

雷达分辨理论

A. W. 里海捷克 著

科学出版社

DO 15.1.1

内 容 简 介

本书的主要内容,就单一目标测量、匹配-滤波器雷达、恒速目标的分辨、各种脉冲压缩波形、线性调频信号、相干脉冲序列、分布雷达图示、杂波中的目标检测以及接收机实现比较简单的波形等问题进行了分析和研究。本书对分辨问题处理简明扼要,供从事雷达工作的工程技术人员参考。

August W. Rihaczek

Principles of High-Resolution Radar

McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1969

雷 达 分 辨 理 论

A. W. 里海捷克 著

董 士 嘉 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1973 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1973 年 12 月第一次印刷 印张: 15 1/2

印数: 0001—11,220 字数: 353,000

统一书号: 15031·61

本社书号: 183·15—7

定价: 1.60 元

译 者 序

近十年来,雷达在理论和技术两方面都得到了飞跃的发展。概率论和信息论的研究为雷达的发展奠定了理论基础。反之,雷达的理论研究和实际发展为概率论和信息论开拓了新的领域。

本书专题研究雷达分辨原理,为高分辨力雷达研制提供理论依据。书中就单一目标测量、匹配-滤波器雷达、恒速目标的分辨、各种脉冲压缩波形、线性调频信号、相干脉冲序列、分布雷达图示、杂波中的目标检测以及接收机实现比较简单的波形等问题进行了分析和研究。内容着重论述了分辨原理,对于千变万化的系统和设备不做详细探讨,而且内容尽量以实际应用中存在的或者估计将来可能产生的有关分辨问题作为讨论的重点。

随着我国科学事业的迅速发展,雷达研制进入了一个新阶段。人造地球卫星、火箭导弹的发射成功,都离不开高精度的雷达设备,目标分辨已成为雷达设计中突出的实际问题。为了满足从事这方面工作的读者需要,我们翻译出版了这本书。书中对目标分辨问题的处理简明扼要,是对从事雷达工作的工程技术人员有参考价值的理论书籍。由于我们水平有限,译文中可能还有不少错误之处,欢迎批评指正。

主 要 符 号

a_p	p 阶距离导数的系数
$a(t)$	窄带信号的实数包络或者振幅调制函数
b	多普勒失真系数
B	信号带宽(主要频率的宽度)
c	光速
$C(x)$	Fresnel 积分
d	信噪比
E	实数信号能量
$\text{Env}\{\}$	函数的实数包络
f	频率
f_0	载频
f_i	瞬时频率
$\mathfrak{F}\{\}$	函数的傅里叶变换
$\mathfrak{F}^{-1}\{\}$	函数的傅里叶反变换
$h(t)$	滤波器的实数脉冲响应
$H(f)$	滤波器传输函数的实数表达式
$\mathcal{H}\{\}$	Hilbert 变换
L, L_i, L_r	天线长度
$M(f)$	复数信号包络的频谱
$M_n(f)$	$M(f)$ 的归一化形式
$N(f)$	非白色噪声功率密度谱的复数表达式
$N_0/2$	白色噪声的功率密度谱的实数表达式
p	重复信号模糊函数子表面的序号

- $r(\tau)$ 自相关函数的实数表达式
- R 目标距离
- $\dot{R}$ 距离变化率
- $\ddot{R}$ 距离加速度
- $\text{Re}\{\}$ 函数的实部
- $\text{rect}(t)$ 矩形函数
- $s(t)$ 实数信号
- $\hat{s}(t)$ $s(t)$ 的 Hilbert 变换
- $S(f)$ 实数信号频谱
- $|S(f)|^2$ 实数信号能量密度谱
- $S(z)$ Fresnel 积分
- $S(\tau, \nu)$ 重复信号模糊函数的细微结构
- t 时间
- T 信号持续期 (信号能量主要部分在时间上的宽度)
- $u(t)$ 任意复数函数
- $U(f)$ $u(t)$ 的傅里叶变换(频谱)
- $v(t)$ 任意复数函数
- $V(f)$ $v(t)$ 的傅里叶变换(频谱)
- $X(\tau, \nu)$ 宽带模糊函数
- $Z(f)$ 滤波器传输函数的复数表达式
- α 线性调频常数
- β 均方根信号带宽
- β_0^2 频谱的二阶矩
- $\gamma, \gamma_0, \gamma_1$ 距离加速度系数
- δ 均方根信号持续期
- $\delta(x)$ 狄拉克 δ -函数
- $\delta_c(t)$ 复数 δ -函数

