雷达手册

第七分册

〔美〕M.I.斯科尔尼克 主编

国防工业出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

雷 达 手 册

（第七分册）

〔美〕 M.I.斯科尔尼克 主编

谢 卓 译　　张直中等 校

中国科学技术大学 图书馆藏

国防工业出版社

1974

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》第七分册共有四章，即第二十三、二十四、二十五、二十六章。第二十三章 连续波和调频雷达；第二十四章 动目标显示雷达；第二十五章 机载活动目标显示雷达；第二十六章 脉冲压缩雷达。

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
（第七分册）
〔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证出字第 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

*

787×1092 1/16　印张 8 1/4　188 千字
1974年 5 月第一版　1974年 5 月第一次印刷　印数：0,001—8,800册
统一书号：15034·1361　定价：0.89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

第二十三章　连续波和调频雷达(16)❶

23.1　连续波的简介及其优点 ……7-5
23.2　多卜勒效应 ……7-5
23.3　非调制的连续波雷达 ……7-6
23.3.1　频谱展宽 ……7-6
23.3.2　微波源的噪声 ……7-6
23.3.3　杂波产生的噪声 ……7-6
23.3.4　颤噪效应 ……7-9
23.3.5　扫描和目标的特性 ……7-9
23.4　微波源 ……7-10
23.4.1　主振功放 (MOPA) 链 ……7-10
23.4.2　有源稳定 ……7-10
23.4.3　功率振荡器的稳定 ……7-13
23.5　噪声测量方法 ……7-13
23.5.1　附加噪声或过量噪声的测量方法 ……7-14
23.5.2　适用于脉冲多卜勒的方法 ……7-15
23.6　接收机 ……7-16
23.6.1　射频放大 ……7-16
23.6.2　本机振荡器信号的产生 ……7-16
23.6.3　中频放大器 ……7-17
23.6.4　副载波 ……7-17
23.6.5　放大 ……7-18
23.6.6　多卜勒频率滤波器组 ……7-18
23.6.7　多卜勒频率跟踪器 ……7-18
23.6.8　固定的虚警率 (CFAR) ……7-19
23.7　将泄漏减至最小 ……7-19
23.8　导弹制导接收机 ……7-20
23.9　各种类型的连续波雷达 ……7-21
23.9.1　近炸引信 ……7-21
23.9.2　警察用雷达 ……7-21
23.9.3　德国的交通灯雷达控制 ……7-21
23.9.4　具有强杂波抑制能力的多卜勒识别器 ……7-21
23.10　调频雷达 ……7-21
23.11　正弦波调制 ……7-23
23.11.1　双正弦调制 ……7-24
23.12　三角波和锯齿波调制 ……7-25
23.13　噪声调制 ……7-26
23.14　编码调制 ……7-26
23.15　双重调制 ……7-27
23.16　泄漏问题 ……7-27
23.17　调频连续波雷达系统的性能 ……7-28

❶ 为了便于查对原书，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

需要全本请访问 www.ertongbook.com

23.18 高度表……7-28
23.19 多卜勒导航仪……7-31
23.20 人身探测雷达……7-33
参考文献……7-34
第二十四章 动目标显示雷达(17)
24.1 动目标显示(MTI)雷达……7-39
24.1.1 动目标显示的方框图……7-41
24.2 动目标显示对动目标的响应……7-43
24.3 杂波的频谱特性……7-44
24.4 杂波的幅度特性……7-45
24.5 有关名词的定义……7-48
24.5.1 改善因子(I)……7-48
24.5.2 杂波中的可见度(SCV)……7-48
24.5.3 杂波间的可见度(ICV)……7-48
24.6 改善因子的计算……7-49
24.7 限幅对改善因子的限制……7-53
24.8 多路延迟线滤波器……7-57
24.8.1 对消器……7-57
24.8.2 积分器……7-61
24.9 中频对消器……7-64
24.9.1 时间平均杂波相干机载雷达……7-64
24.9.2 矢量对消器……7-68
24.10 参差脉冲重复频率……7-69
24.10.1 参差脉冲重复频率的产生……7-70
24.10.2 四个或更多的脉冲间隔……7-71
24.10.3 反馈及脉冲间的参差……7-73
24.11 参差对改善因子所产生的限制……7-74
24.11.1 时变加权……7-74
24.12 速度响应曲线的第一凹点深度……7-75
24.13 雷达系统稳定性要求……7-76
24.14 量化噪声对改善因子的影响……7-79
24.15 脉冲压缩及动目标显示……7-80
24.16 非相干动目标显示……7-82
24.16.1 相位-灵敏非相干动目标显示雷达……7-83
24.17 分区式动目标显示……7-84
24.18 杂波地图的贮存……7-84
24.19 带自动门的相干存贮滤波器……7-84
24.19.1 相干存贮滤波器……7-84
24.19.2 自动门……7-85
24.20 对动目标显示雷达系统的几点考虑……7-86
参考文献……7-88
第二十五章 机载活动目标显示雷达(18)
25.1 应用机载活动目标显示技术的系统……7-90
25.2 作用范围的考虑……7-90
25.3 载有雷达站的飞机的运动和高度对活动目标显示性能的影响……7-91

