



国外信息技术精品丛书



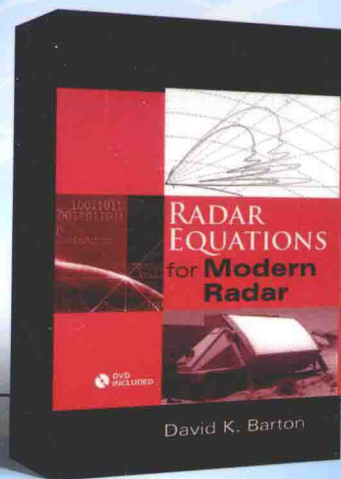
ARTECH HOUSE

BOSTON | LONDON

PRACTICAL BOOKS FOR ENGINEERING PROFESSIONALS

现代雷达的 雷达方程

*Radar Equations
for
Modern Radar*



[美] David K. Barton 著

俞静一 张宏伟 金雪 何芳 石长安 黄丽刚 译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国外信息技术精品丛书

现代雷达的雷达方程

Radar Equations for Modern Radar

[美] David K. Barton 著

俞静一 张宏伟 金雪 译
何芳 石长安 黄丽刚

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以 Blake 的经典研究成果为基础,并根据现代雷达技术的发展,增加了雷达方程中需要考虑的损耗因素数量。本书的进行的扩展使雷达方程能够适应现代雷达设计和分析,通过识别雷达信息和环境信息来预测探测距离,并对雷达性能估算过程可能遇到的各种损耗的来源与计算进行了分析,以期提高雷达距离性能估算的精度。

本书可作为高校雷达工程、系统工程、电子对抗、电子信息工程等相关专业的本科生、研究生的专业教材,也可作为雷达系统设计人员人的参考书。

David K. Barton

Radar Equations for Modern Radar

ISBN-13:978-160807-521-8

Copyright©2012 by ARTECH HOUSE

本书中文简体字版专有出版权由 ARTECH HOUSE 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号图字:01-2013-8330

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代雷达的雷达方程/(美)大卫·K.巴顿(David K.Barton)著;俞静一等译.—北京:电子工业出版社,2016.8
(国外信息技术精品丛书)

书名原文:Radar Equations for Modern Radar

ISBN 978-7-121-29408-2

I. ①现… II. ①大… ②俞… III. ①雷达技术—研究 IV. ①TN95

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第163945号

责任编辑:刘海艳

印 刷:北京京科印刷有限公司

装 订:北京京科印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:18.75 字数:480千字

版 次:2016年8月第1版

印 次:2016年8月第1次印刷

印 数:3000册 定价:69.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,(010)88258888。

质量投诉请发邮件至 zits@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: lhy@phei.com.cn。

译者序

本书由雷达领域著名专家、IEEE 会员、美国国家工程学院的成员 David K.Barton 博士撰写。本书以 Blake 的经典研究成果为基础，并根据现代雷达技术的发展，增加了许多新内容和新观点。全书以提供能够最小化雷达距离性能预测误差的方法为目的，深入研究了雷达距离性能估计过程中可能遇到的各种损耗的分析与计算方法。

通过对本书的学习，可帮助国内雷达系统设计人员能够更准确地估计所要设计雷达系统的性能，也可帮助从事雷达专业的人员，特别是雷达专业的初学者，减少对雷达方程的一些错误认识。

全书共分 10 章，内容编排如下：

第 1 章介绍了雷达方程的发展历程，并对利用雷达方程进行距离估算中可能遇到的错误进行了总结，最后简要介绍了适用于现代雷达的方程。

第 2 章和第 3 章介绍了热噪声环境、杂波环境以及干扰环境下，两坐标搜索、三坐标搜索以及多功能对空监视等多种功能雷达的雷达方程，深入分析了雷达在不同工作环境下的 SNR、SCR、SJR 以及各种损耗的计算。

第 4 章介绍了雷达系统的检测理论，并基于检测理论给出了计算基本检测因子的方法，该方法适应于非起伏目标（0 型）、Swerling 1~4 所描述的起伏目标，以及更为普遍的具有任意自由度的卡方分布的目标回波。

第 5 章~第 9 章介绍了雷达距离估算中可能遇到的各种损耗以及计算方法。第 10 章对这些损耗进行了总结，并将这些损耗划分为降低信号能量和增加所需信号能量的两类损耗。

