

遥感中的自适应雷达

〔美〕D·T·吉 辛 著 倪汉昌 译

郭柏松 校

6311

86

宇航出版社

遥感中的自适应雷达

〔美〕 D. T. 吉辛

倪汉昌 译 郭柏松 校

宇航出版社

内 容 简 介

本书从基本物理概念出发叙述自适应雷达的基本原理,着重讨论采用多频率雷达系统实现对目标特征、传输介质及背景的自适应,以获取观测目标的最大信息。书中列出必要的计算公式推导、大量的实测数据与图表。全书内容新颖、概念清楚,适于从事雷达、遥感和航空与航天总体设计等专业的工程技术人员及高等院校的师生参考。

遥感中的自适应雷达

〔美〕D.T.吉辛

倪汉昌 译

郭柏松 校

责任编辑:高丹平

*

宇航出版社出版

北京和平里滨河路1号 (邮政编码 100013)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京密云华都印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 4 字数: 106 千字

1991年1月第1版第1次印刷 印数: 1—1000册

ISBN: 7-80034-332-4/TN·025 定价: 2.90元

译 序

在科学技术高速发展的今天，传统的雷达系统已无法适应现代经济发展与军事应用的需要。人们往往要求雷达能在各种复杂的环境条件与背景下实时地获取目标信息，因而先后出现了各种现代雷达。自适应雷达是在固体微波源与高速数字计算机高度发展的基础上诞生的一种现代雷达，它能在时域与频域综合考虑目标特征、目标背景及传输介质，用微机控制照射器的射频辐射的振幅与相位（频率），使其与感兴趣的目标相匹配，并用高速数字处理机进行实时的复杂信号处理与模式识别，以提取感兴趣目标的最大信息。

本书着重讨论采用多频率雷达系统实现对目标的自适应匹配，滤除无用的背景杂波。书中最后一章为前面各章的总结，它进一步强调可以利用目标的先验信息设计最优的“智能”雷达系统，并举例说明从海杂波中识别舰船目标与低空飞机的原理。

全书内容新颖，既有公式推导，又有大量实测数据与图表，对从事雷达、遥感、航空、航天和军事应用等工作的工程技术人员及大专院校的师生均有较高的参考价值。在翻译本书时发现原文中存在几处印刷错误，译文已作了纠正，但限于译者水平，可能译文亦有不妥之处，恳请读者批评指正。

译 者

目 录

前言	(1)
第一章 绪论	(4)
第二章 粗糙表面散射——基础理论概要	(7)
2.1 不同频率电磁波的相关特性(带宽问题)	(9)
2.2 空间散射电磁场的相关特性——角度分布	(17)
2.3 散射波的瞬时相关特性(运动模式与多普勒频率)	(21)
第三章 多频率自适应雷达系统的一般目标特征	(24)
3.1 目标空间特征(波数匹配)	(25)
3.2 运动模式分析(瞬时特征)	(27)
第四章 目标海面背景特征——背景自适应雷达概念	(31)
4.1 空间特征(海浪的波数谱)	(31)
4.2 海面散射的无线电波的方位分布(海浪的传播方向)	(36)
4.3 海面的瞬时(多普勒)特征	(39)
4.4 从洋面和舰船散射的无线电波的互相干性, 空间/时间相干	(42)
第五章 无线电波通过大气传播的基础——传播介质自适应雷达	(45)
5.1 视线传播	(46)
5.2 包含散射和衍射的传播机理	(54)
5.2.1 超视距散射传播的基本关系	(55)
5.2.2 以无线电气象参数表示的脉冲畸变计算	(58)
5.2.3 带宽计算	(59)
5.2.4 场强的相关距离	(62)
5.2.5 天线增益下降	(68)
5.2.6 散射功率的波长相依性	(94)
5.2.7 与日常气象观测有关的无线电气象参数 n 和 a	(66)
5.2.8 大气层散射(波)	(74)

5.2.9 微粒(降雨)散射	(83)
5.2.10 无线电波遇障碍物时的衍射.....	(84)
5.2.11 衍射的基本理论.....	(85)
5.3 吸收现象	(101)
5.3.1 气体吸收	(101)
第六章 “智能”雷达: 对目标、地面背景及传播介质的自适应雷达.....	(107)
参考文献.....	(116)

前 言

我们很荣幸地生活在无线电科学已取得高度发展的时代。在这个时代里，人们已经成功地完成了艰难的开拓性的工作，为做出新的成就打下了基础，从而可能解决至今不可想象的复杂问题。无线电科学的理论工作者以灵活的计算机和软件库作为一套强有力的工具来处理各种基本问题。

