

高新科技译丛

雷达技术系列

# 雷达目标成像

## Radar Target Imaging

☁ [美] Wolfgang-M. Boerner Herbert Überall 编著

☁ 朱健东 高向东 郭晓莹 韩国强 张玉灵 译



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



Springer

# 雷达目标成像

## Radar Target Imaging

[美] 马丁·伯尔纳 (Wolfgang. - M. Boerner)  
H. 尤伯拉尔 (H. Überall)

编著

朱健东 高向东 郭晓莹 韩国强 张玉灵 译

国防工业出版社

·北京·

# 著作权合同登记 图字:军-2015-025号

## 图书在版编目(CIP)数据

雷达目标成像/(美)马丁·伯尔纳(Wolfgang - M. Boerner), (美)H. 尤伯拉尔(Herbert Überall) 编著;  
朱健东等译. —北京:国防工业出版社, 2017. 4

书名原文: Radar Target Imaging

ISBN 978 - 7 - 118 - 11199 - 6

I. ①雷… II. ①马… ②H… ③朱… III. ①雷  
达目标—雷达成像 IV. ①TN957.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 060930 号

Translation from the English language edition: Radar Target Imaging by W.  
- M. Boerner and H. Überall.

Copy right ©1994 by Springer Science + Business media, LLC.

All rights reserved.

本书简体中文版由 Springer 授权国防工业出版社独家出版发行。  
版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 10½ 字数 198 千字

2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

## 译者序

雷达目标成像属于目标识别的范畴,雷达目标是从雷达回波中确定一个对象的详细属性(大小,形状,结构和组成,以及位置和速度)。进入 21 世纪,雷达目标成像技术得到了长足的发展,已经广泛应用于战场监视、国土资源普查、空间目标探测等众多领域。本书探讨了雷达目标识别和成像的基础理论问题,包括:极化雷达中的矢量信号处理,极化信息对雷达目标识别能力的提升情况;雷达目标散射的数学和物理描述方法,奇点展开法(SEM)和爬行波理论;多维声学逆散射统一理论在电磁波方面的应用。最后,介绍了俄亥俄州立大学“紧缩场”电磁散射的试验测量问题。

由于本书的原版成书于 20 世纪 90 年代,这些基础理论和技术随着后来的发展,已经比较成熟,并应用于现有的雷达成像技术,如极化雷达成像。尽管与当时相比,雷达成像技术已经发展到了一个新的高度,但是公开出版的关于雷达成像或目标识别技术细节方面的学术专著和论文较为匮乏,本书的内容可谓是该方面最基础的理论细节,从对目标识别技术追本溯源的角度来看,本书的内容对今后相关技术的发展仍不失为一本很好的参考书。

本书由朱健东博士、高向东高级工程师、郭晓莹工程师、韩国强助理研究员和张玉灵副教授共同翻译,校对工作由朱健东博士、高向东高级工程师共同完成。在翻译过程中,国家自然科学基金委员会、中国洛阳电子装备试验中心等多家机构给予了关怀和指导。鉴于译者经验和水平有限,有些问题还在进一步深入研究,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

译者  
2017 年 1 月

# 前 言

本书由一系列章节构成,相互之间关联密切,作者分别为各个研究领域的专家。本书论述了近几年成熟起来的多种适用于雷达目标成像的现代方法。这些详细并且经过优化的方法,可用于分析雷达回波,加深我们对物理现象的理解,促进更加精确的雷达成像技术的发展,并影响新一代雷达系统的设计。这些先进的方法分为以下几大类:

(1)解决“逆散射问题”,即对测量到的雷达回波信号进行处理,得出目标形状和特性方面的详细信息。解决该问题,将越来越需要考虑信号的极化状态。

(2)分析目标的共振特性,C. Baum 在其“奇点展开法”中最早指出,该特性由雷达散射幅度的奇点决定。

(3)雷达回波现代测量方法的发展,如俄亥俄州立大学电子科学实验室设计的雷达测试场。

本书所论述的这三类现代雷达问题,可为读者了解雷达散射理论和试验方法的最新发展提供参考,也可为读者进入这一新领域,并开展进一步研究提供指引。

Wolfgang - Martin Boerner

Herbert Überall

1994年4月

# 目 录

第1章 引言 .....	1
参考文献 .....	3
第2章 雷达极化 在雷达系统中的应用 .....	4
2.1 不同雷达目标的极化特性 .....	4
2.2 具体应用中的问题 .....	7
2.2.1 双极化雷达的配置 .....	7
2.2.2 极化自适应 .....	9
2.2.3 雷达系统要求 .....	9
2.3 无障碍情况下目标探测的最优雷达接收机 .....	10
2.3.1 一些最优接收机结构 .....	11
2.3.2 对性能评估的一些评述 .....	13
2.4 通过克拉美罗界评估极化多普勒分辨率 .....	15
2.4.1 信号建模 .....	16
2.4.2 克拉美罗界与最大似然估计 .....	17
2.5 对部分极化干扰的自适应极化对消 .....	23
2.5.1 通过极化自适应提高信噪比 .....	23
2.5.2 极化自适应干扰对消 .....	26
2.5.3 对部分极化干扰的自适应极化对消结果 .....	30
2.6 结论和观点 .....	34
参考文献 .....	34
第3章 对雷达目标的高分辨能力 .....	37
3.1 爬行波与奇点展开法之间的联系 .....	37
3.1.1 Watson 变换 .....	38
3.1.2 奇点展开法:导电目标 .....	40
3.1.3 介质目标 .....	52

3.2	一般形状平滑目标的表面波共振 .....	57
3.2.1	有限长圆柱形空腔 .....	58
3.2.2	有限长导电圆柱体和扁长球体的共振 .....	63
3.2.3	导电椭球体上表面波的相位匹配 .....	70
3.3	逆散射的应用 .....	75
3.3.1	雷达波谱学 .....	76
3.3.2	镀膜导电球体的逆散射问题 .....	81
3.3.3	共振频率的瞬态观测 .....	85
3.4	结论 .....	89
	参考文献 .....	89
<b>第4章</b>	<b>Kirchhoff 或 Born 近似下的多维电磁矢量逆散射统一理论 .....</b>	<b>94</b>
4.1	理想导电散射体和介质散射体电磁散射的积分表示 .....	95
4.2	根据 Born 或 Kirchhoff 近似对平面波入射进行线性化 .....	98
4.3	通用矢量全息场的并矢量后向传播 .....	99
4.4	在频率分集模式下对线性化电矢量 Porter - Bojarski 方程求解 .....	101
4.4.1	Born 近似中的介质散射体 .....	101
4.4.2	Kirchhoff 近似中的理想导电散射体 .....	107
4.5	数值模拟 .....	114
4.6	结论 .....	121
4.A	奇异函数的一些性质 .....	121
4.B	根据散射幅度计算通用矢量全息场 .....	124
	参考文献 .....	125
<b>第5章</b>	<b>雷达截面积测量 .....</b>	<b>127</b>
5.1	测量理论 .....	127
5.1.1	测量的校准 .....	128
5.2	俄亥俄州立大学测量靶场 .....	129
5.2.1	紧缩场的体系结构 .....	129
5.2.2	反射器类型和折中考虑 .....	130
5.2.3	馈电部分 .....	131
5.2.4	测试目标支架 .....	132
5.2.5	测量仪器 .....	134
5.2.6	距离灵敏度 .....	134

5.3	性能分析 .....	135
5.3.1	到达方向 .....	136
5.3.2	近场成像 .....	142
5.3.3	结论 .....	144
5.4	对 RCS 测量结果的分析 .....	144
5.4.1	频域技术 .....	145
5.4.2	视线角域处理 .....	152
	参考文献 .....	157



# 第1章 引言

众所周知,英国发明的雷达(起初称为“潜艇探测声纳”),在第二次世界大战的后期,对战争的结果产生了决定性影响。雷达产业在第二次世界大战后得到了巨大发展,尽管很多民用领域也在使用雷达,如空中和海上交通管制、遥感、气象等,但雷达却主要在军事领域得到了广泛应用。雷达通过目标回波来探测目标,并通过雷达脉冲的传播时间来确定目标位置。雷达可跟踪目标轨迹,还可利用多普勒效应测量目标的径向运动。

目标识别问题,不仅仅局限于目标定位,它要比目标定位难上至少一个数量级。曾经有一架伊朗商用飞机在波斯湾上空因被误判为战斗机而被击落。这一不幸事件也印证了目标识别的难度。根据接收到的雷达回波确定目标详细特征的这一类问题,总称为“逆问题”。而在我们所关注的情况中,它被称为“逆散射”。1971年,C. E. Baum 在科特兰德空军基地(位于美国新墨西哥州的阿尔伯克基)的“第88号交流报告”<sup>[1]</sup>中,提出了一种有可能解决该方法,称为“奇点展开法”(SEM)。该方法基于下述思想:一个目标,如一架飞机,其复共振频率在复频平面上会形成一个图形(pattern),该图形反映了给定(金属的,即导电的)飞机的大小和形状特征。俄亥俄州立大学的 Moffat 和 Mains<sup>[2]</sup>、Van Blaricum<sup>[3]</sup>、Miller<sup>[4]</sup>和其他一些人,一直从事普朗尼级数(Prony series)扩展雷达回波方面的研究。普朗尼级数,由 Baron Prony 于 1795 年在巴黎综合理工学院学报<sup>[5]</sup>上提出。该方法后来也推广到了电介质目标。目前已经出版了大量关于逆问题的文献,读者可参阅专门的《逆问题》杂志,该杂志为《英国物理学报》的 H 部分。文献内容涉及雷达、微波、声信号、地球物理探测等领域,其中提出的一些复杂的数学方法将在第 4 章有所体现。