25.3.1 斜距对多卜勒偏移的影响……7-91
25.3.2 雷达站运动的影响……7-93
25.3.3 雷达站运动的补偿……7-94
25.3.4 天线旁瓣的功率……7-95
25.4 扫描运动的补偿……7-96
25.4.1 补偿方向图的选择……7-98
25.5 对雷达站运动和扫描的综合补偿……7-98
25.6 脉冲包络偏移对改善因子的限制……7-99
25.7 多频谱的影响……7-100
参考文献……7-101
第二十六章 脉冲压缩雷达(20)
26.1 引言……7-102
26.2 影响选择脉冲压缩系统的因素……7-103
26.3 线性调频……7-104
26.3.1 无源线性调频装置……7-105
26.3.2 有源线性调频装置……7-109
26.4 非线性调频……7-111
26.5 相位编码波形……7-113
26.5.1 巴克(Barker)碼……7-113
26.5.2 最大长度序列……7-114
26.5.3 匹配滤波器和相关装置……7-115
26.5.4 多卜勒修正……7-116
26.5.5 多相编碼……7-117
26.6 时间-频率编码波形……7-117
26.6.1 匹配滤波器……7-118
26.6.2 有源波形产生和信号相关……7-119
26.7 加权和均衡……7-119
26.7.1 成对回波和加权……7-119
26.7.2 加权函数的比較……7-121
26.7.3 泰勒加权与余弦平方加基座式加权的比較……7-122
26.7.4 用于线性调频的泰勒加权……7-123
26.7.5 不连续的时间加权……7-123
26.7.6 幅度和相位失真……7-123
26.7.7 均衡……7-125
26.8 光学相关器……7-126
参考文献……7-126