Δ_t	与时间有关的信号双程延迟
$\zeta(t)$	滤波器的复数脉冲响应
$Z(f)$	滤波器传输函数的复数表达式
$\eta(\tau)$	滤波器响应的复数表达式
$\theta(f)$	$M(f)$ 的相位函数
$\lambda, \lambda_0, \lambda_1$	波长
$\mu(t)$	复数信号包络
$\mu_n(t)$	$\mu(t)$ 的归一化形式
$M(f)$	复数包络的频谱
ν, ν_0, ν_1	多普勒系数
ν_b	匹配-滤波器响应尖峰在多普勒上的半功率宽度(多普勒分辨元的宽度)
$\rho(\tau)$	自相关函数的复数表达式
$\rho_n(\tau)$	自相关函数的归一化形式
σ_R	距离标准偏差
σ_v	多普勒标准偏差
σ_τ	延迟标准偏差
$\sigma(\tau, \nu)$	延迟和多普勒上的雷达横截面积分布
τ, τ_0, τ_1	滤波器响应的时间变量, 信号延迟
τ_b	接收机响应主峰在时间上的半功率宽度(延迟分辨元的宽度)
τ_d	滤波器延迟
$\tau_g(f)$	群延迟
$\phi(t), \varphi(t)$	窄带信号的相位调制函数
$\Phi(t)$	实数信号的整个相位函数
$\chi(\tau, \nu)$	延迟和多普勒上的匹配-滤波器响应(模糊函数)
$\chi_s(\tau, \nu)$	模糊函数的对称形式

$\chi_{12}(\tau, \nu)$	交叉-模糊函数
$\chi_c(\tau, \nu)$	相同信号序列中一个信号的模糊函数
$\phi(t)$	复数“解析”信号
$\phi_n(t)$	$\phi(t)$ 的归一化形式
$\phi_R(t)$	复数信号的接收形式
$\phi_T(t)$	复数信号的发射形式
$\Psi(f)$	复数“解析”信号的频谱
$\Psi_n(f)$	$\Psi(f)$ 的归一化形式

目 录

主要符号	(I)
第一章 绪论	(1)
第二章 波形分析基础	(9)
§ 2.1 实数信号	(9)
§ 2.2 实数信号的复数表示法	(14)
§ 2.3 窄带信号实数和复数表达式的比较	(20)
§ 2.4 滤波器和复数-信号表达式	(23)
§ 2.5 匹配-滤波器	(27)
§ 2.6 波形参数	(35)
第三章 单一目标测量	(42)
§ 3.1 测距模型和模糊	(42)
§ 3.2 脉冲压缩雷达	(52)
§ 3.3 运动目标测量	(58)
§ 3.4 运动目标的测量精度	(67)
§ 3.5 天线波瓣图和方向测量	(78)
§ 3.6 波形和天线波瓣图的相互作用	(85)
第四章 匹配-滤波器雷达分辨	(90)
§ 4.1 模糊和分辨	(90)
§ 4.2 单一参数分辨	(95)
§ 4.3 邻近-目标极限分辨能力	(102)
§ 4.4 距离和距离变化率的联合分辨	(114)
§ 4.5 匹配-滤波器雷达分辨理论推广	(117)
第五章 恒定距离变化率目标分辨理论	(121)
§ 5.1 模糊函数特性	(121)