实验家有幸获得了一套零部件，由此可研制出一种诊断工具。可调谐激光器就是一个例子。在过去的20年中，照射源（紫外线、可见光或红外线）的谱密度已经提高了大约6个数量级。近年来，能与照射源相匹配的超外差光接收机已经研制成功，使灵敏度也提高约6个数量级。因而对于某些实验，总的遥感能力提高了约12个数量级。以前甚至在实验室条件下不能鉴别其特征的客体或现象，现在已能从遥远的平台上进行研究。

在微波技术领域中也同样取得了惊人的进步。上一代的科学家对于微波照射只知道磁控管。磁控管的频率大部分是固定的，并且决定于它的机械几何形状。今天有了固体微波源，其振幅与相位（频率）可以由微处理机按预先规定的样式控制。这就为我们提供了与感兴趣的客体相匹配（适应）的照射器。

高速数字处理机使人们能实时地进行复杂的信号处理和模式识别算法。

从建立在压电材料声波与电磁波相互作用基础上的固体物理学脱颖而出的新工艺，打开了通向高速信号分析的另一途径。

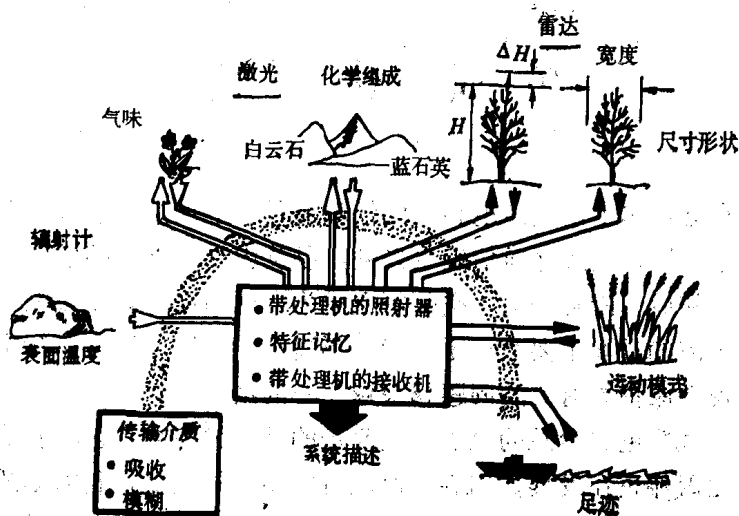
除了在基础科学与工程方面取得飞速发展外，我们正处于这

样的时代，即科学与工程成就可以转到实际应用的时代。在科学史上，基础研究与工程应用的时间间隔从未象今天这样短。

无线电技术除了在无线电通信、军事研究和空间研究等“经典”的应用性研究领域中的应用外，现在环境科学中已经获得了重要应用。这主要是由于人们对那些与地球资源、污染和自然资源保护等有关的问题感兴趣的結果。因而导致了人们普遍需要更详细地了解在环境系统和生物机体中的调节原理。上述两个领域相融合的时代已经到来，它促进了无线电科学应用的迅速发展。

我们作为无线电科学家，显然面临着一个前景十分远大的未来——为调查大自然而发展遥感系统。在消极方面是关于污染的监视，在积极方面是关于资源的普查。这里包含了广阔的学科领域，从物理学、化学、地质学、地球物理学、生物学到生态学。显然，我们不可能测量这一非常复杂的控制系统中起作用的所有变量。而要做的工作在于同环境科学家共同研究，力图选择一组能充分描述环境系统的可观察特性。然后，下一步的工作就是按照已经建立的信息论规则，在空间和时间上以适当的分辨力来度量这些状态参量（图A）。

在发展这一新领域中，将无线电科学原理应用于检测与分类至今不可识别特性的客体或现象时，就需要对这些原理及其应用统一处理。本书力图满足这一要求，并企图对现代雷达遥感方法学的基础理论与基本原理作清晰、简要的说明。已经感到，如果把我们的视野限制在雷达遥感上，就有可能提供一个统一的模型，该模型把同样的基本概念应用于所包含的三个问题中，即目标、观察目标的环境，以及插入传播介质。经过统一处理后，就可能综合最优雷达照射（匹配照射）与考虑了目标背景和传播介质特性的“匹配滤波”接收。这实质上意味着，如果充分掌握了感兴趣目标的特征，以及知道背景与插入传输介质，我们就能将这些特征输入计算机的存储器并命令计算机使雷达照射和接收信号的处理以最优的方式适应目标。