1677 年,惠更斯发现电磁波具有极化特性<sup>[6]</sup>,它为了解决雷达逆问题提供了一个非常重要的手段。例如,在雷达领域,早在 1977 年 Chaudhury 和 Boerner 就证明,可利用电磁波极化特征更好地确定雷达目标的形状<sup>[7]</sup>。俄亥俄州立大学的 Sinclair 和 Kennaugh,从 1946 年开始率先对雷达极化本身开展了广泛研究<sup>[8]</sup>。

第 2 章由 D. Giuli 编写,主要探讨了极化技术在雷达系统中的应用。其中,对雷达系统的配置进行了讨论,在改进的配置中引入了极化效果,如双极化天线能力;同时,对接收机的极化适应性也进行了描述;还对最佳接收机结构及其性能评估进行了分析,如通过极化适应性提高信噪比。最后的结论是,极化信号处理能够明显提高雷达系统的目标探测能力。

第3章由 H. Überall 编写,详细探讨了 Baum 的“奇点展开法”在各种雷达和微波目标的应用。其中,分别针对导电球体、椭圆球、固定长度的圆柱体以及有电介质涂层的导电球体,计算了它们的复共振频率图;对导电球体与椭球体进行了比较研究(与 P. Moser 的方法相比),并以原子“电平图”的形式,显示出其共振频率实部的分裂与移动;据此可建立名副其实的“雷达波谱”方法,揭示共振频率与目标形状的相关性。研究逆散射最简单的方法是针对关注的目标,编辑一个共振频率目录,然后观察某个给定目标的共振频率,将其与目录中的项进行比较。不过,还可设计出更加系统的方法,如首先研究总体大小,然后再研究细节。例如,在声学中使用的某些方法<sup>[9,10]</sup>就是这么做的。

第3章还进一步将 SEM 与“共振散射理论”(RST)联系了起来,该理论最早设计用于声散射<sup>[11]</sup>,后来在理论与试验方面都得到了高度发展<sup>[12]</sup>。在雷达领域,RST 涵盖了 SEM,但引入了新的物理认识。例如,通过 Watson 变换可以看出,散射场主要受环绕在散射体四周的表面波影响,当这些环形波多次环绕后产生相位匹配时,就会出现共振<sup>[13]</sup>。这同样适用于雷达散射,并举出了相应的实例。对于共振频率的确定,可使用长脉冲引发共振,但对于导体目标来说,雷达共振通常相当宽,因此,举例中使用了有介质涂层的导体。不过,还有一些其他方法(如 Sarkar 的方法<sup>[14]</sup>),可用来提取隐藏在复频平面深处的导体目标宽共振频率。

第4章由 K. J. Langenberg 及其合作者编写,探讨了数学逆散射理论的具体实例,这些理论都源自于基尔霍夫积分方程(Kirchhoff's integral equation)(简要介绍请参见文献[15]等)。这一章中,在根据玻恩近似(Born approximation)对积分方程进行线性化处理的基础上,提出了多维极化逆电磁散射模型。还将矢量全息场作为解决线性化 Porter - Bojarski 积分方程的一种方法进行了介绍。将该模型作为一种数学仿真,利用导电球体的人工数据,对其进行了检验。

以上为本书的理论部分。任何理论,如果得不到精确测量结果的支持或验证,都是索然无味的。第5章由 E. Walton 编写,探讨了雷达截面积(RCS)的测量。主要描述了在俄亥俄州立大学电子科学实验室的小型雷达靶场中,对频域为 1 ~ 100GHz 的单站后向散射进行的 RCS 测量。在该靶场中,利用飞机模型和对模型各个角落的反射回波的测量结果进行了目标识别。该设施可容纳 1.3m 以下多种尺寸的目标。试验中还讨论了测量校准、性能分析、寄生散射体消除、后向投影技术等进行了讨论。最后,从扫描角的函数或频率的函数这一角度,分析了 RCS 测量,并通过距离选通,将频率数据转换到了时域。因此,本章作为这本专著的一章,对一个现代雷达散射截面测量设施及其详细活动方式进行了描述。