目　录

第二十三章　连续波和调频雷达(16)❶

23.1　连续波的简介及其优点 ……7-5

23.2　多卜勒效应 ……7-5

23.3　非调制的连续波雷达 ……7-6

23.3.1　频谱展宽 ……7-6

23.3.2　微波源的噪声 ……7-6

23.3.3　杂波产生的噪声 ……7-6

23.3.4　颤噪效应 ……7-9

23.3.5　扫描和目标的特性 ……7-9

23.4　微波源 ……7-10

23.4.1　主振功放 (MOPA) 链 ……7-10

23.4.2　有源稳定 ……7-10

23.4.3　功率振荡器的稳定 ……7-13

23.5　噪声测量方法 ……7-13

23.5.1　附加噪声或过量噪声的测量方法 ……7-14

23.5.2　适用于脉冲多卜勒的方法 ……7-15

23.6　接收机 ……7-16

23.6.1　射频放大 ……7-16

23.6.2　本机振荡器信号的产生 ……7-16

23.6.3　中频放大器 ……7-17

23.6.4　副载波 ……7-17

23.6.5　放大 ……7-18

23.6.6　多卜勒频率滤波器组 ……7-18

23.6.7　多卜勒频率跟踪器 ……7-18

23.6.8　固定的虚警率 (CFAR) ……7-19

23.7　将泄漏减至最小 ……7-19

23.8　导弹制导接收机 ……7-20

23.9　各种类型的连续波雷达 ……7-21

23.9.1　近炸引信 ……7-21

23.9.2　警察用雷达 ……7-21

23.9.3　德国的交通灯雷达控制 ……7-21

23.9.4　具有强杂波抑制能力的多卜勒识别器 ……7-21

23.10　调频雷达 ……7-21

23.11　正弦波调制 ……7-23

23.11.1　双正弦调制 ……7-24

23.12　三角波和锯齿波调制 ……7-25

23.13　噪声调制 ……7-26

23.14　编码调制 ……7-26

23.15　双重调制 ……7-27

23.16　泄漏问题 ……7-27

23.17　调频连续波雷达系统的性能 ……7-28

❶ 为了便于查对原书，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

23.18 高度表……7-28
23.19 多卜勒导航仪……7-31
23.20 人身探测雷达……7-33
参考文献……7-34
第二十四章 动目标显示雷达(17)
24.1 动目标显示(MTI)雷达……7-39
24.1.1 动目标显示的方框图……7-41
24.2 动目标显示对动目标的响应……7-43
24.3 杂波的频谱特性……7-44
24.4 杂波的幅度特性……7-45
24.5 有关名词的定义……7-48
24.5.1 改善因子(I)……7-48
24.5.2 杂波中的可见度(SCV)……7-48
24.5.3 杂波间的可见度(ICV)……7-48
24.6 改善因子的计算……7-49
24.7 限幅对改善因子的限制……7-53
24.8 多路延迟线滤波器……7-57
24.8.1 对消器……7-57
24.8.2 积分器……7-61
24.9 中频对消器……7-64
24.9.1 时间平均杂波相干机载雷达……7-64
24.9.2 矢量对消器……7-68
24.10 参差脉冲重复频率……7-69
24.10.1 参差脉冲重复频率的产生……7-70
24.10.2 四个或更多的脉冲间隔……7-71
24.10.3 反馈及脉冲间的参差……7-73
24.11 参差对改善因子所产生的限制……7-74
24.11.1 时变加权……7-74
24.12 速度响应曲线的第一凹点深度……7-75
24.13 雷达系统稳定性要求……7-76
24.14 量化噪声对改善因子的影响……7-79
24.15 脉冲压缩及动目标显示……7-80
24.16 非相干动目标显示……7-82
24.16.1 相位-灵敏非相干动目标显示雷达……7-83
24.17 分区式动目标显示……7-84
24.18 杂波地图的贮存……7-84
24.19 带自动门的相干存贮滤波器……7-84
24.19.1 相干存贮滤波器……7-84
24.19.2 自动门……7-85
24.20 对动目标显示雷达系统的几点考虑……7-86
参考文献……7-88
第二十五章 机载活动目标显示雷达(18)
25.1 应用机载活动目标显示技术的系统……7-90
25.2 作用范围的考虑……7-90
25.3 载有雷达站的飞机的运动和高度对活动目标显示性能的影响……7-91

25.3.1 斜距对多卜勒偏移的影响……7-91
25.3.2 雷达站运动的影响……7-93
25.3.3 雷达站运动的补偿……7-94
25.3.4 天线旁瓣的功率……7-95
25.4 扫描运动的补偿……7-96
25.4.1 补偿方向图的选择……7-98
25.5 对雷达站运动和扫描的综合补偿……7-98
25.6 脉冲包络偏移对改善因子的限制……7-99
25.7 多频谱的影响……7-100
参考文献……7-101
第二十六章 脉冲压缩雷达(20)
26.1 引言……7-102
26.2 影响选择脉冲压缩系统的因素……7-103
26.3 线性调频……7-104
26.3.1 无源线性调频装置……7-105
26.3.2 有源线性调频装置……7-109
26.4 非线性调频……7-111
26.5 相位编码波形……7-113
26.5.1 巴克(Barker)碼……7-113
26.5.2 最大长度序列……7-114
26.5.3 匹配滤波器和相关装置……7-115
26.5.4 多卜勒修正……7-116
26.5.5 多相编碼……7-117
26.6 时间-频率编码波形……7-117
26.6.1 匹配滤波器……7-118
26.6.2 有源波形产生和信号相关……7-119
26.7 加权和均衡……7-119
26.7.1 成对回波和加权……7-119
26.7.2 加权函数的比較……7-121
26.7.3 泰勒加权与余弦平方加基座式加权的比較……7-122
26.7.4 用于线性调频的泰勒加权……7-123
26.7.5 不连续的时间加权……7-123
26.7.6 幅度和相位失真……7-123
26.7.7 均衡……7-125
26.8 光学相关器……7-126
参考文献……7-126