全书由俞静一组织翻译，并对全书进行了审校，张宏伟、金雪、何芳、石长安等参与了本书的翻译和校对工作。在此对上述各位同志的辛勤劳动表示衷心感谢！另外，在成书过程中，得到了中国洛阳电子信息装备试验中心多位领导和专家的指导和帮助，在此代表全体译者表示衷心感谢！

受译者水平所限，书中难免会出现不能准确表达作者意思或错误之处，敬请读者批评指正。

译者
2016 年 6 月

前 言

本书首先分析了雷达的距离方程，即在给定的信噪比条件下，能够检测到目标的最大距离。从雷达方程在第二次世界大战时期的应用以及 Norton 和 Omberg^①在战后公开论文的论述中能够得到雷达方程的物理原理。以 1947 年 Ridenour 的《雷达系统工程》（*Radar System Engineering*）为先例，后续的关于雷达系统的书籍都总结了雷达方程的推导和不同形式的表述，描述了雷达、目标、检测需求和工作环境的特点。环境影响的复杂性导致了大多数雷达方程的描述和讨论只能在如下环境中给出目标距离：与目标回波相比只有热噪声影响，雷达和目标之间的路径特征由基于距离的大气衰减因子来刻画。

1980 年出版的《雷达距离性能分析》（*Radar Range-Performance Analysis*）中给出了雷达方程最准确的描述，该书的形成主要基于作者 Blake 从 1940 年到 1972 年在海军研究实验室中的工作。该书具有持久的参考价值，并在三十余年后依然出版发行。许多读者都希望获得和理解它。

新版的目的是为了将 Blake 的经典成果进行扩展，确保雷达方程对于现代雷达设计和分析的适应性，通过识别雷达信息和环境信息来预测探测距离，提供改善距离计算精确性的方程和数据。章节目录基本上与 Blake 书中一致，这样读者能够更好地理解 Blake 的研究工作，同时将现代雷达应用的扩展联系在一起。需要特别注意的是，传播影响、建立了不同环境下的距离计算方法，以及构建了许多降低雷达性能的损耗因子。

推导雷达方程有两种相互冲突的方法。根据第二次世界大战期间海军研究实验室的研究工作和 Blake 的扩展研究，我们在此采纳第一种方法。另外，考虑到电波在空间中传播的标准几何关系，采用了匹配滤波器的概念，在对目标的观察时间中，利用输入信号功率谱密度来计算理想（无损耗）系统将获得的最大可能输出信噪比。不考虑波形时，输入信号能量与平均发射功率成正比。一系列损耗因子用于获得实际雷达的输出 SNR，它是目标距离的函数。给定虚警概率，探测距离即为 SNR 满足设定检测概率条件时的距离。该必要条件定义为检测因子，其取决于雷达中实际应用的信号处理方法的细节。

根据第一种方法，按照实际应用中引入的总损耗，雷达效率能够与“理想”系统相比较。损耗预算的验证可能会要求在设计或建模上进行改善，但超越理想系统的性能很明显是不可能的。

另一种方法是把接收机输出端单个脉冲的输出 SNR 计算为功率比，取决于实际雷达设计中的许多因素，如接收机带宽、发射机峰值功率等。大多数情况下，仅利用 SNR 是不能够进行可靠探测的，在计算某个探测距离时，一系列处理增益会使 SNR 满足必要的条件。准确计算后能够获得与第一种方法相同的距离估计值。

第二种方法的弊端在于没有建立用于衡量可用处理增益的性能理论极限。现代雷达采用了复脉冲压缩波形、相参与非相参积累和数字处理技术，因此现代雷达的接收机带宽和处理增益很难明确定义。经常会出现计算出的性能要优于匹配滤波器系统的可用性能，这是因为

^① 见第 1 章后面的参考文献目录。

在分析的过程中错误地使用了级联增益。

美国海军研究实验室需要对新型海军雷达设计的竞标者进行准确的评估，这一需要推动了 Blake 的研究工作。当细节信息遗漏或者以一种保护“专利技术”的方式描述时，它采用了“竞争系统”的手段。第 1 章中描述的 Blake 图表成为了阐明雷达距离性能问题的黄金标准。雷达专业人员可以参考公开出版物获得许多雷达系统设计的重复性结论。