本书中汇集了关于雷达目标成像的若干问题,这些问题之间既相互区别,又相互关联,共同介绍了一些先进的雷达目标分析方法的基础知识,这些方法,有的近年来已经成熟,有的目前还在发展之中。读者通过本书,可熟悉了解雷达散射截面分析与目标识别方面的新问题与新方法,为在该领域开展创造性工作做准

备。对于那些熟悉本书中所论述问题的专家,本书可用作相关领域的参考文献。

## 参考文献

- [1] C. E. Baum; "On the Singularity Expansion Method for the solution of electromagnetic interaction problems," Interaction Note No. 88, Dec. 11, 1971, Kirtland Air Force Base, Albuquerque, NM; see also C. E. Baum; "The Singularity Expansion Method," in *Transient Electromagnetic Fields*, ed. by L. B. Felsen, Topics Appl. Phys., Vol. 10 (Springer, Berlin, Heidelberg 1976) pp. 129 - 179.
- [2] D. L. Moffat, R. K. Mains; "Detection and Discrimination of Radar Targets," *IEEE Trans. AP - 15*, 358 - 367 (1975).
- [3] M. L. Van Blaricum, R. Mittra; "Problems and solutions associated with Prony's method for processing transient data," *IEEE Trans. AP - 26*, 174 - 193 (1978).
- [4] E. K. Miller, A. J. Poggio, G. J. Burke; "An integro - differential equation technique for the time - domain analysis of thin wire structures; Part 1, The numerical method," *J. Comput. Phys.* 12, 24 - 28 (1973).
- [5] R. Prony; "Essai expérimental et analytique sur les lois de la dilatabilité des fluides élastiques et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alcool, à différentes températures," *J. l'Ecole Polytechnique*(Paris) 1, 24 - 76(1795).
- [6] C. Huygens; *Traite de la Lumière* (Leyden, Holland 1690).
- [7] S. K. Chaudhury, W. M. Boerner, "Polarization utilization in profile inversion of a perfectly conducting prolate spheroid," *IEEE Trans. AP - 25*, 505 - 511 (1977).
- [8] G. Sinclair, "The transmission and reception of elliptically polarized waves," *Proc. IRE*, 38, 148 - 151 (1950); E. M. Kennough; "Polarization properties of radar reflections," M. Sc. thesis, Dept. of Electr. Eng., Ohio State University, Columbus, OH(1952).
- [9] P. P. Delsanto, J. D. Alemar, E. Rosario, A. Nagl, H. Überall, "Spectral analysis of the scattering of elastic waves from a fluid - filled cylinder," *Materials Eval.* 46, 1000 - 1005(1988).
- [10] H. Batard, G. Quentin; "Acoustical resonances of solid elastic cylinders: Parametric study and introduction to the inverse problem," *J. Acoust. Soc. Am.* 91, 581 - 590(1992).
- [11] L. Flax, L. R. Dragonette, H. Überall; "Theory of elastic resonance excitation by sound scattering," *J. Acoust. Soc. Am.* 63, 723 - 731(1978).
- [12] See, e. g., H. Überall (ed.): *Acoustic Resonance Scattering* (Gordon and Breach, New York 1992).
- [13] H. Überall, L. R. Dragonette, L. Flax; "Relation between creeping waves and normal modes of vibration of a curved body," *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 711 - 715(1977).
- [14] T. K. Sarkar, J. Nebat, D. D. Weiner, V. K. Jain; "Suboptimal approximation/identification of transient waveforms from electromagnetic systems by pencil - of - function method," *IEEE Trans. AP - 28*, 928 - 933 (1980); T. K. Sarkar, D. D. Weiner, J. Nebat, V. K. Jain; "A discussion of various approaches to the identification/approximation problem," *IEEE Trans. AP - 30*, 89 - 98(1982).
- [15] K. J. Langenberg; "Introduction to the Special Issue on Inverse Problems," *Wave Motion*, 11, 99 - 112 (1989).

## 第2章 雷达极化 在雷达系统中的应用

本章探讨的问题,是极化雷达中的矢量信号处理,而这需要从两个正交的极化通道同时接收信号。

在本章的第一部分,将简要回顾不同雷达对象(目标、杂波、干扰)的主要极化特性,探讨设计具备极化能力的雷达系统在实施方面需要考虑的问题。研究在无障碍情况下,目标最优探测的矢量信号处理,以便设计出最优的极化雷达接收机。

另外,还将探讨针对其他目标的矢量信号处理技术。首先,将讨论用于目标参数估算的雷达信号最优矢量处理问题,以便评估利用新增极化信息后雷达分辨力的提升情况;然后,将提出和讨论如杂波和干扰等部分极化噪声的自适应极化对消技术;最后,将在对双极化雷达实测数据进行处理的基础上,研究对这些技术进行性能评估的一些结果。

