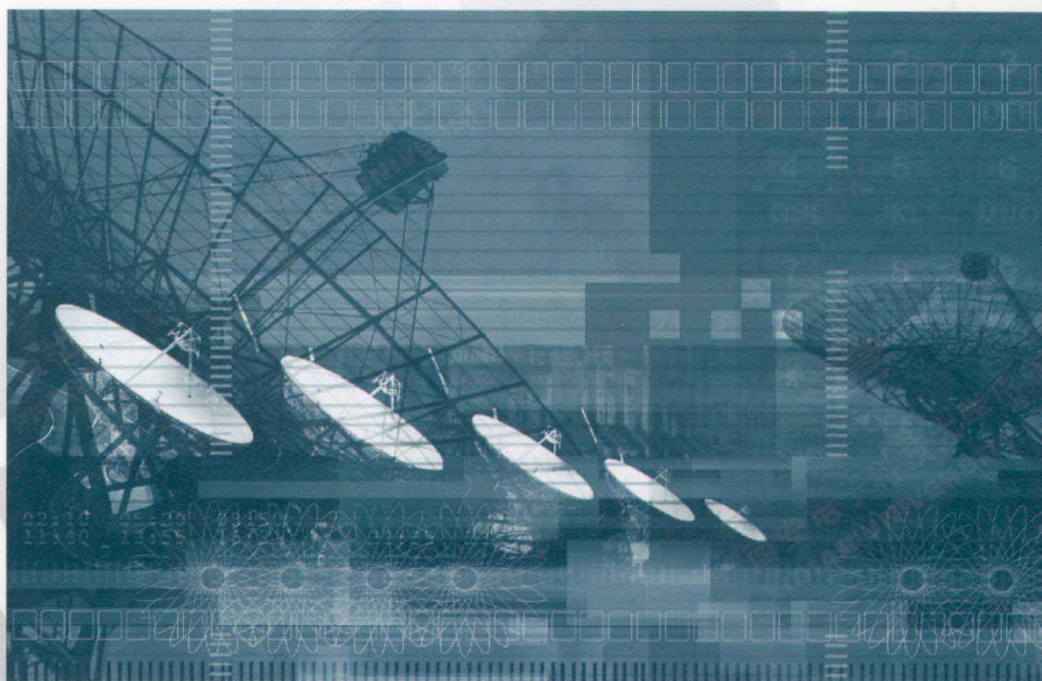


国家自然科学基金资助项目

天线雷达截面 预估与减缩

Prediction and Reduction of
Antenna Radar Cross Section

龚书喜 刘英 主编
张鹏飞 徐云学 姜文 编著



国家自然科学基金资助项目

天线雷达截面预估与减缩

Prediction and Reduction of Antenna Radar Cross Section

龚书喜 刘英 主编

张鹏飞 徐云学 姜 文 编著

西安电子科技大学出版社

2010

内 容 简 介

天线雷达截面预估与减缩是电子战隐身技术领域的关键技术。

本书围绕天线雷达截面的理论基础和减缩技术展开介绍,共分7章。第1章介绍了天线RCS的研究背景与现状;第2章对天线散射的基本理论做了详细介绍;第3章介绍了分析天线RCS的方法;第4章对阵列天线散射的基本理论做了详细分析;第5章对微带天线单元和阵列的数值计算方法做了介绍;第6章对现有减缩微带天线RCS的方法做了总结归纳;第7章介绍了频率选择表面在低RCS天线设计中的应用。

本书在内容上既有深度又有实用性,突出系统性、新颖性、实用性,以基本概念和基本方法为起点,并以此基础引出设计低RCS天线的方法。本书可供从事天线隐身技术领域的广大科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

天线雷达截面预估与减缩/龚书喜,刘英主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-5606-2361-0

I. 天… II. ①龚… ②刘… III. 微波天线—研究 IV. TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 208773 号

策 划 马乐惠

责任编辑 杨宗周 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2010年1月第1版 2010年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 9.125

字 数 30千字

印 数 1~500册

定 价 30.00元

ISBN 978-7-5606-2361-0/TN·0544

XDUP 2653001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

序

隐身技术在现代电子战中的地位愈来愈重要,它是现代战争中提高我方突防能力和安全性能的重要手段。对于低可观测性平台,对其总雷达截面(Radar Cross Section, RCS)贡献较大的却是平台上的天线,因此对天线 RCS 的考虑日益重要。通过改变外形和使用雷达吸波材料等方法可以显著降低军事平台的雷达截面,但是由于天线系统自身工作特点所限制,天线系统的隐身成为隐身技术中难以解决的关键问题。天线 RCS 的研究是一个有技术难度但却具有挑战性的课题,此前与此相关的文献专著在国内外均不多见,本书很好地总结了我国在此领域的研究成果。