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第二十三章　连续波和调频雷达

WILLIAM　K.SAUNDERS

23.1　连续波的简介及其优点

雷达的一般概念是发射脉冲能量并测量脉冲来回时间以确定目标距离。很早就看出，连续波有能测量多卜勒效应的优点；采用某种编码，还能测量距离。

连续波雷达的优点是：设备很简单；发射频谱很窄。后者减少了无线电干扰问题，并使所有微波预选、滤波等都简单了。自然，对所接收波形的处理也容易了，因为中频电路所要求的频带很窄。同样，在采用固态元件方面，由于峰值功率一般比平均功率大不了多少，特别是当所需的平均功率能为单个固态元件所承受时，连续波就更加引人注意。

连续波（非调制的）雷达的另一个非常明显的优点是，不论目标具有什么可能的速度和在什么距离上，它都能处理而没有速度模糊。对脉冲多卜勒雷达或是活动目标显示雷达而言，只有搞得相当复杂才能取得这个优点。当然，非调制的连续波雷达本身基本上不能测量距离。调制的连续波雷达总要作不希望有的折衷（例如在距离模糊和多卜勒频率模糊之间的折衷），这是相干脉冲雷达的致命弱点（参看二十四、二十五、二十七各章）。

由于连续波雷达发射其所需的平均功率时有着最小的峰值功率，并且又具有很高的频率分集性，因此，不容易被侦察设备探测到。特别是侦察接收机依靠脉冲结构产生声音指示或视觉指示时，这一点更为正确。警察用的雷达和某些低电平人身探测雷达具有这种奇妙的特点。甚至是斩波接收机，特别是用最简单的视频型式，多半不能在足够的距离上报警，从而不便于采取措施。

不应当得出连续波雷达有这么多优点而没有相应的缺点的结论。信号泄漏，即发射机及其噪声直接漏到接收机去是一个严重问题。Hansen[1]、Varian及其他作者[2]早就认识了这个问题。事实上，从连续波雷达的历史可以看出，由于有信号泄漏，一直都在力图提出巧妙的方法，以取得所要求的灵敏度。

23.2　多卜勒效应

在许多物理文献中都有对于多卜勒现象完整的叙述，在Skolnik[3]一书（第三章3.1节）中着重在雷达方面作了特别透彻的讨论。

当雷达发射机和接收机在同一位置时，多卜勒频率f_d符合下列关系式：

$$f_d=\frac{2v_r f_T}{c}$$

式中　f_T＝发射频率；

c＝传播速度，3×10^8米/秒；

v_r＝目标对雷达的相对速度（或径向速度）。

因此，当相对速度为300米/秒时，在X波段的多卜勒频率大致为20千赫，换句话说，

在这个频段上，1 哎/秒相当于 20 赫。按比例计算是处理其他微波频率或速度的一种便利的方法。

和脉冲雷达一样，对于快速调频连续波雷达，要检测多卜勒频率而又没有模糊，就必须使调制频率比所期望的最高多卜勒频率高一倍。如果这个频率本身低于多卜勒频率就有盲速和模糊存在（盲速的定义是使目标看不见的相对速度）。这将在第 23.11 节中作较详细的讨论，还可参阅第二十四、二十五、二十七各章和参考文献〔3〕第 124～125 页。

23.3 非调制的连续波雷达

23.3.1 频谱展宽 下面就一个在半主动系统中用于照射目标的大型连续波雷达进行讨论，此雷达用于截获或报警。最基本的方框图示于图 23-1。就设备的主要作用来说，尽管有时用小幅度的调幅或是小频偏的调频来进行编码以提供距离的粗略指示，但发射信号仍可以认为是非调制的连续波。调制频率应选得高于所关心的多卜勒频带，电路设计应把基本噪声尽可能减到最小。

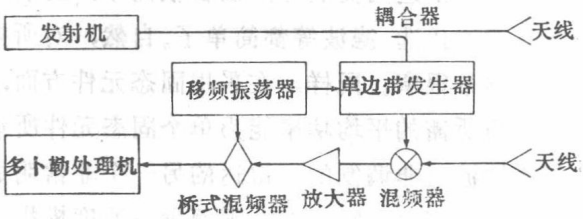


图23-1 连续波雷达的基本方块图

圆锥扫描也有一个频谱展宽的问题。在这种情况下，希望扫描频率选得低于任一有用的多卜勒频率，结果圆锥扫描频率就象小幅度的边带一样出现在设备所取出的多卜勒频率上。因此，这些次要的东西大都可被忽略掉，并且可以假定是一个非调制的连续波发射加上一个没有引入有意调制的接收机。