### 2.1 不同雷达目标的极化特性

如果能够获得雷达信号极化行为属性的相关信息,就可评估通过极化处理技术,雷达性能能够得到的实际提升程度。在本节中,利用对一部S波段空中交通管制雷达进行双极化接收改造后取得的一些测量数据,对不同雷达目标的基本极化特性进行描述<sup>[1,2]</sup>。

利用右旋极化发射,获得了试验结果。两个接收通道分别通过右旋极化和左旋极化来接收,脉冲宽度为 $1.5\mu\text{s}$ ,脉冲重复频率为 $1\text{kHz}$ ,天线扫描周期和对目标的照射停留时间分别为 $4\text{s}$ 和 $20\text{ms}$ 。

数据是通过一个系统获得的<sup>[1]</sup>,该系统允许在一个雷达覆盖窗口内,对双极化信号进行采样和存储。数据采集都是在连续扫描期间,而不是顺序扫描期间完成的。

另外,还获得了一些与极化压制式干扰、飞机回波和地杂波相关的试验结果。包含干扰机噪声的数据,对于所有的分辨单元,都是在一次扫描的一个脉冲重复周期内接收到的。涉及其他类型雷达信号的数据。都是在一次照射停留时间和某个特定的分辨单元内接收到的。

试验结果通过在极化图上进行极化表征来完成,即在赤道面上进行庞加莱表面投影。其中,对于某次特定天线扫描从相同目标得到的所有回波样本,与每个目标回波相关联的极化图都会显示出来。图中还使用了不同的符号来区分不同

旋转方向的正交极化。

就两种不同的采集模式,探讨了由水平极化白噪声干扰源所产生信号的极化表征:在第一种情况下,通过雷达主瓣接收源辐射;在第二种情况下,由雷达旁瓣指向同一个辐射源。由于不同天线的效果不同,观察到了信号轻微的去极化现象(图 2.1)。

对相隔 20s 的两次不同扫描对同一飞机目标的极化特性进行分析,相关的表征显示,在波束照射停留期间,目标回波极化没有大的变化,但对于不同的扫描,平均极化变化显著,保持近似线性的变化(图 2.2)。