令人惊讶的是随后出版的雷达文章未能利用这部分成果。Blake 将描述雷达方程的章节放到了 Skolnik《雷达手册》(*Radar Handbook*)的 1970 版本和 1990 版本中，但时至今日其他文章使用的雷达方程分母中仍包含“接收机带宽 B ”，从而得到了与带宽成正比的“噪声功率”。雷达初学者总结为当 $B \rightarrow 0$ 时， $\text{SNR} \rightarrow \infty$ ，尽管接收机丧失能力不会改善其检测性能。根据本书第 6 章中给出的公认定义，发射带宽 $B=100\text{MHz}$ 的脉冲压缩波形将使匹配脉冲压缩滤波器的噪声带宽也为 100MHz 。当方程的分母中含有该带宽时，那么大的“脉冲压缩增益”必须包含在方程的某处。当数字多普勒滤波器应用于相参脉冲串或包络检波后进行多脉冲积累时，也会出现类似的混淆。

经验表明，雷达距离方程中包含接收机带宽为 B 很容易导致严重的误差，而这在 Blake 方法中可以避免。

误差的另一个来源是雷达方程的分母中采用了噪声系数 F 和标准温度 $T_0=290\text{K}$ 。当用乘积 $N=kT_0FB$ 作为噪声功率时，其结果对于观测寒冷空域的雷达而言是难以接受的。最近至少一篇文章中将表达式替换为 $N=kT_0(F-1)B$ ，这就意味着当 $F \rightarrow 1$ 时 $N \rightarrow 0$ 。这能够使工作于温度大于 -273°C 的环境中的任何雷达都具有优化的结果。如第 6 章所述，Blake 解决该方法能够在任何环境中都获得准确的结果。

Blake 在雷达方程中包含方向图传播因子 F_t 和 F_r ，解决了一系列复杂的距离计算问题。方程表达式中该因子的缺失即使在文章其他地方讨论传播效应时也会引起误差。

假定 Blake 在其论文和书中采用的方法能够避免这些误差，那么什么能够证明这一命题呢？

首先，在回波和干扰加到热噪声的环境中，Blake 仅仅简要地讨论了检测方程。我们需要关注更多的细节处理，尤其是在干扰情况下不能用高斯概率密度函数和均匀频谱密度来建模。这部分内容将在第 3 章和第 9 章中描述。

其次，当检测概率大于 50% 时，应用分集（时间、频率、空间和极化）是最小化所需能量的重要方法。这部分内容的细节在第 4 章中描述。第 4 章介绍了 Blake 或者其合作者未曾讨论的方法，能够针对不同的雷达和目标模型在个人计算机中计算出检测因子，这些模型支持分集方法来减小检测因子。

第三，在 Blake 的研究工作中，未考虑类似于有源相控阵的新雷达技术在分析中遇到的问题。例如，多功能阵列雷达 (MFAR) 必须经常通过最小化波束位置重叠来节省扫描时间。扫描过程中波束间距的优化需要在扫描时间和获取所需检测概率的总能量之间有所折中。这部分内容在第 5 章中研究。

第四，许多 Blake 的资料素材都混合了公制和“美制单位”，如海里和千尺。我们发现，雷达性能分析中公制单位的一致使用能避免在与其它系统转换时引入误差。当为美国海军和空军以及其他不习惯公制单位的人员提供结果时，分析完成后一个简单的转换就能得到最小机会误差的修正数据。

最后，雷达方程的分母中含有带宽修正因子与检测因子的乘积，通过注意这两个因子的使用矛盾，本书作者希望 Blake 的专业结果将不会折中（见 1.3 节）。Blake 定义和划分的这个因子是带宽和 $B_n\tau \approx 1.2$ 的脉冲带宽最优化乘积的统一，因此只适用于阴极射线管显示器中的可见度因子的相乘。如果在电子检测中应用了检测因子，其结果是乐观的，与理想的和其他 Blake 方法中可达到的精度大约有 2dB 的误差。

雷达方程式中距离计算的精确度应该为多少？Blake 在脉冲雷达探测距离计算的章节最后讨论了该问题，其未采用数字估计技术。Marcum 在其有关检测理论^①的经典著作中阐述了距离计算的缺陷：

