

射频隐身导论

INTRODUCTION TO RF STEALTH

【美】David Lynch, Jr. 著

沈玉芳 等译

桑建华 等审



西北工业大学出版社

INTRODUCTION TO RF STEALTH

射频隐身导论

[美]David Lynch, Jr. 著

沈玉芳 等译

桑建华 等审

西北工业大学出版社

DAVID LYNCH, JR.

INTRODUCTION TO RF STEALTH

ISBN:1-891121-21-9 and ISBN13 978-1-891121-21-0

Copyright © 2004 by SciTech Publishing Inc.

The Chinese translation edition copyright © 2009 by Northwestern Polytechnical University Press. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Proprietor.

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2009-037号

图书在版编目(CIP)数据

射频隐身导论/(美)林奇(Lynch, D.)著;沈玉芳等译. —西安:西北工业大学出版社, 2009.9

书名原文: Introduction to RF STEALTH

ISBN 978-7-5612-2597-4

I. 射… II. ①林…②沈… III. 射频—无线电信号—研究 IV. TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 109369 号

出版发行: 西北工业大学出版社

通信地址: 西安市友谊西路 127 号 邮编 710072

电 话: (029)88493844 88491757

网 址: www.nwpup.com

印 刷 者: 陕西向阳印务有限公司

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

印 张: 33.625

字 数: 703 千字

版 次: 2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 180.00 元(含 CD-ROM 1 张)

版权所有 侵权必究

《射频隐身导论》编译委员会

主 审 桑建华

副主审 陈益邻 陈加海 吕 剑

主 译 沈玉芳

翻 译 李悦霖 冷洪霞 秦 荀 汪晓红 马洁萍
谢文婷 杨晶晶 马丽花 瞿 薇 钱 俊

译者序

隐身就是要减少目标的有源和无源目标特征。可探测的目标特征包括可见光、电磁波(射频)、雷达、声波、红外等。射频隐身是减少包括雷达在内的射频信号特征,使敌方(雷达等)传感器处于不断的信息处理和猜测中,从而不能及时发现和确定目标,一旦发现,则为时已晚。射频隐身是武器系统隐身设计的重要方面。我们非常荣幸有机会将 David Lynch, Jr. 先生所著的 *Introduction to RF STEALTH* 一书翻译、推荐给国内读者。该书较详细地阐述了雷达、数据链的低可探测性(LO)和低截获概率(LPI)两大主题。第1章介绍了射频和微波 LPI/LO 技术的历史以及一些 LPI/LO 基础方程;第2章介绍并分析了截获率参数;第3章简述了当前和未来的截获接收机以及它们的一些限制;第4章探讨了自然环境和威胁环境的利用;第5章介绍了低截获概率系统(LPIS)波形和脉冲压缩;第6章介绍了一些与 LO/LPIS 相关的硬件技术;第7章介绍了标准 LPIS 低电平射频和信号处理。每章都有示例、习题、参考文献及对应的光盘附录。该书既可作为相关专业高年级学生或研究生的教科书,也可供专业工程设计者参考。

原著中涉及物理量的符号、计量单位、公式、图、表、参考文献很多,为了不引起新的差错,翻译中保留了原样。仅对明显的差错作了修改,同时加注说明。

由于该书专业性较强,限于时间和水平,翻译中的错误和疏漏之处在所难免,欢迎读者批评指正,以便于我们有机会进行更正。

译者
2009年3月

前 言

一、为什么会有这本书？

这本书以 20 世纪 70 年代中期出现的隐身武器系统资料为基础,这些资料保密了 20 余年。本书中的所有资料都来源于过去 5~10 年来解密的原始资料。其中大部分资料不受版权(或专利权)限制,且是首次出现在不受著作权保护的原始资料中,但也有不少资料是笔者在过去的 30~40 年间创作的。在这本拥有知识产权的书中,部分照片、表格和图形由休斯(Hughes)飞机公司制作,并且是首次出现在不受著作权保护的公共资料中。雷神(Raytheon)公司在 1997 年 12 月兼并休斯飞机公司时获得了这些照片、表格和图形,于是将它们归为己有。本书以笔者及筹备隐身雷达与数据链课程的其他教师所作的笔记为基础,笔者曾于 1985—1996 年教授了该课程。文中有几处引用了原本保密的资料,可能笔者保存的已是孤本,因为在资料解密时,政府通常会将其销毁。笔者是本书资料的编辑者和编写者,文中的观点是一大批人智慧的结晶,能整理他们的工作成果本人感到特别荣幸。虽然笔者千方百计试图做到万无一失,但先前的编者在引用参考文献时并未将应做的工作做仔细,确实有些读者会发现文中一些参考文献引用有误,在此先向读者表示歉意,但经过 25 年的保密期,很难再对它们做出更正。况且,再怎么努力,文中仍难免会出现错误,发现错误之处请告知本人,以便纠正。