23.3.2 微波源的噪声 主要噪声问题在于微波源本身。所有的速调管、三极管、固态源等都产生可以测量的噪声边带，其频带都超出了任何可能的多卜勒频率。除了微波源特别坏以外，这些噪声边带可分成二部分：其中一部分它们相互之间及与主载频的谱线之间的相位关系构成调幅，而另一部分构成调制度很小的调频或调相。与载频相差一定频率的调幅分量，一般要比相应的调频分量低很多分贝。此外，平衡混频器、限幅器以及其他设计技术都可用来抑制调幅噪声，因此，调频噪声通常对连续波雷达影响较大。

一只好的速调管放大器的调频噪声，在偏离载频 10 千赫处的 1 赫带宽● 中，大致要比载频低 133 分贝，该放大器是由采用有源或无源调频稳定器的速调管振荡器来激励的。噪声功率在偏离载频较大时，大致按 $1/f^2$ 减小。相应的调幅噪声比载频低 150～160 分贝。因为连续波雷达的本机振荡器的信号往往由发射机供给，所以也带来了上述比例的噪声。噪声分量比载频小于上述比例时，就不会在任何实际滤波过程中损失过多的目标能量。必须考虑的是随着不希望的信号泄漏和杂波信号而进入接收机的噪声成分的能量。此外，如果振动引起信号泄漏通路的长度发生变化，则问题就更严重，因为这种效应产生的谱线分量可能直接出现在所关心的多卜勒频带中。

23.3.3 杂波产生的噪声 杂波（即从地面、雨滴等产生的不需要的反射波）将发射功

● 在本章中将 1 赫带宽选为参考带宽。在文献中并没有一致的规定，因为习惯上，一般可以是采用所研究系统的带宽或是采用测量设备的带宽。

率及其噪声边带反射回到接收机中。假定一工业区在每平方米的被照射的地面上具有0.1米^{2}的杂波截面。只考虑一块离雷达站$2\frac{1}{2}\sim 3\frac{1}{2}$公里处($R\approx 35$分贝)的区域，用0.1弧度的波束宽度的天线进行照射时，则反射截面积大致为：

$$3\times 10^3\times 0.1\times 10^3\times 0.1=3.0\times 10^4(\text{米}^2)\quad(\sigma=45\text{分贝})$$

假定在较远的距离上有一个目标，还假定在1千赫带宽内需要有+22分贝信噪比，才能得到适当的检测概率和容许的虚警概率(这里包括+10分贝的接收机的公差)。如果目标产生10千赫的多卜勒信号，则杂波信号的噪声在偏离10千赫处应不超过−144分贝毫瓦●+22分贝毫瓦=−122分贝毫瓦。如果假定发射机在1千赫带宽的噪声边带比载频低103分贝，则杂波信号应不超过−19分贝毫瓦。假设在X频段的天线增益为+30分贝，发射功率为+60分贝毫瓦，则得：

$$\begin{array}{cccccccc}
 & (\text{功率}) & & (G^2) & (\lambda^2) & (64\pi^3) & (\sigma) & (R^4) \\
-19\text{分贝毫瓦} > & +60\text{分贝毫瓦} & + & 60\text{分贝} & -30\text{分贝} & -33\text{分贝} & +45\text{分贝} & -140\text{分贝}
\end{array}$$

$$>-38\text{分贝毫瓦，或者说有一个满意的19分贝的余量}$$

必须注意，这里假定发射机噪声很小，而杂波中心处在距离约为3公里上（这里忽略了相关效应，参见下文)。

为了方便起见，用另一种方法表示发射机的调频噪声边带。只考虑噪声中的单一调制频率或谱线f_m，其峰值频偏为ΔF_p。按照调频公式，载频的峰值幅度为$J_0(\Delta F_p/f_m)$，而且每个最近边带的峰值幅度为$J_1(\Delta F_p/f_m)$[4]。如果宗数很小（在我们的计算中就是这样)，贝塞尔函数可近似表示为

$$J_0(X)\approx 1$$

$$J_1(X)\approx\frac{X}{2}$$

于是，载频和第一谐波边带中一边的均方根功率比为$\Delta F_p^2/4f_m^2$。两个边带的功率与载频功率的比（这个量通常是感兴趣的）为：

$$\text{调频噪声功率}=\frac{\Delta F_p^2}{2f_m^2}=\frac{\Delta F_{rms}^2}{f_m^2}\qquad(1)$$