使用雷达方程时遇到缺陷的数量几乎没有限制，许多困难在过去的研究工作已经认识到。

他继续论述三个最棘手问题：目标截面积估计、最小可检测信号功率和探测距离作为检测概率函数的统计特性。根据其论述，我们必须增加目标位置的不确定性，这与最大雷达系统响应在四维雷达空间中的点以及不是热噪声环境的其他环境有关。

即使在只有热噪声的环境中，精确性很少能够比所需和获得的能量（等于自由空间的 20%）比要好 3dB。在杂波环境中，精确性降低是不可避免的，即使信杂比的误差仅有 3dB，距离计算误差也可能大于 20%。

1dB 的若干分之几的精确性计算仍是非常有意义的。这就可以选取精确性更高的设计，评估损失的代价能够作为改善设计的指南。经过精细的建模后，增加几分贝的误差是没有必要的，这些误差是由环境不确定性或雷达操作和维护人员的能力引起的。当外场试验中雷达性能不能达到预期时，通常将这种差异归结到几分贝的“外场试验损失”或“操作损失”，实际上，在雷达系统的设计中从未考虑这些损失。

本书旨在提供能够最小化雷达距离性能预测误差的方法，即使这些方法不能完全避免误差的存在。

作者要感谢 Paul Hamilton 博士对原稿的审阅，以及许多同事，尤其是 Harold Ward 和 William Shrader，他们多年的建议成为了理解影响雷达探测距离因子的基本要点。Lamont Blake 是这些同事之一，他的洞察力将指导雷达团队在未来继续努力。

^① 见第 4 章参考文献[4]。

目 录

第 1 章 雷达方程的发展	1
1.1 雷达方程基础	1
1.1.1 最大的可用信噪比	1
1.1.2 需要的最小信噪比	2
1.1.3 脉冲雷达的最大检测距离	3
1.2 原始雷达方程	3
1.3 Blake 脉冲雷达方程	4
1.3.1 Blake 方程中各项的含义	4
1.3.2 求解距离的方法	6
1.3.3 Blake 图表的优势	7
1.3.4 Blake 相干雷达方程	7
1.3.5 Blake 双基地距离方程	8
1.4 雷达方程的其他形式	8
1.4.1 Hall 雷达方程	8
1.4.2 Barton 雷达方程	9
1.5 避免距离计算中的陷阱	11
1.5.1 系统噪声温度 T_s	11
1.5.2 信号-噪声能量比的应用	11
1.5.3 平均功率的应用	12
1.5.4 带宽修正和匹配因子	12
1.5.5 任意目标的检测因子	12
1.5.6 方向图传播因子	13
1.5.7 损耗因子	13
1.5.8 距离计算中常见错误总结	13
1.6 现代雷达系统的雷达方程	14
1.6.1 修正距离方程所需要的因子	14
1.6.2 适用于现代雷达的方程	15
1.6.3 探测距离的计算方法	16
1.6.4 垂直覆盖图	18
1.6.5 要求的检测概率	19
1.7 雷达方程发展总结	20
参考文献	21
第 2 章 搜索雷达方程	23
2.1 搜索雷达方程的推导	23
2.2 用于两坐标空域监视的搜索扇区	25

2.2.1	两坐标监视中的高度覆盖	25
2.2.2	两坐标监视的扇形波束方向图	26
2.2.3	两坐标监视的余割平方方向图	27
2.2.4	固定高度覆盖	27
2.2.5	两坐标监视雷达的上覆盖增强	28
2.2.6	两坐标监视雷达的反射天线设计	28
2.2.7	两坐标监视雷达的阵列天线	28
2.2.8	两坐标雷达所需的功率-孔径积举例	29
2.3	三坐标对空监视	29
2.3.1	堆积波束三坐标监视雷达	30
2.3.2	扫描波束三坐标监视雷达	30
2.3.3	三坐标监视雷达的搜索损耗	30
2.4	多功能阵列监视雷达 (MFAR)	31
2.4.1	MFAR 搜索扇区举例	31
2.4.2	MFAR 搜索的优缺点	32
2.4.3	MFAR 搜索雷达方程举例	33
2.5	搜索屏	34
2.5.1	搜索屏的搜索扇区	34
2.5.2	ICBM 的搜索屏示例	35
2.6	搜索损耗	35
2.6.1	有效能量比的减小	36
2.6.2	所需能量比的增加	36
2.6.3	损耗总结	37
	参考文献	38
第 3 章	杂波和干扰雷达方程	39
3.1	信干比	39
3.2	杂波对探测距离的影响	40
3.2.1	模糊距离杂波	40
3.2.2	雷达波形的类型	41
3.2.3	杂波检测因子	41
3.2.4	杂波的有效谱密度	43
3.2.5	杂波环境下的探测距离	43
3.3	面杂波环境下的检测	44
3.3.1	来自平面的面杂波	44
3.3.2	来自球形地球的面杂波	46
3.3.3	面杂波的截面积	46
3.3.4	面杂波的输入能量	47
3.3.5	陆基 CW 和 HPRF 雷达的探测距离	51
3.3.6	面杂波检测小结	52