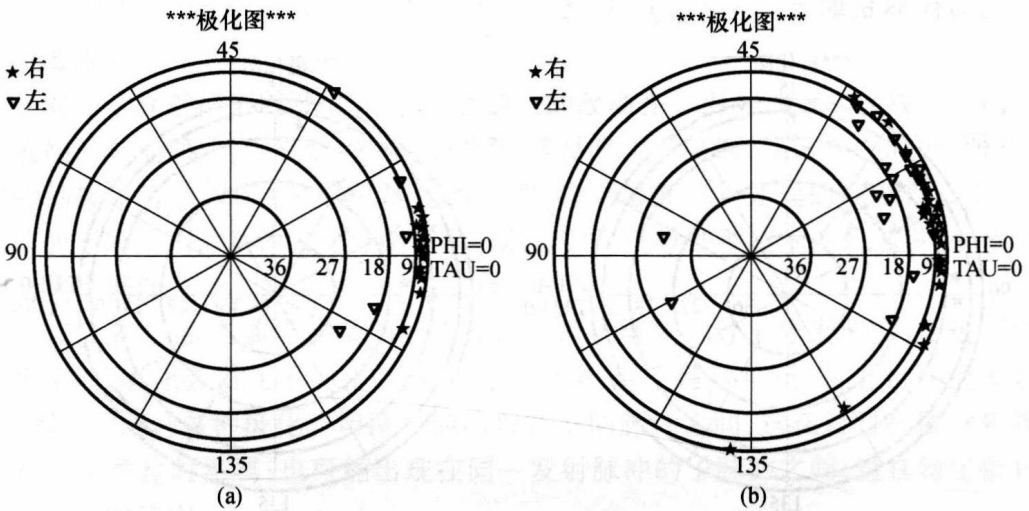


图 2.1 对水平极化干扰噪声的极化表征

(a) 主瓣接收;(b) 旁瓣接收。

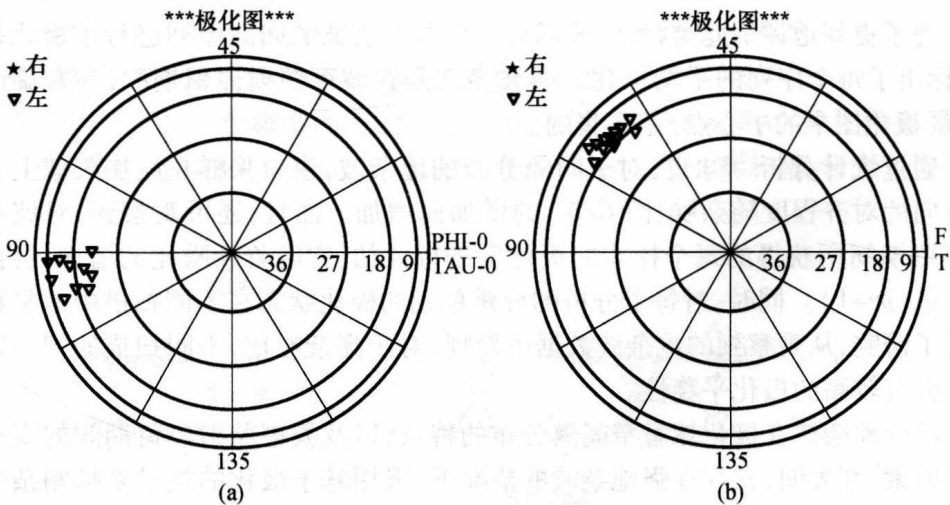


图 2.2 对飞机目标在两次连续扫描中的极化表征



在此对地杂波极化特性的一些的实例也进行了讨论。采用的方法是,借助极化图,对在雷达波束照射停留期间从不同类型地杂波的一个分辨单元中收集的样本序列的极化特性进行表征,包括持续的地杂波现象和聚集的强地杂波。被扫描的地表具有罗马市郊区的浅浮雕特征。

由此可以观察到两个主要特征:第一种情况下(图 2.3),样本的极化状态沿某些优先方向排列;第二种情况下,样本的极化状态在庞加莱球上围绕其短期平均极化状态呈集中分布。如图 2.3 所示,在两种情况下,不同扫描序列的平均极化特性均无大的变化。图 2.3 中所示的地杂波是在两次连续扫描中获得的,两次扫描之间有 8s 的时延。

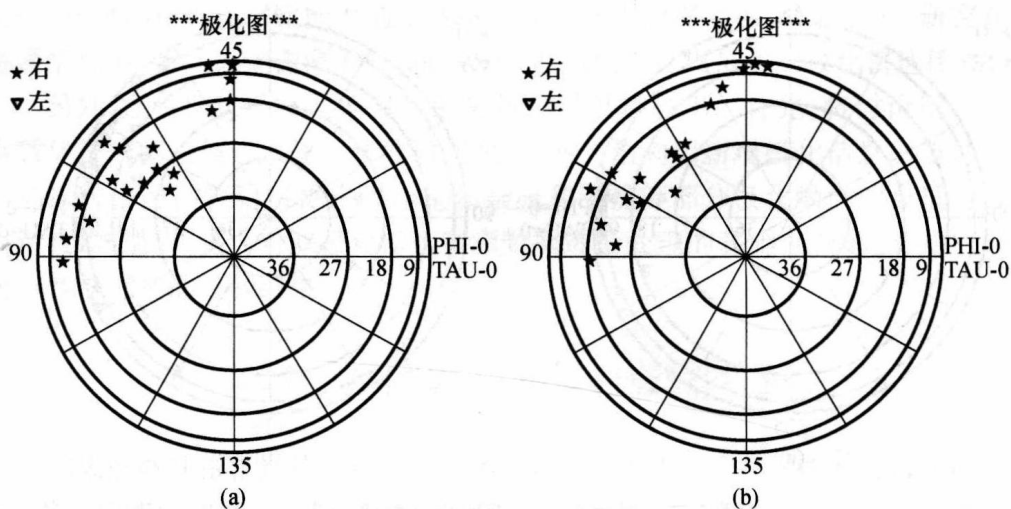


图 2.3 空间分布的地杂波在  $t = t_0$  和  $t = t_0 + 8s$  时的极化表征

(a)  $t = t_0$ ; (b)  $t = t_0 + 8s$ 。

为了更好地评估此类特征,我们对极化图上表征的回波序列进行了极化基转换,标出了每个序列的平均极化。回波序列是在波束照射停留期间,在左旋圆极化点(极化图中的中心点)上采集的。

通过统计分析<sup>[2]</sup>知道,对于间隔分布的地杂波,窗口采样在庞加莱球上沿主要方向的对齐程度随杂噪比( $C/N$ )的增加而增加。而且,还可观察到,对波束照射停留期间所获得的每个样本的极化度进行评估,它随着杂噪比的增加,会接近最大值( $p \approx 1$ )。同时,对每个分析的分辨单元的极化状态在不同扫描中的平稳性进行了研究,从观察到的地杂波数据中发现,对于高杂噪比,不同扫描的同一窗口经常会有较高的极化平稳性。