在10千赫调制频率时，1赫的峰值频偏表现出的双边带的噪声与载频的比为$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{10^4}\right)^2$或为−83分贝。如前面举例中所采用的−103分贝的(在10千赫时的双边带)发射机应具有峰值频偏0.1赫。仅对特定带宽（在现在的情况下为1千赫)，这些数字才全部等效（仅在特定的雷达中，噪声以带宽来表示时，使用赫才方便)。

峰值信号的概念当然只与正弦波有关。对于随机噪声来说，用均方根值来表达更有意义。但是，在给定的频率和带宽时，噪声功率与具有某一峰值或有效值的正弦波产生的功率是等效的[5]。

为了进一步进行计算，必须讨论相关效应。当发射机产生调频噪声时，可以认为它以不同的调制频率和小的频偏进行调频。例如，我们来考虑这些调制频率中的一个频率；如果它是低频，而且所产生的信号泄漏或杂波的延迟时间很短，则接收信号的载频与正在发

● 在20°C时，1千赫频带的热噪声，相当于−144分贝毫瓦。

射的载频几乎相同，也就是去相关很少。对于噪声频谱中的较高频率则有较大去相关。此外，这种效应是随距离作周期性变化的：对任一给定的正弦调制频率所产生的调频噪声开始时随距离而增加，而后当超过一定的距离时就随之减小。在 $R=nc/2f_m$ 的距离上出现零点，这里 f_m 是正弦调制分量的频率； c 是光速； n 是任意整数。

然而，一般处理的不是正弦分量而是噪声。因此，上述的离散的零点意义不大。同时为了便于计算，假定信号在频率 f_l 逼近去相关，并有 $f_l=c/8R$。某些比 f_l 高的频率在特定的距离上没有问题，然而比 f_l 低的却有问题。此外，下面公式将指出，接收的信号的频偏可以比发射机的信号大一倍（发射信号向下摆动，而回波信号可能向上摆动）。

调频信号与它自己经时间延迟 $T=2R/c$ 后混频，混频后的中频频谱中第一个谐波边带的峰值电压是[6]

$$v_{p1}=J_1\left(2\frac{\Delta F_p}{f_m}\sin\pi f_m T\right)$$

而载频的峰值电压为

$$v_{p0}=J_0\left(2\frac{\Delta F_p}{f_m}\sin\pi f_m T\right)$$

在二个公式中 ΔF_p 为载频的最大频偏。如前所述，$J_1(X)\approx\frac{X}{2}$，$J_0(X)\approx 1$，$X<1$。因此单边带功率与载波功率比为

$$\frac{P_s}{P_c}=\left(\frac{\Delta F_p}{f_m}\sin\pi f_m T\right)^2$$

而一对边带与载波功率比为

$$\frac{P_{2s}}{P_c}=2\left(\frac{\Delta F_p}{f_m}\sin\pi f_m T\right)^2 \qquad (2)$$