图A. 多路传感器原理的艺术构思。现象或客体以下列几种特征域来描述：形状、尺寸、运动模式、材料组成、表面温度及轨迹。

本书是为具有电磁学和反演理论全面知识的高年级学生和科学工作者编写的。书中应用简单的基本原理与初等数学，以便使读者在无参考文献的情况下也能阅读全书。作者希望本书能揭示应用于解决当今有关难题的自适应雷达的一些主要概念，并且也希望读者像作者一样能发现在无线电科学的总领域内其新的发展趋势是鼓舞人心的。

第一章 绪 论

在近10年中，无线电科学已经取得显著进展。这一进展首先是由于人们对无线电通信发生兴趣，以及由于军事上的需要而引起的。随后一段时期中，空间研究成为发展的动力。无线电科学的现阶段的进展主要是由于人们对环境科学、地球资源、污染及自然资源保护等有关的问题越来越关心的结果。

同无线电科学总的进展齐头并进的是一代新的工艺、新的设备与元器件正在发展。固态微波源可以用微处理机进行有效的控制而获得理想的场结构。基于表面声波制成的器件可获得动态匹配接收滤波。新的声光系统与电荷耦合器件在复杂的联机处理与模式识别的应用中有着广阔的前途。

无线电科学家面临着任务艰巨而又鼓舞人心的未来，新的技术成就将在遥测与识别领域中获得重要应用。

本书阐明下述概念：大多数现有的探测或识别系统不能最佳利用人们感兴趣客体的先验信息，而这些先验信息是人们一般可以得到的；在掌握了所研究客体的几何形状与运动模式后，就能设计出最佳的照射与检测系统，该系统能自适应于地形背景中的目标。图1.1是在掌握目标先验信息的基础上对于一般检测或识别问题的艺术构思。

假如已经掌握关于背景（相加噪声）的一般信息和感兴趣目标的特殊信息，则能设计出对目标自适应的雷达，以给出最大总信噪比。实质上，这表明我们面临着要研究三个滤波器功能的问题。其中第一个滤波器取决于观察平台与目标之间的传输介质（这一插入介质引起相乘噪声或畸变）。第二个滤波器是由所观察目标的地形背景决定的。第三个滤波器就是将要讨论的目标

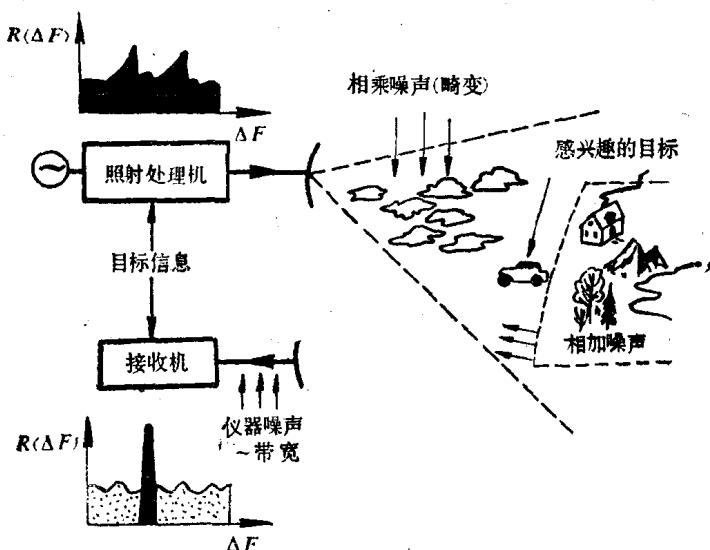


图1.1 一般检测或识别问题的示意图。如果对感兴趣的目
标、插入传播介质及背景具有先验信息，就能设计
照射波形以获得最佳检测与识别能力。

本身。对于某特定目标，单位时间内所需要的信息越详细，则雷达照射器的带宽就必须越宽，并且在所研究的环境与观察平台之间的传播介质的带宽也必须越宽。所以，必须设计照射波形以得到感兴趣目标的最大信息；同时，要保证从插入传输介质产生的有害影响最小（见图1.1）。

为了获得对目标的“匹配”照射，就必须在空间与时间两方面来设计照射。假如有一个可以随意设计的雷达系统，该系统可采用幅度调制（脉冲雷达），则可将雷达的脉冲形状以对于感兴趣的特殊目标回波脉冲能产生最大的影响来设计考虑。如果有一个可以随意设计的雷达照射器，该照射器可以在频率域上设计，则应设计出一个照射频谱，以便获得由目标全部小反射面的相长干涉。