综合地杂波在极化域呈窄间隔分布的特点,以及波束照射停留期间的高极化度等因素,都表明,在存在强地杂波的情况下,采用基于极化的技术来抑制杂波会收到良好的效果。

在存在遮蔽物造成的强集中地杂波的情况下,需要对飞机目标进行探测时,

该能力会变得更加显著:这是因为在波束照射停留期间,两种现象都高度极化;不同扫描之间目标的平均极化会快速变化;与杂波平均极化的稳态性相比,可有效应用基于极化的方法分辨此类现象,从而大大提高雷达接收机输入的信杂比。

## 2.2 具体应用中的问题

分集极化技术会增加雷达系统的复杂性,尤其是在发射时也需要分集的时候。在设计雷达系统时,这方面需要仔细考虑,尤其是在替代方案已经能够满足系统要求时。

对于常规雷达采用极化方式技术,最大的改动在于射频部分和天线部分。雷达前端的其他部分(中频及视频部分),只需要改成双通道,保证能同时处理正交极化的接收信号。对这些信号的矢量处理,将会增加信号处理的复杂性。不过,这取决于所采用的具体极化分集技术。随着数字信号处理技术的快速发展,成本将会大大降低。

在发射方面,可能需要采用极化分集或极化捷变。对于分集情况,在进行任何发射时,极化必须在不同正交极化之间切换;对于捷变情况,在进行任何发射时,都必须允许各种极化。切换可能出现在不同脉冲之间,这在目标散射矩阵进行直接测量时需要;也可能出现在同一发射脉冲的子脉冲之间,这在特定极化编码技术时使用。

### 2.2.1 双极化雷达的配置

双极化天线能力需要双极化馈源系统。为此,通常会使用双模(正交模式)转换器。这样,对于天线照射,就可生成双线性极化或圆极化。双模变频器本身就能产生双线性极化。发射的实际极化样式由射频激励网络控制。

图 2.4 所示为一个典型的激励网络,用于极化捷变天线的双极化馈源系统。其中, $H_1$  和  $H_2$  为 3dB 电桥; $A_1, A_2$  为微调衰减器; $\varphi_1, \varphi_2$  为移相器; $S$  为双极切换开关。

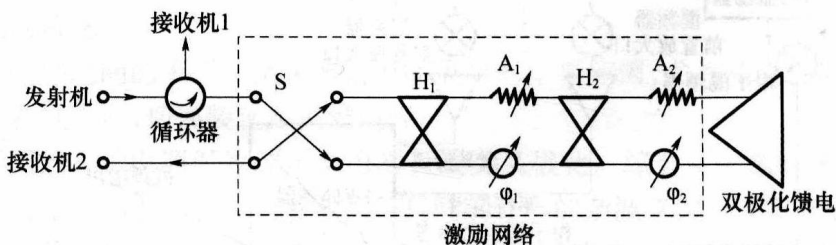


图 2.4 用于单极化馈电的激励网络<sup>[3]</sup>

因此,通过改变移相器的设置,可发射任何极化信号。接收到的正交极化信号被提供给两个单独的通道;不管开关的状态如何,共极信号都会提供给接收机 1。通过开关 S,可交替发射正交极化信号,如果只需要在接收时实现极化分集,则该开关就不需要了。为在发射时实现极化转换,尤其是需要高速切换时,一般使用电压可控的移相器。图 2.5<sup>[3]</sup>给出了单极开关的基本配置,其中,两个移相器设置为 $(\varphi_1 = 45^\circ, \varphi_2 = -45^\circ)$ 和 $(\varphi_1 = -45^\circ, \varphi_2 = 45^\circ)$ ,分别给输出 1 和输出 2 传输能量。利用 PIN 二极管,切换时间可达到数纳秒到数微秒级,并可处理数千瓦到数十千瓦的峰值功率。

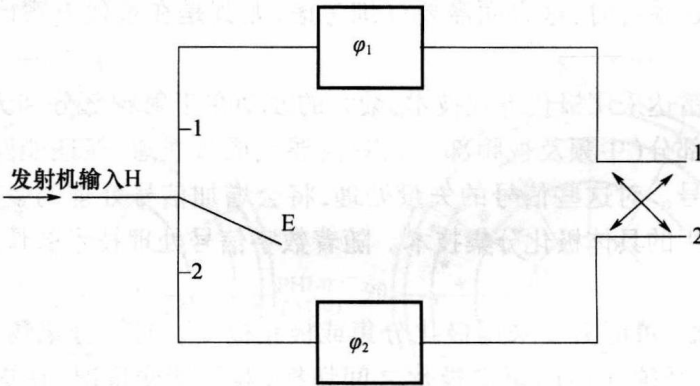


图 2.5 基本的高速射频开关<sup>[3]</sup>

图 2.6 所示为一部中等功率极化捷变雷达反射天线的典型配置,其中,通过改变两个移相器的设置实现了极化发射的捷变。图 2.6 是相干接收时雷达前端的一个简化框图<sup>[3]</sup>。