本书是关于天线雷达截面预估与减缩的专著,覆盖了天线 RCS 预估与减缩的相关内容,从理论上对天线散射的机理做了分析,并给出了天线 RCS 的计算模型,同时讨论了多种控制天线 RCS 的方法,并给出了基于低 RCS 要求的天线实例。

本书理论结合实际,书中提到的内容在国内外都有一定的创新性,研究成果得到了相关学者的肯定,并提高了国内外学者对该研究方向的研究兴趣。相信本书的出版,对于隐身技术领域的人员可以起到很好的参考作用。

傅德民

2009 年 10 月

前 言

对于高科技综合电子战而言隐身技术得到了大量的应用,因此世界上越来越多的国家正在重视和发展隐身技术。但是对于低可见平台(low-observable platform)来说,对其总 RCS (Radar Cross Section)贡献较大的却是平台上的天线。天线系统必须保证雷达波的正常接收和发射,因此常规的隐身措施(如低 RCS 外形设计、雷达吸波材料技术等)不可能简单地在天线隐身中获得应用,这就使天线系统隐身成为飞行器隐身技术中难以解决的关键问题。即使在国外也没有找到一种既可显著降低天线 RCS 又完全不影响雷达天线工作性能的完全理想的途径,工程上只能在二者之间进行折衷,这就使得此项研究更加重要。

本书内容包括天线雷达截面的理论与隐身技术,重点阐述雷达截面的研究理论、减缩技术和低 RCS 微带天线设计。全书共分 7 章:第 1 章绪论,介绍天线雷达截面的研究背景及进展;第 2 章天线散射基本理论,介绍天线散射的相关理论;第 3 章天线雷达截面分析,介绍天线雷达截面计算的几种方法;第 4 章阵列天线散射理论,介绍阵列天线的辐射与散射的相关理论;第 5 章微带天线与阵列的数值计算,介绍微带天线的数值分析方法及快速算法;第 6 章低 RCS 微带天线设计,介绍具有低 RCS 特性的几种天线设计方案;第 7 章频率选择表面用于低 RCS 天线设计,介绍频率选择表面在低 RCS 天线和阵列天线设计中的应用。

本书内容集中了作者所在课题组近年来在天线 RCS 方面的研究成果,内容新颖,理论与工程应用相结合,对于雷达、电子对抗、隐身技术、反隐身技术、电磁场与微波技术等学科领域的科研人员、高校教师和研究生等,都有较好的参考价值。

本书由龚书喜、刘英主编,张鹏飞、徐云学、姜文等参编。贺秀莲、袁宏伟、王文涛、洪涛、吴涛、崔冠峰、郑军豪、齐娜娜等对本书的编写做了大量的工作。本书承蒙西安电子科技大学傅德民教授审阅,并提出了不少宝贵的意见;本书的出版得到了总装备部预研基金和国家自然科学基金的资助,并得到了西安电子科技大学出版社的大力支持,在此一并致谢。由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者赐教。

编 者

2009 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 天线 RCS 的研究背景	1
1.2 天线 RCS 的研究现状	1
1.3 小结	4
参考文献	4
第 2 章 天线散射基本理论	8
2.1 雷达截面的概念	8
2.2 天线辐射和接收基本理论	10
2.3 天线的散射理论	13
2.4 天线模式项散射的减缩方法	15
2.5 天线散射的其他表达式	17
2.6 小结	18
参考文献	19
第 3 章 天线雷达截面分析	20
3.1 天线 RCS 的分析模型	20
3.2 微带天线 RCS 的分析结果	21
3.3 喇叭天线 RCS 的分析结果	25
3.4 利用互易定理快速计算天线模式项散射	27
3.5 小结	30
参考文献	31
第 4 章 阵列天线散射理论	33
4.1 阵列天线分析模型	33
4.2 阵列天线单元互耦分析	35
4.3 阵列天线散射分析	35
4.4 有源相控阵天线散射分析	37
4.5 舰载有源相控阵天线 RCS 控制	43
4.6 小结	51
参考文献	51
第 5 章 微带天线与阵列的数值计算	53
5.1 微带天线的矩量法分析	53
5.2 微带阵列天线的快速分析	68
5.3 小结	80

参考文献	81
第 6 章 低 RCS 微带天线设计	84
6.1 微带贴片天线单元模式分析	84
6.2 低 RCS 口径耦合微带贴片天线	88
6.3 综合方法设计低 RCS 天线	95
6.4 低 RCS 分形天线设计	100
6.5 小结	107
参考文献	107
第 7 章 频率选择表面用于低 RCS 天线设计	109
7.1 带通型频率选择表面的研究	109
7.2 带阻型频率选择表面的研究	126
7.3 低 RCS 微带天线设计	128
7.4 小结	137
参考文献	137