自 1975 年以来,笔者有幸成为现代隐身技术的开创者。出于保密需要,这些资料并非广为人知,因此,人们一直重复“造车”,一直在走别人已经走过的“死胡同”,一直在做无意义的断言。本书旨在为新一代设计人员开展新研究提供确实的依据,使隐身技术的买方能够区分出假内行与真专家。许多隐身技术回顾起来显而易见,数学计算简洁明了,但在对此做出解释之前,是没

那么容易看出来的。这本介绍性的书用简单和近似的方法介绍了基本原理。笔者尽可能避免了重复性及可在其他课本中找到的资料,除非必需在文中提到这些资料以便理解隐身和对应威胁方传感器的限制。有人可能会认为这本书价值不高,甚至作为介绍性教材都过于简单。在此请再次接受笔者的道歉,简单是因为笔者并未将连自己都不懂的内容包含进来。此外,如果本书看起来比较浅薄,说明您已不需要再阅读本书。数学家们可能会因某些近似而感到困扰,但是经证明这些近似足以满足实际应用。本书针对的是在雷达、通信和基础物理学方面已有一定基础的大学高年级学生和大学毕业的工程技术人员,它从系统工程的角度切入每个主题。这是笔者很乐意做的工作,它是本人多年教学和写作劳动的成果。

二、本书的组织结构

本书包括两大主题:雷达和数据链的低可探测性(LO)与低截获概率(LPI),有时统称为隐身。由于目标特征是相互影响的,因此大多数章节中同时包含了这两方面内容。每章都包含了示例、习题、参考文献和说明 CD 光盘上相关软件的对应附录。大多数分析已经由雷达/隐身界的知名人士通过实验或计算机仿真得以证明。大部分计算机程序形式的相关分析存储在 CD 光盘中,相关说明见附录 A。第 1 章介绍了射频和微波 LPI/LO 技术的历史以及一些基础 LPI/LO 方程;第 2 章是截获率参数及分析;第 3 章介绍了当前和未来的截获接收机及其部分限制;第 4 章探讨了自然环境和威胁环境的利用,并对 LPI/LO 设计的其中一种“金点子”——电子作战序列的利用——作了举例说明;第 5 章介绍了低截获概率系统(LPIS)波形和脉冲压缩,其中包含了 LPIS 的另一个“金点子”——Hudson-Larson 补码脉冲压缩;第 6 章介绍了一些与 LO/LPIS 相关的硬件技术,低旁瓣、低雷达截面(RCS)天线与天线罩的设计,其中包含了 LPI 设计的又一“金点子”——可分离的天线照射函数;第 7 章介绍了典型的 LPIS 低电平射频和信号处理,它往往不同于常规雷达和数据链的处理。

David Lynch, Jr.
davidlynchjr@ieee.org

2004

目 录

第 1 章 隐身系统绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 平衡设计	6
1.1.2 隐身/LO 技术的“金点子”	6
1.1.3 RCS 与功率管理小结	7
1.2 低截获概率系统简介	8
1.2.1 LPI 系统设计的“金点子”	8
1.2.2 探测和截获概率	9
1.2.3 降低的可探测性——有效辐射峰值功率	10
1.2.4 降低的可探测性——最大信号不确定性	12
1.2.5 LPI 性能举例	13
1.3 隐身系统的历史	14
1.3.1 LPIR 项目成果	15
1.3.2 LPI 模式通过试验验证	15
1.3.3 LPIR 项目结果小结	17
1.3.4 LPIS 典型技术	18
1.3.5 LPI 使得不确定性最大化	18
1.4 LPI 基本方程	19
1.4.1 雷达与信标方程	19
1.4.2 截获功率关系和 LPIS 灵敏度	20
1.4.3 探测距离与截获距离方程	21
1.5 雷达截面(RCS)介绍	27
1.5.1 数学基础	27

II 射频隐身导论

1.5.2 RCS 现象学	29
1.5.3 RCS 估算	32
1.6 目标特征平衡介绍	39
1.6.1 雷达威胁	41
1.6.2 红外威胁	44
1.6.3 截获威胁	46
1.7 习题	49
1.8 参考文献	51
第 2 章 截获率参数及分析	53
2.1 截获率参数	54
2.1.1 截获率覆盖区	54
2.1.2 截获接收机时间响应	57
2.1.3 接收机灵敏度与截获概率的关系	58
2.1.4 功率管理	62
2.2 截获率分析	64
2.2.1 截获接收机灵敏度	64
2.2.2 旁瓣截获距离	67
2.2.3 截获接收机探测概率	67
2.2.4 截获率时间限制	70
2.2.5 截获率频率限制	72
2.2.6 天线增益失配	72
2.2.7 累积截获概率	75
2.3 示例模式截获率	77
2.3.1 示例雷达模式截获率计算	77
2.3.2 数据链模式截获率示例	83
2.4 覆盖区计算	85
2.4.1 “饼切”(Cookie Cutter)覆盖区	85
2.4.2 更精确的覆盖区	96
2.5 习题	99
2.6 参考文献	100