§ 5.2	雷达不确定关系	(129)
§ 5.3	距离和距离变化率联合分辨的基本限制	(135)
§ 5.4	从目标分辨设计波形	(147)
§ 5.5	失配接收机抑制自身-杂波	(152)
第六章	脉冲压缩波形	(161)
§ 6.1	信号的类别	(161)
§ 6.2	调频波形的特性	(163)
§ 6.3	基本调频波形	(170)
§ 6.4	信号的重复	(187)
§ 6.5	信号重复和编码	(195)
§ 6.6	固定载频脉冲的相移编码和频移编码	(217)
§ 6.7	貌似噪声波形	(227)
第七章	线性调频波形	(230)
§ 7.1	线性调频和脉冲压缩雷达	(230)
§ 7.2	线性调频信号特性	(235)
§ 7.3	测量特性	(250)
§ 7.4	分辨特性	(256)
§ 7.5	线性调频波形的体积分布	(260)
§ 7.6	推广到大时间-带宽乘积	(266)
§ 7.7	非恒定距离变化率和平方相位失配	(278)
第八章	相干脉冲序列	(292)
§ 8.1	脉冲序列和高分辨力雷达	(292)
§ 8.2	均匀脉冲序列	(294)
§ 8.3	均匀脉冲序列的加权	(302)
§ 8.4	重复周期参差	(314)
§ 8.5	脉冲间相移编码	(318)
§ 8.6	脉冲间频移编码	(322)
§ 8.7	高度复杂的脉冲序列	(329)

第九章 分布目标的雷达图示.....	(336)
§ 9.1 目标模型	(336)
§ 9.2 雷达图示方程	(339)
§ 9.3 点目标理论应用于分布目标	(344)
§ 9.4 图示性能	(349)
第十章 干扰中目标检测.....	(355)
§ 10.1 分辨和杂波	(355)
§ 10.2 抑制平稳杂波的最佳滤波器	(358)
§ 10.3 杂波在距离和距离变化率上的分布	(370)
§ 10.4 相干和非相干脉冲积累抑制杂波	(377)
第十一章 分辨理论推广.....	(385)
§ 11.1 载频项具有高阶距离导数的模糊函数	(385)
§ 11.2 载频项具有距离加速度的模糊函数	(390)
§ 11.3 具有距离加速度和忽略波形失真的目标 分辨	(395)
§ 11.4 宽带信号的延迟-多普勒模糊函数	(399)
§ 11.5 具有大时间-带宽乘积的脉冲序列	(407)
§ 11.6 弹道容纳和排斥	(414)
第十二章 简易多普勒处理波形.....	(422)
§ 12.1 多普勒不变和多普勒公差	(422)
§ 12.2 具有多普勒-不变复数包络的波形	(428)
§ 12.3 多普勒-公差脉冲序列	(434)
§ 12.4 多普勒-公差脉冲序列的测量特性	(439)
第十三章 综合孔径雷达.....	(446)
§ 13.1 系统性能	(446)
§ 13.2 地面图示雷达的脉冲工作	(459)
§ 13.3 分辨、模糊和畦宽	(464)
§ 13.4 处理原理	(472)

第一章 绪 论

雷达的基本用途是检测感兴趣的目标和提供有关目标位置、运动、尺寸和其他参数的信息。第一个任务称作目标检测问题。这个任务是由发射一个电磁信号和在不可避免的系统噪声中检测目标回波来完成的。如果一个强度足够的回波信号被接收之后,进一步分析确定目标距离、方向、后向散射的横截面积,等等。这样的分析称作参数估值。

从各种源进入雷达系统的噪声妨害目标检测和参数估值。噪声可以覆盖目标回波,但亦可以产生虚假回波。结果,真正目标可能检测不出来,而在没有目标的地方,却可能指示出目标。即使回波信号可以非常可靠地认出,噪声可以使它在时间上漂移,改变它的振幅或者具有其他对测量有害的影响。通过良好的系统设计,作为不可预估的误差的主要来源的噪声仍旧存在,限制可以获得的测量精度。