第 1 章 绪 论

1.1 天线 RCS 的研究背景

电子战(EW)或称电子对抗(EC)就是以现代高新技术为背景的电子侦察与反侦察、电子干扰与反干扰、电子隐身与反隐身的综合战争。隐身技术在现代电子战中占有十分重要的地位。鉴于隐身技术对作战的重大影响,世界上越来越多的国家正在重视和发展隐身技术。

雷达截面(RCS)减缩^[1]技术就是控制和降低军用目标的雷达特征,迫使敌方电子探测系统和武器平台降低其战斗效力,从而提高我方军事力量的突防能力和生存能力。以减小 RCS 为目的的隐身技术包括如下四种基本方法,即外形隐身技术、雷达吸波材料隐身技术、无源对消技术和有源对消技术。最常用的和最为有效的是前两种技术。通过改变外形和使用雷达吸波材料可以减小军事平台的雷达截面,但是对于低可见平台(low-observable platform)来说,对其雷达截面贡献较大的却是平台上的天线,因此对天线 RCS 的考虑变得日益重要。

在飞行器机载设备中,天线是总 RCS 的主要贡献者之一,因此技术人员需要采取措施减小天线 RCS。由雷达罩、雷达天线和雷达舱构成的雷达天线系统,通常在飞行器鼻锥方向产生很强的 RCS 贡献。以一个典型战术导弹在 X 波段水平极化入射的 RCS 为例,在 180°附近的鼻锥区域,其末端制导雷达卡塞格伦天线的 RCS 高达 10 dBsm 左右。对于脉冲多普勒雷达常用的平板裂缝天线阵,其 RCS 可高达 30 dBsm 以上。因此降低天线系统的 RCS 成为目标隐身技术中的一个重要的关键技术。但是由于自身工作特点所限制,天线必须保证自身雷达波的正常接收和发射,因此常规的隐身措施(如低 RCS 外形设计、雷达吸波材料技术等)不可能简单地在天线隐身技术中获得应用。这就使天线系统隐身成为飞行器隐身技术中难以解决的关键问题。即使在国外也没有找到一种完全理想的途径:既可显著降低天线 RCS 又完全不影响雷达天线的工作性能。工程上只能在二者之间进行折衷。这就使得此项研究更加重要。

1.2 天线 RCS 的研究现状

天线 RCS 的理论研究最早可追溯到美国俄亥俄州大学的 R. B. Green 于 1963 年发表

的基于共轭匹配条件的天线散射的一般理论^[1]，而后 R. E. Collin 与 R. C. Hansen 分别于 1969 年和 1989 年发表了基于短路条件和匹配负载条件的天线散射理论^[2-3]。具体关于天线 RCS 的解析研究最早可追溯到 1987 年美国的 E. H. Newman^[4]，他最先研究了不考虑馈电结构的微带贴片的散射特性。在此后的一段时间里，天线 RCS 的减缩和控制经历了一个蓬勃发展的阶段^[5-16]，特别是微带天线的 RCS 减缩问题。1992 年的 IEEE - APS 会议中，第一次开辟了包括 11 篇论文的天线 RCS 专题，而这 11 篇论文全部是讨论微带天线 RCS 的计算和减缩的。由此可见当时各国学者对这种形式的天线用作飞行器的低 RCS 天线所表现出的浓厚兴趣。

天线是一类特殊的散射体，它的散射通常包括两部分：一部分是与散射天线负载情况无关的结构模式项散射场，它是天线接匹配负载时的散射场，其散射机理与普通散射体的散射机理相同；另一部分则是随天线的负载情况而变化的天线模式项散射场，它是由于负载与天线不匹配而反射的功率经天线再辐射产生的散射场，这是天线作为一个加载散射体而特有的散射场。

在以往的这些研究中，无论是针对天线的 RCS 减缩方法还是数值计算方法，更多考虑的是微带贴片的结构，而对带馈电网络的实际天线结构的研究并不多，而在这种状态下计算出来的结果只能是以贴片作为散射体的散射场，它既不是天线的结构模式项散射场，也不是天线模式项散射场。另外，长期以来，天线散射中的结构模式项与天线模式项的求解一直以近似求解的方法为主，因为两者之间的相位差是一个长久以来难以解决的问题。

本书作者所在的课题组于 2000 年开始这方面的研究。课题组在进行天线散射分析时，考虑带实际馈电结构的天线性能不同于以往只是针对贴片的分析，更接近天线的实际性能、更实用化，也更能准确地反映出天线的散射特性。在天线的散射理论研究方面，先提出了一套系统的天线分析理论，利用散射矩阵推导出了天线散射的基本表达式，由该式出发可推导出前人所给出的多种天线散射理论^[17-18]。在此理论研究基础上，进而提出了一个分析天线散射的模型^[19]，利用该模型分别得到天线散射的两个分量，从而解决了天线结构模式项与天线模式项之间相位差这个长久以来难以解决的问题。利用该模型即可求解各种天线的 RCS 特性。