3.4	体杂波环境下的检测	53
3.4.1	体杂波的几何关系	53
3.4.2	体杂波的截面积	54
3.4.3	体杂波能量	54
3.4.4	体杂波的检测因子	55
3.4.5	体杂波和噪声环境下的探测距离	55
3.4.6	CW 和 PD 雷达中的体杂波	56
3.4.7	体杂波检测小结	60
3.5	离散杂波的影响	60
3.5.1	虚警的影响	61
3.5.2	噪声虚警概率的需求	61
3.5.3	抑制离散杂波的必要条件	61
3.5.4	离散杂波的影响小结	62
3.6	旁瓣杂波	62
3.6.1	旁瓣中的面杂波	62
3.6.2	旁瓣中的体杂波	64
3.7	噪声干扰中的检测	64
3.7.1	噪声干扰的目标和方法	64
3.7.2	噪声干扰的雷达方程	65
3.7.3	噪声干扰的例子	67
3.8	欺骗性干扰	69
3.8.1	欺骗式干扰的距离方程	70
3.9	干扰中检测小结	72
3.9.1	噪声干扰下的探测距离	72
3.9.2	欺骗式干扰方程	72
3.10	组合干扰下的检测	72
	参考文献	73
第 4 章	检测理论	74
4.1	背景	74
4.2	非起伏目标的检测因子	75
4.2.1	严格非起伏目标的检测概率	75
4.2.2	门限电平	75
4.2.3	严格非起伏目标的检测因子	77
4.2.4	严格单脉冲、非起伏目标的检测因子	77
4.2.5	单脉冲、非起伏目标检测因子的近似	78
4.2.6	n 脉冲、非起伏目标检测因子的近似	79
4.3	起伏目标的检测因子	80
4.3.1	通用的卡方目标起伏模型	80
4.3.2	卡方统计信号的检测	80

4.3.3	Swerling 1 型	81
4.3.4	Swerling 2 型	84
4.3.5	Swerling 3 型	85
4.3.6	Swerling 4 型	86
4.4	基于检波器损耗的近似方程	86
4.4.1	相干检测	87
4.4.2	包络检波和检波器损耗	87
4.4.3	积累损耗	88
4.4.4	积累增益	89
4.4.5	起伏损耗	89
4.4.6	1 型目标的检测因子	90
4.4.7	其他起伏目标的检测因子	91
4.5	分集雷达	91
4.5.1	分集增益	91
4.5.2	分集雷达的信号和目标模型	92
4.6	可见度因子	93
4.7	检测理论总结	95
	参考文献	95
第 5 章	波束形状损耗	97
5.1	背景	97
5.1.1	波束形状损耗的定义	97
5.1.2	角度空间采样	98
5.1.3	关于波束形状损耗的文献	98
5.2	密集采样下的波束形状损耗	99
5.2.1	波束形状损耗的简单模型	99
5.2.2	天线方向图	100
5.2.3	不同方向图下的波束形状损耗	100
5.3	一维扫描中的稀疏采样	101
5.3.1	一维扫描下的计算方法	101
5.3.2	一维扫描下非起伏目标的波束形状损耗	102
5.3.3	一维扫描下 1 型目标的波束形状损耗	104
5.3.4	一维扫描下 2 型目标的波束形状损耗	105
5.3.5	一维扫描下搜索雷达的波束形状损耗	107
5.4	二维光栅扫描中的稀疏采样	109
5.4.1	二维扫描的计算方法	110
5.4.2	二维扫描下非起伏目标的波束形状损耗	111
5.4.3	二维扫描下 1 型目标的波束形状损耗	111
5.4.4	二维扫描下 2 型目标的波束形状损耗	113
5.4.5	二维扫描下分集目标的波束形状损耗	115