目标检测和参数估值是个实际难题,特别是在目标很小和距离很远时。然而,原理上,当处理单个目标时,上面两个任务都非常简单。为了确保目标检测,设计者仅需确保接收信号包含足够的能量,以便从噪声中看到回波。如果发射信号参数合理选择,则适当的信号能量同样能够保证测量精度。当必须对几个目标同时完成检测和参数估值时,就发生对雷达能力的实际考验。这就是目标分辨力问题。

因为检测、参数估值和分辨是同一测量过程的几个部分,必须小心避免混淆这些名词。目标检测是指从系统噪声中认出回波的任务。与此相似,噪声对测量精度的影响在于干扰

噪声使参数估值产生不确定性。与此对照,分辨取决于其他目标的干扰,虽然高的信噪比保证良好的检测性能和高的测量精度,但对于目标分辨,它仅仅是一个先决条件。

为了说明分辨力的含意是什么,假设对应一个目标接收机输出一个脉冲,且令脉冲强到足够从噪声背景中清楚地看出。如果在观察范围内出现第二个目标,而且它的响应脉冲不和第一个目标的响应脉冲重合,因而可以识别二个分离的回波,两个目标从而都可以被判别。然而,甚至在这种简单的情况下,给分辨力下一个定量的定义仍然困难。倘若两个回波强度可以比拟,如果信噪比很高,则即使两个脉冲有相当大一部分重叠,还是可以非常可靠地认出二个回波。事实上,即使在一个回波比另一个回波弱很多的时候,倘若接收机响应的形状是完全知道并且稳定的,则可以从微小脉冲形变判断有第二个回波的存在。

如果一部雷达以上述方式工作,则定义分辨的困难可以迎刃而解。因此,可以任意地定义——比如说——把响应脉冲半功率点之间的宽度作为相应参数分辨力的数值。即使两个回波的间隔比上述值还要靠近时,还可以认出是两个分开的回波,这一事实也无足轻重,只要理解分辨的含义是什么。不幸,问题仍然非常复杂。

实际的接收机响应永远不会集中成一个宽度确定的单个脉冲。主峰前后总是存在一些低电平响应,它们出现的形式或者是付瓣,或者是一个慢慢降低的尾巴。如果一个目标比另一个目标强得多,即使目标之间的间隔等于许多倍主峰半功率宽度,这类虚假响应也可以完全覆盖第二个目标的响应主峰。而且,在多目标情况下,所有虚假响应可以叠加到这样一个电平,即足以覆盖甚至较强的目标。

因此,雷达的多目标性能取决于响应主峰的宽度和围绕

主峰的低电平响应。一般讲来,利用雷达系统单个参数来定义分辨力是不可能的。如果对一种情况得到一个有意义的参数,而在其他应用中,它并不描述雷达性能。因此,分辨力一般地定义为从所有其他目标干扰中认出一个特定目标的能力。完成这个任务的雷达潜力及其基本限制是本书的主要课题。

根据上面的定义,只有在信噪比高到足以允许在系统噪声中可靠地检测目标时,才有可能企图进行目标分辨。这意味着,分辨问题可以和检测问题与参数估值问题分别处理。

下面仅讨论单一目标的检测和测量精度,但这仅作为分辨问题的一个入门。为了陈述后面发展的那类分辨理论,现在给出目标分辨问题的一个概要论述。

假设雷达利用发射一个连续波(CW)信号来测量单个固定目标距离。假定目标有效地集中成一个点。如果电波反射不发生相移,或者相移已知,则目标距离可以通过发射信号和接收信号相位比较得到。问题就在于必须计算整周期的数目,但这仅仅是一个适当的系统设计问题。当雷达波束内存在第二个目标时,就产生更为基本的困难。组合回波不能和单个目标回波区别,因为两个正弦波叠加成为另外一个正弦波,不可能确定出现多少目标。因此,一个连续波没有能力分开固定目标。

为了获得距离分辨能力,必须避开连续波信号及其周期性,以及任何振幅重复达到高电平的其他信号。因此,代替连续波信号的单根谱线,必须采用如图 1.1 所示的延伸到零频率的连续频谱。相应的时间函数是单个波峰,允许非模糊地确定双程延迟和分离两个回波。然而不幸,这样的宽带信号对于发射完全不切实际。