微带天线是一种易于与飞行器表面共形的隐身天线，它具有尺寸小、剖面低、重量轻、成本低且易于广角扫描等优点。为了减小微带天线的 RCS，各国学者已经研究了各种方法。这些方法总结分为三种。

1. 电阻性加载技术

目前较典型的阻性加载减缩微带天线 RCS 的方法有下面几种。一种方法是在微带天线馈电点处采用电阻性加载^[5]。另外一种方法是在微带贴片边缘集总阻抗加载^[9-10]。还有一种方法是在天线边缘处利用垂直于边缘的条带进行分布式阻性加载。上述各种电阻性加载方法的一个显著不足是只能在谐振频率上有较大的 RCS 减缩。一种可在较宽频率范围内实现 RCS 减缩的方法是在微带天线的四周增加一窄的裙围^[10]。这种方法的最大特点是既可以实现宽带隐身，又可使天线增益在工作频段范围内损失不多。初步的试验也证实，调整裙围分布阻值和宽度是一种有效地控制微带天线 RCS 的方法。

2. 容变二极管加载技术^[11]

微带天线可通过有源加载来控制其谐振频率。例如采用容变二极管进行电抗性集总加

载可使天线获得很宽的频率带宽和阻抗带宽。更重要的是,通过调整容变二极管上的偏压,可使天线在某些威胁频率上有最小的散射响应。容变二极管与金属贴片和接地板相连,其位置通常选择在场强最大处。通过改变偏压可移动 RCS 峰值。当天线不工作时,减小或断开偏压可使天线的效率显著降低,因而也就降低了天线的电磁特征。据报导,采用这种方法可获得 10 dB 以上的天线 RCS 减缩效果。

3. 改进天线基片和覆盖层技术

降低微带天线 RCS 通常是以损失天线增益(或辐射效率)为代价的,因此,可采用损耗介质基片和无损耗(或有损耗)介质覆盖层的方法,适当降低天线的辐射效率来达到 RCS 减缩的目的。由于损耗介质的使用,谐振频率和谐振输入阻抗将随辐射效率的降低而减小。通常根据给定的辐射效率和输入阻抗的减小量,采用适当的损耗覆盖层^[6]来实现 RCS 减缩。由于铁氧体材料加上偏置磁场后具有十分显著的非互易特性,利用铁氧体覆盖层加载可对微带天线的辐射特性和散射特性产生不同程度的影响。对于各向同性的互易微带天线, RCS 的减小必然伴随着相应的增益降低。但对非互易性铁氧体^[12]覆盖层加载而言,铁氧体层可以显著地减小入射到微带天线表面上的场强,因而减小微带贴片上的感应电流可使微带天线具有低 RCS 特性。相反,当天线工作于辐射状态时,由于铁氧体的非互易性,此时它起到一个场强放大作用,因而能使天线有足够高的增益。尽管采用铁氧体作为基片的微带天线需要在其接地板下面安装一个提供偏置磁场的装置,从而增加了天线的重量和复杂性,但这种类型的微带天线却能获得其他介质基片所无法实现的对天线 RCS 控制的自由度,而且可通过改变偏置磁场来移动 RCS 峰值。通过施加偏置磁场影响铁氧体基片的性质来实现天线 RCS 控制不失为一种有效的方法^[13]。另外,如果通过电子支援措施(ESM)接收机等手段检测出雷达来波信号的频率,就可根据该频率控制偏置磁场,使天线的 RCS 在这个频率上出现很深的凹陷,从而达到对敌方雷达隐身的目的。

天线 RCS 减缩所面对的最大问题就是天线辐射性能与散射性能的兼顾。在以往文献中,实现 RCS 减缩付出的代价都是天线辐射性能的损失,如增益的降低、带宽的损失等。其实在天线 RCS 减缩和低 RCS 天线设计方面可打破常规的研究方法,通过采用分形天线^[20-33]、开槽天线^[33-35]、口径耦合天线^[36-39]、超宽带天线^[40-42]等多种形式结合来尝试设计出具有较好辐射性能和散射性能的低 RCS 天线^[43-47]。

笔者在国内外发表的成果在天线散射理论研究和低 RCS 天线设计方面具有一定的突破性,相关的研究成果也渐渐引起了国内外同行对天线 RCS 的研究兴趣,而作者的天线 RCS 计算模型也被国内外学者用来进行天线 RCS 的更多的研究。