虽然从原理上讲两种方法之间没有什么不同，但在本书中，

将集中讨论多频率雷达系统，并将会看到，该系统能直接应用计算机科学家所熟悉的简单的计算机控制。

在时域上设计出对目标最佳匹配的辐射后，还须在空间控制相位波前获得对感兴趣的特殊反射结构的最大匹配。参考文献〔1〕表明，雷达接收装置采用矩阵天线（二维宽边阵）就可由计算机系统控制各个接收单元的信号相位与幅度，以获得与感兴趣的目标回波的相位波前相匹配的天线系统。同时，由地物背景产生的杂波受到抑制。这种自适应相控阵系统已在许多著作中作了阐述〔1-3〕。本书仅限于讨论多频率雷达。然而，应当指出，从现象学以及从数学方法上来看，在彼此隔开的天线系统与利用多个相参频率的天线系统之间没有什么差异。

第二章 粗糙表面散射—— 基础理论概要

假设有一容积 dv ，在 dv 内的介电常数 ϵ 与场强 E_0 是变化的。
对于入射到该散射容积上的某一平面波，有

$$E_0 = E_1 e^{j(\omega t - k_1 \cdot x)}$$

式中 k_1 (如图 2.1 所示) 为入射波的波数。

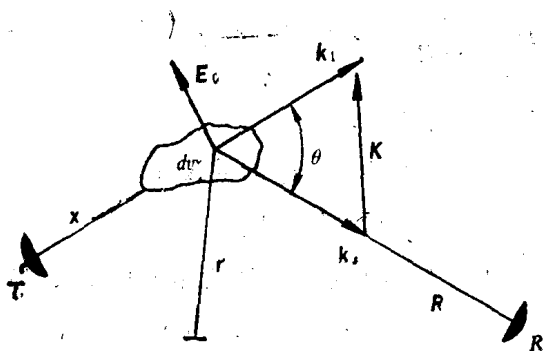


图2.1 基本散射元的散射

如果以 k_s 表示散射波的波数， θ 表示散射角 (k_1 与 k_s 之间的角度)，就可定义差波向量为

$$K = k_1 - k_s$$

于是

$$|K| = \frac{4\pi}{\lambda} \sin\theta/2$$

上式即为在 θ 方向上散射的布拉格(Bragg)条件, λ 为无线电波的波长。

假如在基本散射体 dv 内的介电常数 ϵ 或场强 E_0 与 $\bar{\epsilon}$ 和 $\bar{E}$ 的平均值不同,则产生偶极矩为

$$dP = \Delta\epsilon dv E_0 = \Delta\epsilon dv E_1 e^{j(\omega t - k_1 \cdot r)}$$

在离偶极矩的距离 R 处,极化势 Π 由下式给出

$$d\Pi = \frac{\Delta\epsilon dv E_1}{\epsilon 4\pi R} e^{j(\omega t - k_1 \cdot r - k_2 \cdot R)}$$

在发射机所照射的与接收机所能“见到”的整个容积 V (散射体)内,在极化势的所有因子上对上式积分,得到

$$\Pi = \frac{1}{4\pi R} \int_V f_e(r) E_1(r) e^{j(\omega t - K \cdot r)} dr$$

式中 r 为位置向量,则

$$k_1 \cdot x + k_2 \cdot R = K \cdot r$$

式中

$$K = k_1 - k_2$$

知道了极化势 Π ,就能由下述所熟悉的关系式计算场强 E_s 。

$$E_s = \nabla \nabla \cdot \Pi + K^2 \Pi$$

假设散射体(雷达照射的空间范围)的尺寸比距离 R 小得多($R \gg V^{1/3}$),则

$$k^2 \Pi \gg \nabla \nabla \cdot \Pi$$

于是散射场 E_s 由下式给出

$$E_s \approx k^2 \Pi$$

由基本散射元的积分(略去时间因子 $e^{j\omega t}$)可得到散射场为

$$E_s = \frac{k_s^2}{4\pi R} \int_V E(r) \varepsilon(r) e^{-jK \cdot r} d^3 r \quad (2.1)$$

式中 $K = k_1 - k_s$

k_1 = 入射场波数

k_s = 散射场波数

这样, 如果 θ 为散射角 (k_s 与 k_1 间的角度), 则有

$$|K| = \frac{4\pi}{\lambda} \sin\theta/2$$

式中 λ = 电磁波的波长

必须注意, (2.1) 式是由麦克斯威尔方程导出的, 它是一般式, 而并没有考虑散射体的特性。

$E(r)$ 和 $\varepsilon(r)$ 函数可能是随机的, 在这种情况下, 必须采用统计描述 (空间自相关函数, 空间谱), 或者可能会涉及有序变量, 在这种情况下, 可应用解析函数。[1,4-7]