作为强信号起伏和采用宽带信号两种困难之间的一个折

表,通常采用如下方法:图 1.1b 的信号带宽选择满足距离上靠近的二个目标回波分离的要求。为了获得可以发射的一个窄带信号,便将这波形加在频率足够高的载波上(图 1.2)。距离的确定仍然取决于延迟测量,然而,现在是调制信号的延迟。

因为载波的任务是使信号容易发射,它通过包络检波被除去。

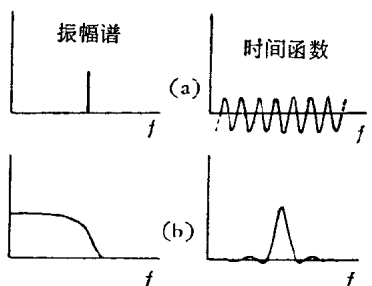


图 1.1 单根谱线的距离模糊和用填满频谱抑制模糊

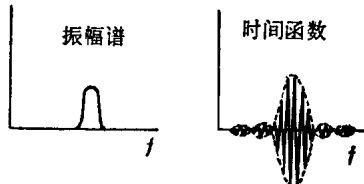


图 1.2 实际窄带雷达信号
频谱和时间函数

既然距离精度和距离分辨率决定于接收机响应尖峰的窄度,而回波尖峰宽度又由信号中最高基本频率决定,因此换成调制函数必然降低雷达性能。特别是,采用调制函数代替载波,距离测量精度粗略地按信号带宽和载频之比降低。幸而在大多数情况下,这降低是允许的。例如,频率为 10 千兆赫的 X 波段载波波长为 3 厘米,它远小于通常要求的测量性能。如果采用带宽为 1 兆赫的一个调制函数,则通过粗略推算,相应的波长为 300 米,接近于通常实际的分辨力要求。

下面再来研究距离不同并用一个连续波信号照射的二个目标,其中一个目标在运动。距离每变化半个波长,回波信号相位变化为一周,这个相位变化可以用来从固定目标中识别运动目标。所以一个连续波信号根据相对于雷达的不同运动具有分开目标的能力。因为如果波长很短,一周表示一个较小的距离变化;而且,运动的影响随着时间而增加,所以运动分辨的灵敏度决定于波长和观察时间。和固定目标情况对

照,信号振幅周期性起伏的有害影响可以通过连续计算目标运动引入的相位周数而避免。

虽然采用载波来测量运动是现实的,但是可以对所有测量形式采用调制函数来简化系统。然而,典型的信号持续期和速度成这样关系:从载波变换成调制函数,满意的运动分辨能力不再保留。例如,波长 $\lambda = 3$ 厘米,信号持续期 $T = 100$ 微秒,在时间 T 内产生半个波长距离变化的距离变化率 $\dot{R} = (\lambda/2)/T = 150$ 米/秒。另一方面,如果采用带宽为 1 兆赫的调制函数,有效波长为 300 米,距离变化率 $\dot{R} = 1.5 \times 10^6$ 米/秒。这意味着,信号在距离变化率上失去有价值的分辨能力。典型的调制函数对实际遇到的各类目标运动感觉迟钝。结果,雷达通常采用二种测量原理:对于目标运动,采用载波相位,对于距离测量,采用调制函数。这就是同时要求长信号和大信号带宽的理由。后面将要指出,这亦就是设计高分辨力雷达比较基本困难的原因。

如果调制函数不能测量目标运动,那么,据此推想,目标运动对调制函数的影响必然可以忽略。其实,忽略调制函数“失真”的假设在实际中广泛采用,且允许大大简化分辨理论。因为运动的影响决定于观察时间(信号持续期),而且距离性能由调制函数中最高基本频率(信号带宽)确定,所以上面的假设产生小时间-带宽乘积的信号分辨理论。而这个“小”往往意味着时间-带宽乘积在量级上可以达到 1000,因此这种理论在实际中广泛采用。

