。使用两个或更多的距离门能够克服这个缺点，当它和人工操作员联合时，在自动警报发声之后，他能接替工作。完全的自动检测电路，则要求对雷达重复周期内的所有距离单元都用积分器和距离门进行测试。但是，这将导致设备显著的复杂。要使所有门限装定在相等的电平上，并且当接收机噪声输出发生变化时，仍使它们保持在需要的电平上，这是很困难的。这就导致许多新方案的发展。在这些方案中，能储存和积累来自所有距离单元的信号，并依次地把积累的信号加到单一的门限上进行自动检测。存储器可以采取声学延迟线或磁鼓的形式，或者把信号和噪声的幅度处理成数字形式并存储在计算机型式的记忆装置（如：磁心或储存管）中。数字处理常常用于两步或“重合”检测系统。这时，首先用低到足以通过很弱回波和许多噪声峰值的门限来粗选信号。在把所选的信号作数字存储之后，把几个相继重复周期上同一距离单元的信号进行相加，以决定它们是否满足最后的检测标准或第二门限。这个第二门限

调整得足够高，以便获得足够低的虚警率。使用这种方法，总的存储要求可以简化得容易处理，而灵敏度的损失并不多。下面，我们将讨论简单的和重合检测装置在理论上的检测性能，并举例说明根据已知的信号与噪声功率（或能量）的比值如何计算检测概率。

第二节 单个接收脉冲的检测

雷达检测理论的基础是由1943年美国无线电公司实验室诺思的著作、1944年~1945年贝尔电话实验室的赖斯的著作和1947年~1954年兰达有限公司的彼得·斯威林的著作奠定的。他们的结果既作为讨论埋置在随机噪声背景中单一取样的雷达信号检测概率的基础，也作为把这个理论推广到对一群信号和噪声进行检测的基础。新近的重合检测程序技术，已由米施·施沃茨的结果所归纳。米施·施沃茨指出，那样的检测电路很接近由马库姆预言的理想视频积分器的性能。

一、对纯噪声进行单一取样的结果

随机噪声或正弦信号加随机噪声的单一取样，在包络检波以后超过给定门限电平的概率，是首先由诺思讨论的一个问题。他假定，随机噪声被滤波器（如中频放大器）限制在比滤波器的中心频率要小的频带内。加到包络检波器的瞬时电压 V 的概率分布由高斯分布确定：

$$dP_v = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\psi_0} \exp\left(\frac{-V^2}{2\psi_0}\right) dV \quad (1.1)$$

式中， dP_v 为瞬时中频电压幅度位于 V 和 $V+dV$ 之间的概率； ψ_0 为归一于1欧姆阻抗的单独噪声中频输出电压的均方值。 ψ_0 数值上等于有效输入噪声功率（在以后各章用 N 表示）与接收机功率增益的乘积。

在包络检波以后，加到门限器的视频信号服从瑞利分布：

$$dP_s = \frac{E_n}{\psi_0} \exp\left(\frac{-E_n^2}{2\psi_0}\right) dE_n \quad (E_n \geq 0) \quad (1.2)$$