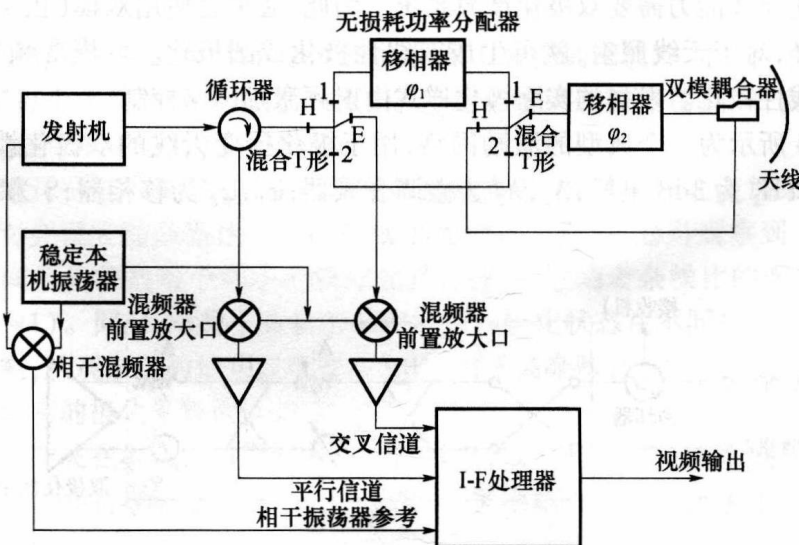


图 2.6 极化捷变雷达



## 2.2.2 极化自适应

应用极化技术,在接收时可能需要极化自适应。对通过两个正交极化通道接收到的两个信号进行自适应处理,就可满足这一要求。事实上,对两个甚至多个接收到的信号进行线性和相干合成,就可以毫无损耗地实现极化自适应。因此,与发射不同,接收极化能够快速实现自适应,也可很容易地变成距离的函数。

当在发射时需要利用极化自适应时,将会使用脉冲到脉冲的极化捷变。然而,在大多数情况下,这种方案却无法使用,因为需要的自适应时间过长。

由 Poelman 提出的虚拟极化自适应技术(VPA)<sup>[4,5]</sup>提供了一种有效的解决方法。这要实现脉冲到脉冲的发射分集:在发射正交极化信号的情况下,对来自同一目标的一对连续回波进行相干和线性合成后,就可提供任意的发射极化。根据对目标极化稳定性的假设,这种技术通过处理两个连续的目标回波就可合成任何极化。

通过 VPA 技术,利用不太复杂的射频硬件和极少的自适应时间,就能够实现极化捷变。不过,它也有一些固有的限制在雷达的实际应用中需要加以考虑:

- (1) 相对于以任何脉冲发射最优极化信号的理想情况,会有探测损耗。
- (2) 至少在接收时,对雷达的相干性有严格的要求。
- (3) 发射时,极化设置会受目标多普勒频率影响。这可能需要多普勒补偿,也会使极化滤波对被处理回波的多普勒频率非常敏感。

## 2.2.3 雷达系统要求

一般来说,如果在信号发射时应用极化分集,则雷达系统至少在接收时需要具备相干性。波形极化编码技术也需要相干发射。但只在接收时应用极化分集的技术,对系统的相干性无严格要求。事实上,接收波的极化状态只取决于双极化信号的幅度和自适应相对相位。不过,人们应用这些技术来提升雷达系统的性能的主要关注点,还是放在基于相干信号处理的方法。

天线交叉极化、射频通道间隔有限,以及旁瓣消减不足,都是影响极化分集雷达能力的主要原因<sup>[6,7]</sup>。这些因素,在妨碍双极化通道之间正交条件的同时,也降低了极化纯度。当波方向角在天线方向图范围内变化时,天线实际极化会发生偏离名义上的极化。

射频组件之间的不匹配是影响通道间隔的主要原因,尤其是在发射功率高的时候。在这方面,切换装置是关键组件。

孔径阻挡和馈电照射效应还会出现天线交叉极化。综合交叉极化率(ICPR)是个非常有意义的参数。特别是对均匀且间隔分布的杂波来说,ICPR 可描述天线及传感器极化的总特性。该参数的定义为天线发射的共极化总功率与发射的交叉极化总功率之比<sup>[6]</sup>。该定义既可用于线性极化,也可用于圆极化。