在对天线单元 RCS 研究的同时,天线阵列 RCS 的研究也受到了很多的关注。阵列的散射是阵列中所有单元共同贡献的结果,阵列的复杂性在于馈电网络。馈电网络中的每一个不连续点都有可能是反射信号源,这些反射信号回到天线口径面,一部分辐射出去,一部分还会由辐射单元反射回馈电网络,然后又逐渐深入到馈电网络,再进行传输与反射。这个过程是很复杂的,所以馈电网络的存在对阵列的散射有着一定的影响。因此在低 RCS 综合中,阵列是一个比较困难的问题。

对于不考虑馈电网络的阵列结构,如微带贴片阵列或者微带振子阵列,已有文献就此类阵列的辐射和散射的数值计算方法进行了一定的研究^[8, 16]。笔者利用矩量法结合快速计

算方法分析了考虑馈电结构的微带天线和天线阵列的 RCS 计算方法^[48-49]。馈电形式包括微带馈电和同轴馈电。笔者对阵列的基本散射理论也进行了一定的研究^[18]，得出了天线阵列的散射同样分为结构模式项和天线模式项两部分。

但是，迄今为止，这些研究对实际工程应用都还是很不够的。实际中广泛使用的阵列如相控阵都是带有复杂阵列的馈电网络，对此类阵列的性能进行详细的研究，设计具有低 RCS 的阵列天线，也是一个急需研究的课题。

1.3 小 结

本章给出了天线 RCS 的研究背景及其研究现状，天线 RCS 的研究是一个具有迫切性同时又有技术难度的研究题目，应当引起国内外学者更多的关注。

参 考 文 献

- [1] Green R B. The General Theory of Antenna Scattering. Report 1223 - 17, Antenna Laboratory, Ohio State University, November 30, 1963.
- [2] Collin R E. The Receiving Antenna, Antenna Theory, Part1. Collin R E and Zucker F J. New York: McGraw-Hill. 123 - 133, 1969.
- [3] Hansen R C. Relationships Between Antennas as Scatters and as Radiators. Pro. IEEE, 1989, 77(5): 659 - 662.
- [4] Edward H Newman, David Forrai. Scattering from a Microstrip Patch. IEEE Trans. on AP, 1987, 35(3): 245 - 251.
- [5] D M Pozar. Radiation and Scattering from a Microstrip Patch on a Uniaxial Substrate. IEEE Trans. on AP, 1987, 35(6): 613 - 621.
- [6] D R Jackson. The RCS of a Rectangular Microstrip Patch in a Substrate-Superstrate Geometry. IEEE Trans. on AP, 1990, 38(1): 2 - 8.
- [7] James T Aberle, David M Poazr, Craig R Birtcher. Evaluation of Input Impedence and Radar Cross Section of Probe-Fed Microstrip Patch Elements Using an Accurate Feed Model. IEEE Trans. on AP, 1991, 39(12): 1691 - 1696.
- [8] Jin-Ming Jin, John L Volakis. A Hybrid Finite Element Method for Scattering and Radiation by Microstrip Patch Antennas and Arrays Residing in a Cavity. IEEE Trans. on AP, 1991, 39(11): 1598 - 1604.
- [9] J L Volakis, etc. Broadband RCS Reduction of Rectangular Patch by Using Distributed Loading. Electronic Letters, 1992, 28(25): 2322 - 2325.
- [10] J L Volakis, etc. Radar Cross Section Analysis and Control of Microstrip Patch Antennas. 1992 IEEE AP-S International Symposium, 1992: 2225 - 2228.
- [11] J T Aberle, etc. Scattering and Radiation Properties of Varactor-Tuned Microstrip