5.4.6	二维光栅扫描下搜索雷达方程中的波束形状损耗	117
5.5	使用三角栅格的稀疏采样	119
5.5.1	采用三角栅格时的计算方法	120
5.5.2	使用三角栅格时非起伏目标的波束形状损耗	120
5.5.3	三角栅格时 1 型目标的波束形状损耗	120
5.5.4	三角栅格时 2 型目标的波束形状损耗	121
5.5.5	三角栅格时分集目标的波束形状损耗	123
5.5.6	三角栅格时搜索雷达方程中的波束形状损耗	124
5.6	波束形状损耗小结	125
5.6.1	密集采样下的波束形状损耗	125
5.6.2	稀疏采样下的波束形状损耗	125
5.6.3	处理方法	128
5.6.4	搜索雷达方程中的净波束形状损耗	128
5.6.5	不等间隔二维扫描下的波束形状损耗	129
第 6 章	系统噪声温度	130
6.1	雷达频带中的噪声	130
6.1.1	噪声谱密度	130
6.1.2	噪声统计特性	131
6.2	雷达接收中的噪声来源	131
6.3	天线噪声温度	132
6.3.1	天线噪声温度的来源	132
6.3.2	天空噪声温度	134
6.3.3	来自地表的噪声温度	137
6.3.4	来自天线电阻损耗的噪声温度	139
6.3.5	来自天线失配的噪声温度	140
6.3.6	天线噪声温度的近似	141
6.4	接收馈线的噪声温度	142
6.5	接收机噪声温度	142
6.5.1	有级联电路的接收机中的噪声	143
6.5.2	输入和输出电平	144
6.5.3	量化噪声	144
6.6	接收系统噪声小结	146
6.6.1	与载波频率相关的热噪声	146
6.6.2	Blake 方法的应用	146
6.6.3	现代雷达中的精确方法	146
6.6.4	接收机和量化噪声温度	146
	参考文献	146
第 7 章	大气效应	148
7.1	对流层折射	148

7.1.1	空气的折射指数	148
7.1.2	标准大气	149
7.1.3	包含水蒸气的大气	150
7.1.4	折射率的垂直轮廓线	151
7.1.5	对流层中的射线路径	152
7.2	对流层衰减	153
7.2.1	大气中气体的海平面衰减系数	153
7.2.2	衰减系数随海拔的变化	156
7.2.3	穿过对流层的衰减	157
7.2.4	到距离 R 处的衰减	157
7.2.5	干燥和潮湿大气的衰减	162
7.3	来自降水的衰减	164
7.3.1	293K 下雨水的衰减系数	164
7.3.2	雨水衰减的温度特性	165
7.3.3	降雨速率的统计特性	166
7.3.4	降雪中的衰减	168
7.3.5	云层中的衰减	169
7.3.6	天气对系统噪声温度的影响	170
7.4	对流层的透镜损耗	171
7.5	电离层效应	172
7.5.1	电离层中射线的几何关系	172
7.5.2	电离层结构	173
7.5.3	总的电子数量	174
7.5.4	法拉第旋转	175
7.5.5	信号频谱的色散	177
7.6	大气效应的总结	180
	参考文献	181
第 8 章	方向图传播因子	183
8.1	干涉区域内的 F 因子	183
8.1.1	干涉 F 因子的来源	183
8.1.2	F 因子的应用	184
8.2	射线路径的几何模型	186
8.2.1	方法 1: 远距离目标的平面地球近似	186
8.2.2	方法 2: 任意距离目标的平面地球近似	187
8.2.3	方法 3: 球形地球的一阶近似	188
8.2.4	方法 4: 远距离目标的球形地球近似	189
8.2.5	方法 5: 任意距离目标的球形地球近似	189
8.2.6	方法 6: 任意距离目标在球形地球下的准确表达式	191
8.2.7	近似方法的比较	191