2.1 不同频率电磁波的相关特性(带宽问题)

现把方法简化一下, 研究一维散射体。将形成散射场的各种因素综合成一个因素, 也就是综合成与散射截面积直接相关的一个因素, 散射截面积是距离的函数。

定义函数 $f(z)$ 为延时函数。该函数具有场强的量纲, 于是, 将 $f(z)$ 函数平方就可得到沿传播方向上作为距离 z (z 沿 K 的方向度量) 的函数的散射截面积。由 (2.1) 式, 有

$$E_s(K) \sim \int f(z) e^{-jK \cdot z} dz \quad (2.2)$$

式中 $K = \omega/c$

必须指出, 延时函数 $f(z)$ 表明了散射元沿传播方向的分布情

况。现在所要研究的是当用电磁波谱照射散射体时（图2.2），关于构成散射体的散射元在深度上的分布情况可得到什么样的信息。根据通信术语，现在来计算反射体的“带宽”。提出的问题是：假如用一组相干（互相关）电磁波照射一个以延时函数 $f(z)$ 描述的物体，那么散射波的相干特性是如何受散射体的形状（受延时函数 $f(z)$ ）影响的？

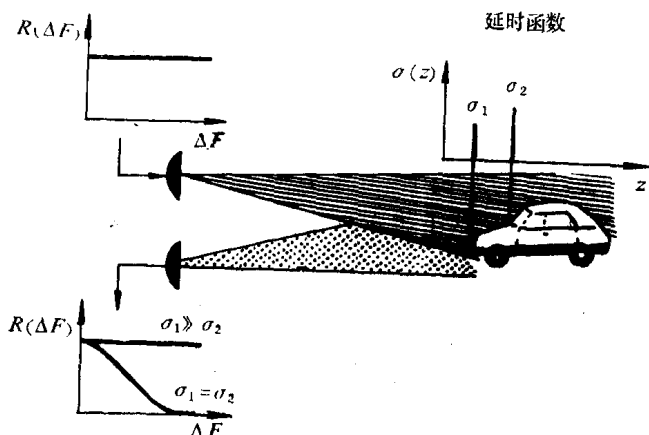


图2.2 用一组相关无线电波照射一物体。散射波的相干特性取决于形成散射体的散射元在深度上的分布 $f(z)$ 。

现从散射场的一般表达式 (2.2) 着手。

$$E(K) \sim V(\omega/c) \sim \int f(z) e^{-jK \cdot z} dz \quad (2.3)$$

上式表明，频率为 ω 的场强或电压（幅度谱）为延时函数 $f(z)$ 的傅里叶变换。

表达不同电磁波间相干程度（带宽特性）的一个便利方法是利用它们复数幅度间的相关函数 $R(\Delta\omega)$

$$R(\Delta\omega) = \frac{E(\omega) E^*(\omega + \Delta\omega)}{|E(\omega)|^2}$$

式中 横线表示统计平均值，它可以是时间平均或总体平均。
因此

$$E^*(K)E(K+\Delta K) \sim \int f(z) e^{jK \cdot z} dz$$

$$\cdot \int f(z+r) e^{-j(K+\Delta K)(z+r)} dr$$

即

$$\overline{E^*(K)E(K+\Delta K)}$$

$$\sim \iint e^{-j(K+\Delta K) \cdot r} dr f(Z) f(Z+r) e^{-j\Delta K \cdot z} dz \quad (2.4)$$

应当指出，这种统计平均值可由若干方法求得。在 n 个不同的 ω 值，对于给定的 $\Delta\omega$ ，可以选择乘积 $E(\omega)E^*(\omega+\Delta\omega)$ ，这样就能得到 n 个独立样本的总体。

另一方面，如果涉及随时间变化的客体（例如海面），可以利用时间平均值。

可以看出，(2.4) 式中第2个因子是延时函数的复自相关函数。由于空间坐标 z （从照射器至散射体的距离）大于增量距离 r ，

所以自相关函数的相位因子（ $e^{-j\Delta K \cdot z}$ 项）随 ΔK 而迅速振荡。

假设从雷达至目标的距离 z 大于目标尺寸，以及假设“拍频波长”

（见图2.4与图2.5） $2\pi/\Delta K$ 也大于目标尺寸，则(2.4)式可化简为

$$\overline{E(K)E^*(K+\Delta K)} \sim e^{-j\Delta K \cdot z} \int R(r) e^{-j(K+\Delta K) \cdot r} dr$$

(2.5)

因此