- Antennas. 1992 IEEE AP-S International Symposium, 1992: 2229 – 2232.
- [12] H-Y Yang, etc. Multifunctional Antennas with Low RCS. 1992 IEEE AP-S International Symposium, 1992: 2240 – 2243.
- [13] David M Pozar. RCS Reduction for a Microstrip Antenna Using a Normally Biased Ferrite Substrate. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1992, 2(5): 196 – 198.
- [14] Adrian S King, Wallace J Bow. Scattering from a Finite Array of Microstrip Patches. IEEE Trans. on AP, 1992, 40(7): 770 – 774.
- [15] Feng Ling, Jian-Ming Jin, Scattering and Radiation Analysis of Microstrip Antennas Using Discrete Complex Image Method and Reciprocity Theorem. Microwave and Optical Technology Letters, 1997, 16(4): 212 – 216.
- [16] Vikram Jandhyala, Eric Michielssen, Balasubramaniam Shanker, Weng C Chew. A Fast Algorithm for the Analysis of Radiation and Scattering from Microstrip Arrays on Finite Substrates. Microwave and Optical Technology Letters, 1999, 23(5): 306 – 310.
- [17] Ying Liu, Shu-Xi Gong, De-min Fu. Theory Study of Antenna Scattering. Acta Electronical Sinica, 2005, 33(9): 1611 – 1613.
- [18] Ying Liu, Shu-Xi Gong, De-Min Fu. Scattering Analysis of Antenna Array. Asia-Pacific Microwave Conference 2003 (APMC'03), Korea, 2003 : 1252 – 1255.
- [19] Ying Liu, Demin Fu, Shuxi Gong. A novel model for analyzing the RCS of microstrip antenna. Journal of Electromagnetic Waves and Application, 2003, 17(9): 1301 – 1310.
- [20] X Yang, etc. Fractal Antenna Elements and Arrays. Applied Microwave and Wireless Magazine, 1999, 11(5): 34 – 46.
- [21] C Puente, etc. Fractal Multiband Antenna Based on the Sierpinski Gasket. IEE Electronics Letters, 1996, 32(1): 1 – 2.
- [22] C Puente, etc. On the Behavior of the Sierpinski Fractal Antenna. IEEE Trans. on AP, 1998, 46(4): 517 – 524.
- [23] R Breñen, etc. Printed Fractal Antennas. IEE National Conference on Antennas and Propagation, 1999: 1 – 4.
- [24] Liang Xu. Multiband Characteristics of Two Fractal Antennas. Microwave and Optical Technology Letters, 1999, 23(4): 242 – 245.
- [25] G J Walker, etc. Fractal Volume Antennas. Electronics Letters, 1998, 34(16): 1536 – 1537.
- [26] C T P Song, etc. Fractal Stacked Monopole with very Wide Bandwidth. Electronics Letters, 1999, 35(12): 945 – 946.
- [27] C Puente, etc. Small but Long Koch Fractal Monopole. Electronics Letters, 1998, 34(1): 9 – 10.
- [28] M Sindou, etc. Multiband and Wideband Properties of Printed Fractal Branched

- Antennas. *Electronic Letters*, 1999, 35(3): 181 – 182.
- [29] D H Werner, etc. Radiation Characteristics of Thin-Wire Ternary Fractal Trees. *Electronics Letters*, 1999, 35(8): 609 – 610.
- [30] D H Werner, etc. Fractal Constructions of Linear and Planar Arrays. *IEEE Antennas and Propagation Society*, 1997, 3: 1968 – 1971.
- [31] R V HaraPrasad, etc. Microstrip Fractal Patch Antenna for Multi-band Communication. *Electronics Letters*, 2000, 36(14): 1179 – 1180.
- [32] Ying Liu, Shu-xi Gong, Hong-bo Zhang. A Novel Fractal Slot Microstrip Antenna with Low RCS. 2006 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Albuquerque, New Mexico, USA, 2006: 2603 – 2606.
- [33] S Dey, R Mittr. Compact Microstrip Patch Antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1996, 13(1): 12 – 14.
- [34] G Clasen, R J Langley. Meshed Patch Antennas. *IEEE Trans. On AP*, 2004, 52(6): 1412 – 1416.
- [35] Xiu-Lian He, Shuxi Gong, Qi-Zhong Liu. Meshed Microstrip Patch Antennas with Low RCS. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 46(2): 117 – 120.
- [36] Hall R C, Wu D I. Radar Cross Section of Multilayer Patch and Aperture Coupled Patch Antennas. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1995: 2025 – 2028.
- [37] Peter L Sullivan and Daviel H Schaubert. Analysis of an Aperture Coupled Microstrip Antenna. *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*, 1986, 34(8): 977 – 984.
- [38] Biox R R Losada V Medina F. Determination of the Radar Cross Section of Stacked Circular Microstrip Patches. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, IEEE, 2000, 1: 16 – 21.
- [39] Yang-Xian Hua, Lotfollah Shafai. Characteristics of Aperture Coupled Microstrip Microstrip Antenna with Various Radiating Patches and Coupling Aperture. *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*, 1985, 37(4): 72 – 78.
- [40] J X Liang, C C Chiau, X D Chen, and C G Parini. Study of a Printed Circular Disc Monopole Antenna for UWB Systems. *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 2005, 53(11): 3500 – 3504.
- [41] S Sadat, M Fardis, Fatemeh Geran Kharakhili, G Dadashzadeh. A Compact Microstrip Square-ring Slot Antenna for UWB Applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 2007, PIER 67: 173 – 179.
- [42] San-Ming Hu, Hong-Hui Chen, Choi Look Law, Zhong-xiang Shen, Lei Zhu, Wen-xun Zhang, Wen-Bin Dou. Backscattering Cross Section of Ultrawideband Antennas, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007, 6: 70 – 73.
- [43] Guan-Feng Cui, Ying Liu, Shu-Xi Gong. A Novel Fractal Patch Antenna with Low RCS. *Journal of Electromagnetic Waves and Application*, 2007, 21(15): 2403 –