8.3	反射系数	192
8.3.1	菲涅尔反射系数	192
8.3.2	粗糙表面的反射	195
8.3.3	具有植被的陆地表面	197
8.3.4	发散因子	198
8.4	衍射	198
8.4.1	光滑球面衍射	198
8.4.2	刃形衍射	200
8.5	干涉区域	202
8.6	中间区域	203
8.6.1	F 因子关于目标距离的函数	203
8.6.2	F 因子关于高度的函数	204
8.6.3	垂直面覆盖图	205
8.7	方向图传播因子总结	207
	参考文献	207
第 9 章	杂波和信号处理	209
9.1	面杂波模型	209
9.1.1	杂波的截面积和反射率	209
9.1.2	面杂波方向图传播因子	210
9.1.3	面杂波的谱特性	213
9.1.4	面杂波的幅度分布	215
9.2	海杂波模型	216
9.2.1	海水表面的物理特性	216
9.2.2	海杂波的折射率	217
9.2.3	海杂波的功率谱	218
9.2.4	海杂波的幅度分布	219
9.3	地杂波模型	219
9.3.1	地杂波的折射率	220
9.3.2	地杂波的功率谱	222
9.3.3	地杂波的幅度分布	223
9.4	离散杂波	223
9.4.1	离散地杂波	223
9.4.2	鸟和昆虫	224
9.4.3	陆地交通工具	224
9.4.4	风力涡轮机	224
9.5	体杂波的模型	225
9.5.1	体杂波截面积和反射率	225
9.5.2	体杂波的方向图传播因子	226
9.5.3	体杂波的频谱特性	226

9.5.4	体杂波的幅度分布	228
9.5.5	降水杂波模型	228
9.5.6	箔条模型	229
9.6	杂波改善因子	230
9.6.1	相参 MTI 改善因子	230
9.6.2	非相参 MTI 改善因子	232
9.6.3	其他 MTI 考虑	232
9.6.4	脉冲多普勒处理	233
9.6.5	杂波图	235
9.7	杂波和信号处理小结	236
	参考文献	236
第 10 章	雷达方程中的损耗因子	238
10.1	接收信号能量的降低	238
10.1.1	雷达方程中的确定项	238
10.1.2	距离相关响应因子 F_{rd} 的分量	240
10.1.3	系统噪声温度中包含的损耗	242
10.1.4	搜索雷达方程中的损耗	243
10.1.5	天线增益中的损耗	244
10.2	所需信号能量中的增量	246
10.2.1	统计性损耗	246
10.2.2	基本检测因子中的损耗	249
10.2.3	匹配和带宽损耗	250
10.2.4	波束形状损耗 L_p	251
10.2.5	信号处理损耗 L_x	252
10.2.6	杂波检测因子中的损耗	258
10.3	视觉检测中的损耗	262
10.3.1	可见度因子中的损耗	262
10.3.2	显示器上的丢失损耗	263
10.3.3	带宽修正因子 C_b	263
10.3.4	操作员损耗 L_o	263
10.4	损耗因子小结	263
	参考文献	264
	符号列表	266
	附录 A 本书所附电子文件的内容	279
	作者介绍	284

雷达距离方程在第二次世界大战中发展起来,用于分析雷达系统的性能,并对那个年代有限的雷达设计方案选择提出指导意见。由于军事安全的需要,这方面最早的文献直到战后才发表并广泛传播开来。

雷达测距的基本方法和早期雷达测距方法是一致的,第一篇公开发表的关于雷达方程的文章进行了总结:1947年,Norton和Omberg在美国海军研究实验室发表了相关文章,我们把那个方程称为原始雷达方程^[1,2]。本章,我们回顾雷达方程发展的步骤,讨论如何改进它的形式使之适用于现代雷达系统的分析和设计。为了避免不同作者使用不同的符号,我们把文献中的符号替换成了统一的符号。符号的定义在本书结尾的附录A中。这使得我们能够直接比较这些方程在解决当前问题方面的局限性和实用性。

▶▶ 1.1 雷达方程基础

雷达方程的目的是在特定的雷达、目标、环境参数下计算出雷达的最大作用距离 R_m 。本章中讨论的雷达方程仅限于热噪声环境。热噪声影响回波信号的检测,回波信号必须在与热噪声的竞争中获胜才能被检测。其他环境的方程将在第3章讨论。

雷达方程的推导主要有以下3步:

- (1) 用给定的参数将最大信噪比表示为距离的函数;
- (2) 表示出满足检测条件时的最小信噪比;
- (3) 结合这些表达式解出满足特定雷达需求的最大作用距离。

▶▶▶ 1.1.1 最大的可用信噪比

信噪比早在第二次世界大战中就由North所从事的秘密工作得出结论,后来发表在IEEE的论文集中,当接收系统使用与发射波形相匹配的匹配滤波器时,就可以得到最大的信噪比 $(S/N)_{\max}$ 。最大信噪比与波形的能量比 E/N_0 相等^①,其中 E 表示回波信号的能量, N_0 是热噪声的频谱密度。表达式的第一步是在特定系统参数下给出 E/N_0 。在文献[1]中, E/N_0 是通过单脉冲可用能量比定义的,参考点是接收天线的输出端口。本书始终使用这一参考点。

E_p 表示发射脉冲的能量密度,由距离全向发射天线任意距离 R 处测量得到,即

$$E_p = \frac{E_t}{4\pi R^2} \quad (\text{J/m}^2) \quad (1.1)$$

① 注意:本书中的能量比为 E/N_0 ,而不是在某些文章中的 $R=2E/N_0$ 。

式中, E_t 是发射脉冲的能量, 单位为 J; $4\pi R^2$ 是以雷达为圆心、半径为 R 的球面积。假设矩形脉冲的宽度为 τ (s), 峰值功率为 P_t (W), $E_t = P_t\tau$ (J)。对于一个增益为 G_t 的发射天线来说, 主波束轴向的能量密度将增加 G_t 倍。

$$E_p = \frac{E_t G_t}{4\pi R^2} = \frac{P_t \tau G_t}{4\pi R^2} \quad (\text{J/m}^2) \quad (1.2)$$

经过某个雷达截面积为 σ (m²) 的目标反射后, 雷达接收天线接收到的回波能量密度 E_a 为

$$E_a = \frac{E_p \sigma}{4\pi R^2} = \frac{P_t \tau \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (\text{J/m}^2) \quad (1.3)$$

式中, 雷达截面积的定义见文献[4]。

雷达接收天线的有效孔径为 A_r , 获得的能量 E 可以表示为

$$E = E_a A_r = \frac{P_t \tau G_t A_r \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (\text{J}) \quad (1.4)$$

接收天线增益的表达式为

$$G_r = \frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \quad (1.5)$$

式中, λ 表示波长, 我们得到脉冲雷达接收天线输出端口的最大可用信号能量方程:

$$E = \frac{P_t \tau G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (\text{J}) \quad (1.6)$$

到目前为止, 我们考虑了一个理想的情形, 即发射机直接把它的输出送给天线, 并且在发射机-目标-接收机路径上没有能量损耗。为了体现出射频 (RF) 损耗, 在分母上增加因子 L_1 , 即

$$E = \frac{P_t \tau G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_1} \quad (\text{J}) \quad (1.7)$$

式 (1.7) 的推导过程在当今的雷达文献中也可以找到, 但不同的是表达式中, 我们用能量表示发射脉冲和接收脉冲, 而不是用功率表示。

为了找到可用能量比, 接收机直联到接收天线输出端口时, 其噪声频谱密度 N_0 (W/Hz) 可表示为

$$N_0 = kT_s \quad (\text{W/Hz 或 J}) \quad (1.8)$$

式中, k 是玻尔兹曼常数, $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T_s 是系统噪声温度, 单位为 K (见第 6 章)。

结合式 (1.7) 和式 (1.8), 我们可以得到最大可用信噪比:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\max} = \frac{E}{N_0} = \frac{P_t \tau G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_s L_1} \quad (1.9)$$

1.1.2 需要的最小信噪比

推导雷达方程中的第二个表达式给出了雷达获得特定的检测性能所需要的能量比。正如文献[1]中假设的那样, 检测是通过人工观察阴极射线管显示的 n 个连续回波脉冲来实现的。

$$V(n) = \frac{E_{\min}}{N_0} \quad (1.10)$$

式中, E_{\min} 是在最佳观测条件下, n 个脉冲组在显示器上可见的每个回波脉冲的最小能量。这和现在的定义是一致的^[4]。

可见因子 (脉冲雷达): 单脉冲信号能量与单位带宽噪声功率比, 提供了显示器上规定