这个式子的最大值为 $2(\Delta F_p/f_m)^2$，它与中频的最大偏移相符合，即比发射频率的频偏〔式（1）〕大一倍。

当 f_mT 数值较小时，双边带的功率比可表示为

$$\frac{P_{2s}}{P_c}=2(\pi\Delta F_p T)^2 \quad \pi f_m T<1 \qquad (3)$$

这是个有价值的公式，因为它表明当 ΔF_p 是常数时（许多速调管就是这样），相关噪声功率与频率无关而与距离有直接关系。

根据公式（2）和（3）的近似计算可画出一条方便的曲线（图 23-2），此曲线给出接收机的噪声与发射机测得的噪声的比值。曲线的虚线部分仅反映公式（2）的近似值。

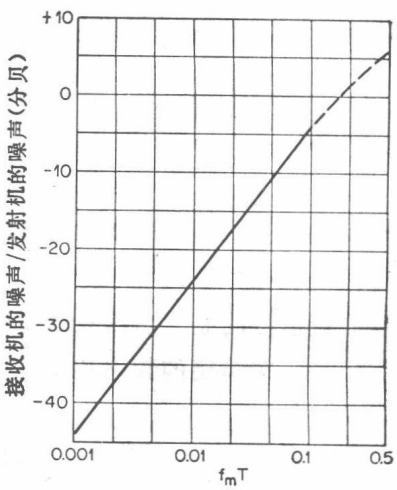


图23-2 相关效应对噪声的抑制

前面提出的问题现在可以得到解决。杂波的中心点取在位于 3 公里处或是 T 为 2×10^{-5} 秒。感兴趣频率为 10^4 赫，因此 $f_mT=0.2$，超过了噪声相关的范围。

非调制连续波雷达几乎到零距离都要和杂波作斗争。若是没有相关效应，这将是不可能

的。对给定的天线波束，被照射的杂波区的宽度随着 R 的减小而减小，但是在雷达方程里有一项 $1/R^4$ 的因子，结果杂波强度随 $1/R^3$ 而变化。相关效应表明，对固定的噪声频率，相关噪声边带随 R^2 而降低〔公式(3)〕，因此，结果是明显的，它只有 $\frac{1}{R}$ 的上升速率。表示杂波功率的积分似乎是发散的，但是一直被忽略的两个因素在很近的距离内起着决定性的影响。第一个因素是由一定高度天线发射的波束和地球的截面是双曲线的内侧而不是如上所述的扇形。第二个因素是在近距离时杂波处在天线的菲涅耳区，远场增益的公式不再适用。在更细致的分析中，采用这两个因素之任一个，其积分可以证明是收敛的。

Shreve〔7〕推导出的双边带噪声功率的公式，采用了菲涅耳区的界限 $R_F=D^2/\lambda$ 作为积分的下限。根据上述的参数，他的公式可以算出杂波的相关噪声功率数值为 -117 分贝毫瓦。这相当于单个天线在严格的地平线上对着非常厉害的杂波（0.1 米^2/米^2）时的极端情况。

用较实际的方法来观察这个问题便可以看出，很近距离的杂波和信号泄漏几乎是等效的现象。对地面的连续波雷达为了工作在最大的灵敏度，必须采用两个天线，这就同时减小了信号泄漏和近处的杂波，因为没有一个近处的点能在发射波束和接收波束两个主波瓣之内。而且如下所述，通常还采用信号泄漏对消及近距杂波对消办法。

上面的讨论假定雷达中采用的本机振荡器是由发射机引入的或是利用伺服系统与发射机频率锁定，该伺服系统具有够高的频率响应而足以覆盖所关心的多卜勒频带和噪声频带。

23.3.4 颤噪效应 颤噪效应能在信号泄漏上引起附加的噪声边带，有时偶然也在杂波信号上造成附加的噪声边带。如果结构笨重，则颤噪效应在低频时最大，这时它可由直通伺服系统抵销。因此，最重要的是用于直通调零的微波元件以及微波电路的其余部分无论如何都应尽可能地坚固〔8〕。通常采用块状结构形式。在少数情况下，当机载高功率连续波雷达中采用的单个天线加上收发转换开关或是成对的一套天线时，机械设计是难以解决的问题。甚至在地面雷达中，风扇、驱动电动机、电动发电机设备、旋转接头、致冷机等都是非常麻烦的问题。

23.3.5 扫描和目标的特性 除了由发射机噪声和颤噪效应所产生的频谱展宽外，还有目标和天线扫描所造成的连续波能量的展宽。一般，即使快速闪烁的飞机目标引起的展宽其能量仍在正常的多卜勒带宽之内。通常是根据截获的问题或目标上的时间而不是根据反射信号的内部特性来设置滤波器。然而，快速天线扫描能使杂波产生的频谱大大地加宽。要不是典型天线的波束正巧具有合适的图形，则扫描时杂波产生的瞬变现象将更加严重。