- 2411.
- [44] Hong-Wei Yuan, Shu-Xi Gong, Xing Wang, and Wen-tao Wang. Scattering Analysis of a Printed Dipole Antenna Using PBG Structures. Progress In Electromagnetics Research B, 2008, 1: 189 – 195.
 - [45] Tao Wu, Yan Li, Shu-xi Gong, Ying Liu. A Novel Low RCS Microstrip Antenna Using Aperture Coupled Microstrip Dipoles. Journal of Electromagnetic Waves and Application, 2008, 22: 953 – 963 .
 - [46] Yan Li, Ying Liu, Shu-Xi Gong. Microstrip Antenna Using Ground-cut Slots and Miniaturization Techniques with Low RCS. Progress in Electromagnetic Research Letters, 2008: 211 – 220.
 - [47] Ying Liu, Shu-Xi Gong. A Novel UWB Clover-disc Monopole Antenna with RCS Reduction. Journal of Electromagnetic Waves and Application, 2008, 22: 1115 – 1121.
 - [48] Xiu-Lian He, Shuxi Gong, Qi-Zhong Liu. On the Scattering of Arbitrary Shape Microstrip Patch. Journal of Electronics (China), 2004, 21(5): 432 – 436.
 - [49] Xiu-Lian He, Shu-Xi Gong, Qi-Zhong Liu. Fast Computation of Spatial Green's Functions of Multiplayered Microstrip Antennas. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 45(1): 85 – 88.

第 2 章 天线散射基本理论

2.1 雷达截面的概念

当物体被照射时,能量朝各个方向散射,散射场和入射场的总和就构成空间的总场。散射能量的空间分布称为散射方向图,它取决于物体的形状、大小和结构,以及入射波的频率、极化等。产生电磁散射的物体通常称为目标或散射体。

当辐射源和接收机位于同一点时,如同大多数雷达工作时那样,称为单站散射。当散射方向不是指向辐射源时,称为双站散射,目标对辐射源和接收机方向之间的夹角称为双站角 γ 。因此,前向散射是 $\gamma=180^\circ$ 的情况,而单站散射(又称为后向或反向散射)对应于 $\gamma=0^\circ$ 。在许多散射测量中,常使用相距很近的分离发射天线和接收天线,严格地说,这是一种双站散射,但由于双站角很小,测量的结果与真正的单站情形并无差别,故有时称为“准”单站散射。

定量表征目标散射强弱的物理量称为目标对入射雷达波的有效散射截面积,通常简称为目标的雷达截面(Radar Cross Section)^[1],它是目标的一种假想面积。接收天线通常被认为是一个“有效接收面积”的口径,该口径从通过的电磁波中截获能量,而出现在接收天线终端的接收功率则等于入射波功率密度乘以暴露在这个功率密度中的天线有效面积。同样,雷达目标反射或散射的能量也可表示为一个有效面积与入射雷达波功率密度的乘积,这个面积就是雷达截面,用符号 σ 表示。对于单站和双站散射,分别称为单站(或后向)雷达截面和双站雷达截面。

通常雷达发射天线和接收天线离目标很远,即到达目标的距离远大于目标任何有意义的尺寸,因此入射到目标处的雷达波可认为是平面波,而目标则基本上是点散射体。如果我们假定该点散射体各向同性地散射能量,那么因为散射场依赖于目标相对于入射和散射方向的姿态,所以假想散射体的散射强度和雷达截面都将随目标的姿态角而变化,即雷达截面不是一个常数,而是与角度密切相关的一种目标特性。

雷达截面的定义是基于平面波照射下目标各向同性散射的概念。入射平面波的功率密度是

$$w_i = \frac{1}{2} \mathbf{E}^i \cdot \mathbf{H}^{i*} = \frac{1}{2Z_0} |\mathbf{E}^i|^2 \quad (2.1)$$

式中, $\mathbf{E}^i$ 和 $\mathbf{H}^i$ 分别是入射电场和磁场的强度, H^{i*} 是入射磁场 H^i 的共轭, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377 \Omega$ 是自由空间的波阻抗。因此雷达截面为 σ 的目标所截获的总功率为

$$P = \sigma w_i = \frac{1}{2Z_0} \sigma |E^i|^2 \quad (2.2)$$

如果目标将这些功率各向同性地散射出去, 则在距离为 R 的远处, 其散射功率为

$$w_s = \frac{P}{4\pi R^2} = \frac{\sigma |E^i|^2}{8\pi Z_0 R^2} \quad (2.3)$$

另一方面, 散射功率可用散射场 E^s 来表示:

$$w_s = \frac{1}{2Z_0} |E^s|^2 \quad (2.4)$$

式中, E^s 是矢量散射场。

由式(2.3)和式(2.4)可解出

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \quad (2.5)$$

因为入射波是平面波, 且假定为点散射体, 所以距离 R 应趋于无穷大, 因此应将式(2.5)更严格地写为

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H^s|^2}{|H^i|^2} \quad (2.6)$$