另外,许多情况允许假设:目标在信号持续期间以固定距离变化率运动。这个假设是距离和距离变化率联合分辨的小时间-带宽乘积理论的基础,它是分辨理论最简单亦是最重要的部分。后面大部分讨论和这个理论有关。有几章讲到这理论的推广,这些在导弹和卫星时代对距离分辨和运动分辨

的性能要求极高时是有用的。即使这样的要求在实际中不出现,然而,基本分辨理论的各种推广对于深刻理解目标分辨原理很有必要。

在本书讲到的理论中,多半是假设诸目标或者受同样强度的信号照射,或者完全不受照射,从而忽略天线波瓣影响。其实,这就是被分辨的目标全部处在担负雷达分辨能力的同一天线波束里的情况。虽然,以波瓣图为基础的角度分辨力含有类似的模糊和相互干扰的问题,但有根本的区别。距离和运动的同时分辨问题追究到这样的事实:对于测量延迟,信号应该在时间上集中,对于测量目标运动,信号又要在时间上展开。另一方面,天线方向图的副瓣主要是一个可以获得的公差和可以允许的设计代价问题。

因此,波瓣图设计的问题并不那么基本。甚至更为重要,它们通常可以和波形设计问题以及以距离和运动不同为基础的目标分辨问题分开。在这本书中,关于天线波瓣仅讲到使波瓣图的影响能被理解时为止。主要讨论的是关于大信号带宽兼具非常大天线情况下波形和天线波瓣之间的相互影响。

在大部分的讨论中,目标假设为点目标。这种理想化通常并不过分,因为一旦目标宽度从波形分辨能力的意义上说很小,任何目标的作用都好像它的雷达横截面积集于一点。有一些情况,例如雷达地面图示,目标无疑是“延伸”的或成“分布”的。然而,甚至在这种情况下,假设延伸目标由一组独立的点散射体组成,还常常是一个正确的理想化。本书有一章论述点目标理论适合那些情况。当一个人为目标分成许多单个散射中心或者点散射体时,这个理论同样满意地揭示雷达性能。

此处谈到的理论是所谓匹配-滤波器或者相关雷达理论。这是一种雷达型式,接收机设计成可从平稳白色高斯噪声中

作最佳信号测检。匹配-滤波器这个名称起因于这样的事实：接收机脉冲响应，除了时间轴倒置之外，和发射信号具有同样的形状。因此，接收机可以说和发射波形匹配。相关这个名称是由于接收机本质上测量接收信号和发射信号互相关联的程度，换句话说，就是它们相似到什么程度。

乍一看来，研究一个在噪声中信号检测为最佳的雷达的分辨性能似乎很武断。主要依据是根据匹配-滤波器原理已经发展了的实际技术。然而，亦有理论上的依据。按照在叠加的平稳白色高斯噪声中检测信号的理论（这是大多数检测问题的一个有用的理想化），最佳接收机利用最大-似然检测，由匹配-滤波器或者相关器实现。这样一种接收机从判决理论观点来看并不严格最佳。然而，实际上，当情况比较简单时，最大-似然方法产生最佳接收机，或者至少是良好近似。当情况不是这样时，完成一个比最大-似然接收机更好的设备通常既不可能又不实际。因此，当信号被噪声覆盖时，匹配-滤波器接收机及其类似设备几乎普遍采用。

在多目标环境中，情况就比较不清楚，那里一个特定回波必须从噪声及其他目标的干扰的“和”中检测出来。匹配-滤波器概念是否适用就成问题。当然，只要诸目标足够分开并因此能防止回波重迭，则其影响和目标孤立时一样，而匹配-滤波器保留其最佳特性。如果发生强信号重迭，可以从下面两种分辨方法中选择一种来解决。第一种方法是试图修改波形，使回波的有害重迭不出现，这意味着通过适当的信号设计来解决问题，这种方法的可行程度是本书的一个重要课题。这类理论为匹配-滤波器雷达最佳设计提供一个指南，且揭示这种系统的分辨能力及其限制。

解决分辨问题的第二个方法更为基本，本书不予论述。这里，方法是容许多目标回波重迭，且发展目标多重试验的统