一种近似的分析是假定天线的双向为高斯增益 $G^2=e^{-2.776\theta^2/\theta_B^2}$，其中 θ 是从波束轴线测得的角度，而 θ_B 是天线半功率点之间的波束宽度（参考文献〔3〕，第 149 页）。我们要讨论的是在 $\pm\frac{1^\circ}{2}$（$\theta_B=1^\circ$）处下降 3 分贝的双向辐射图。如果天线每秒扫描 180°，我们需要用 $a=9\times10^4$ 的 e^{-at^2} 傅里叶变换，其形式为 $Ae^{-\omega^2/3.6\times10^5}$，当 $\omega^2/(3.6\times10^5)=6.9$，$\omega\approx1,575$ 和 $f\approx250$ 赫时，它就下降到其峰值的 1/1000(60 分贝)。

实际的天线方向图产生的瞬变现象比高斯形状产生的瞬变现象要差些。接收机中的限幅相当于改变波束的形状〔88〕。对某一窄波束天线方向图，天线的扫描速度都有一定的限制。实际上，除了非常慢速的目标外，机械限制通常可避免麻烦，但是采用非机械扫描方法时可能变差。

23.4 微 波 源

23.4.1 主振功放（MOPA）链 对连续波雷达的特殊要求是在整个发射机链电路中采用高稳定的管子、低噪声电源，往往还加稳压，以减少系统的总噪声。从理论上讲在 23.5 节中将要讨论的调频和调幅噪声的任一种测量方法，均可加以改进，以便产生抑制噪声的伺服系统。实际考虑产生了各种不同的线路。最简单的是在速调管激励器和功率放大器之间接入一个高 Q 空腔谐振器。一般采用的 Q 值为 20000～100000。空腔谐振器的作用主要是附加的电抗元件直接与速调管的腔体并联。对高质量的反射速调管，其调频噪声在偏离载频 10 千赫的 1 赫频带内要比载频低 110 分贝，采用高 Q 空腔谐振器作为无源稳定器后，则可把相应的调频噪声减到比载频低 130～135 分贝，其代价是功率损耗约为 11 分贝。在大部分有用的频率上噪声可以改善 20～25 分贝。用这个方法在多卜勒频率上对调幅噪声电平的改善是不显著的。

必须记住，这仅仅是对稳定的激励器才能达到的结果，对功率放大器所产生的任何噪声将没有效果。同时，如上所述，除非本机振荡器由功率放大器的输出产生（当然，这不可能在脉冲多卜勒系统中实现），否则这个噪声是非相关的。幸好，由高度稳定电源激励的好的功率放大器增加的剩余噪声（或附加噪声）非常小（见图 23-9）。

23.4.2 有源稳定 在主振功放链电路中，有源稳定的所有方案都采用高 Q 空腔谐振器作为基准元件。空腔谐振器应与电子管隔离，以使它只起测量器件的作用，而没有由于其电纳的频率响应而产生频率牵引。

对反射式和传输式空腔谐振器来说，由 Grauling 和 Healy[9]修正后的有用的公式如下。对匹配的反射式空腔谐振器，

$$\Gamma=\frac{Z-1}{Z+1}=\frac{j\delta Q}{1+j\delta Q}=\frac{j2\delta Q_L}{1+j2\delta Q_L}$$

式中 Γ = 反射系数；

$\delta=(f-f_0)/f_0$；

Q = 空腔谐振器的无载 Q 值；

Q_L = 空腔谐振器的有载 Q 值；

Z = 朝空腔谐振器看去的归一化阻抗。

除了载频（V_c）和边带（V_{sb}）能通过之外，传输式空腔谐振器具有类似的特性。对传输式空腔谐振器而言，

$$V_0=\frac{V_1}{3+j2\delta Q}=V_c+V_{sb}$$

（所有耦合系数已假定等于 1）。V_1 是输入电压而 V_0 为输出电压。用一点代数学知识可以看出 Γ 和 V_{sb} 的频率响应项的形式相似。在稳定系统中，$f-f_0$ 保持很小，而

反射式：
$$\Gamma\approx j2\delta Q \qquad (4)$$

传输式：
$$V_{sb}\approx 2(-2j\delta Q) \qquad (5)$$

可以期望，不管频率多高，在减小 δ 时对稳定性起相同的作用。这里忽略了两个因素：(1)空腔谐振器仅具有有限的线性范围，f_m 的数值较大时产生的边带能在这个范围之外；

需要全本请访问 www.ertongbook.com