这就是雷达截面最基本的理论定义式。

如果保留电磁场的矢量性质, 也可得到雷达截面的另一矢量定义式

$$\sigma = \frac{1}{\pi} (\lambda \hat{e}_r \cdot S)^2 \quad (2.7)$$

式中, $\hat{e}_r$ 是接收天线极化方向的单位矢量, S 是矢量散射函数。

$$S = kR e^{ikR} \frac{E^s}{|E^i|} \quad (2.8)$$

式中, $k=2\pi/\lambda$ 是自由空间波数, e^{ikR} 表示从目标到接收天线之间散射场的相移, 而 S 是一个无量纲的矢量函数。

定义式(2.6)中的 R^2 和式(2.7)中的 λ^2 使 σ 具有面积的量纲(m^2)。对于三维几何结构, 散射场 $|E^s|$ 或 E^s 在远区按 $1/R$ 衰减, 因此以上两式分子中出现的 R^2 抵消了距离的影响, 即雷达截面与距离无关。对于二维情况, 虽然它在实际问题中很少遇到, 但对分析相应的三维问题却很有用, 此时散射场按离目标的距离呈 $1/\sqrt{R}$ 衰减, 因而雷达截面的定义稍有区别。

对于二维情况, 散射体为无限长柱体, 雷达截面 σ 变成雷达散射宽度 σ' , 与式(2.6)对应的定义为

$$\sigma' = \lim_{\rho \rightarrow \infty} 2\pi\rho \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} 2\pi\rho \frac{|H^s|^2}{|H^i|^2} \quad (2.9)$$

与式(2.7)定义相对应的是

$$\sigma' = \frac{4}{k} |P^2| \quad (2.10)$$

式(2.10)中 P 对应于式(2.8)中的 S

$$P = \sqrt{\frac{\pi k \rho}{2}} \frac{|E^s|}{|E^i|} \exp\left[j\left(k\rho - \frac{\pi}{4}\right)\right] \quad (2.11)$$

以上各式中的 ρ 是柱体到散射观察点的距离, 散射函数 P 与极化有关, 视电场平行或

垂直于柱体轴线而定。有限长度为 l 的柱形结构的三维雷达截面 σ 与无限长相同结构的二维雷达截面 σ' 之间有如下简单关系:

$$\sigma = \frac{2l^2}{\lambda} \sigma' \quad (l \gg \lambda) \quad (2.12)$$

雷达截面是一个标量, 单位为 m^2 , 通常以对数形式给出, 即相对于 1 m^2 的分贝数(又称分贝平方米, 记 dBsm), 亦即

$$\sigma_{\text{dBsm}} = 10 \lg \sigma \quad (2.13)$$

二维雷达截面 σ' 的单位为 m 或 dBm。

2.2 天线辐射和接收基本理论

本节首先简单阐述天线辐射与接收的一些基本理论, 这些理论在后面天线散射原理的推导中会用到。

2.2.1 天线辐射理论

由电磁流密度($\mathbf{J}$, $\mathbf{J}_m$)在三维无界空间中产生的电磁场如下^[2](媒质参数为 μ , ϵ):

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -j\omega\mu \left(\mathbf{A} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \cdot \mathbf{A} \right) - \nabla \times \mathbf{F} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = -j\omega\epsilon \left(\mathbf{F} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \cdot \mathbf{F} \right) + \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.15)$$

式中

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \int_r G\left(\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}'}\right) \mathbf{J}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (2.16)$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \int_r G\left(\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}'}\right) \mathbf{J}_m(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (2.17)$$

$$G\left(\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}'}\right) = \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \quad (2.18)$$

$$k = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad (2.19)$$

远区电磁场可以表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sqrt{Z} \mathbf{A}(\mathbf{k}) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \sqrt{Y} \hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{A}(\mathbf{k}) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.21)$$

式中

$$Z = \frac{1}{Y} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{k} = \hat{\mathbf{k}} k = \hat{\mathbf{r}} k \quad (2.23)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{k}) = \frac{k}{4\pi j} \int_r [\sqrt{Z}(\hat{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{r}}\hat{\mathbf{r}}) \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') + \sqrt{Y} \mathbf{J}_m(\mathbf{r}') \times \hat{\mathbf{r}}] e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'} d\mathbf{r}' \quad (2.24)$$

式中的 $\hat{\mathbf{I}}$ 为单位并矢。