第 3 章 截获接收机	102
3.1 当前和未来截获接收机综述	102
3.2 接收机类型(类似于 Schleher)	103
3.2.1 晶体视频接收机	103
3.2.2 瞬时测频	105
3.2.3 扫描式超外差接收机	108
3.2.4 信道化接收机	110
3.2.5 变频式截获接收机	113
3.2.6 组合或引导接收机	117
3.2.7 截获接收机的处理	120
3.3 截获接收机测量精度	128
3.3.1 频率测量	128
3.3.2 脉冲幅度和宽度测量	129
3.3.3 到达时间和 PRI 测量	130
3.3.4 到达角测量	130
3.3.5 距离估算	143
3.4 截获接收机威胁趋势	147
3.4.1 典型响应威胁——弹性威胁(根据 Gordon)	150
3.4.2 LPIS 发射的相应参数	152
3.4.3 典型响应威胁——辐射测量	154
3.4.4 典型响应威胁——相关	163
3.5 LPIS 与截获接收机	165
3.5.1 屏蔽干扰	165
3.5.2 电子欺骗	167
3.6 典型的已部署截获接收机	168
3.7 习题	168
3.8 参考文献	170
第 4 章 环境的利用	172
4.1 大气衰减	172
4.2 杂波	175
4.3 地形遮蔽	186

IV 射频隐身导论

4.4 电子作战序列	197
4.4.1 雷达和电子战截获电子作战序列	201
4.4.2 雷达发射机电子作战序列	205
4.4.3 电子对抗电子作战序列	208
4.5 射频频谱遮蔽	211
4.5.1 环境频谱实例	211
4.5.2 环境频谱估算	213
4.5.3 环境脉冲密度估算	220
4.6 场景分析示例	221
4.6.1 可用灵敏度分类	221
4.6.2 蒙特卡洛模拟	227
4.7 典型的已部署发射机	236
4.8 习题	237
4.9 参考文献	249
第5章 隐身波形	251
5.1 波形准则	251
5.2 频率分集	252
5.2.1 同步发射与接收串扰	253
5.2.2 低噪声自适应多频发生	259
5.2.3 多频波形检波	263
5.3 功率管理	266
5.4 脉冲压缩	268
5.4.1 线性调频	268
5.4.2 运用线性调频导致的低截获概率性能损耗	271
5.4.3 展宽处理	272
5.5 离散相位码	276
5.5.1 Barker 码	276
5.5.2 Frank 码和数字线性调频码	291
5.5.3 补码	295
5.6 混合波形	308
5.6.1 混合扩频展宽处理(S^3)	308
5.6.2 混合扩频展宽处理	309

5.6.3 波形和处理参数	313
5.7 脉冲压缩器中的噪声传播	315
5.8 波形小结	317
5.9 习题	320
5.10 参考文献	320
第 6 章 隐身天线和天线罩	323
6.1 简介	323
6.2 天线参数	323
6.2.1 基本定义(源自 Skolnik 和 Silver)	323
6.2.2 天线辐射图和孔径分布	326
6.3 单个辐射器	330
6.3.1 电偶极子(源自辐射实验室研究结果)	330
6.3.2 磁偶极子或小型线圈	332
6.3.3 缝隙辐射器(源自 Blass)	334
6.3.4 无穷地平面内的小型矩形缝隙	335
6.3.5 宽带辐射器	337
6.4 天线阵列	340
6.4.1 简单孔径	340
6.4.2 降低旁瓣的函数	344
6.4.3 误差引起的天线方向图降级	349
6.4.4 单元阵列	351
6.5 电扫描阵列	354
6.5.1 单波束天线	354
6.5.2 多波束天线	362
6.6 天线散射	363
6.6.1 基本概念	363
6.6.2 天线 RCS 估算	372
6.6.3 电路变化引起的估算误差	381
6.7 低 RCS 天线罩	386
6.7.1 简介	386
6.7.2 天线和天线罩集成	387
6.7.3 一般公式	389

6.7.4	复合天线罩	391
6.7.5	厚频选层	396
6.7.6	边缘处理	400
6.7.7	坐标旋转	405
6.7.8	天线罩和天线 RCS	408
6.8	习题	413
6.9	参考文献	413
第 7 章	信号处理	416
7.1	隐身信号处理介绍	416
7.1.1	实例信号处理器	416
7.1.2	基本数字信号处理	421
7.1.3	匹配滤波与跨越损耗	423
7.1.4	多次反射回波、多路径与遮挡(Eclipsing)	425
7.2	数字信号处理系统噪声	428
7.2.1	简介	428
7.2.2	信号选择性网络的噪声和增益	430
7.2.3	处理顺序对动态范围的影响	431
7.2.4	饱和、量化与最佳信号电平	433
7.2.5	预滤噪声	437
7.2.6	窄带滤波中的噪声与信号响应	440
7.2.7	舍入、饱和与截断	441
7.2.8	乘数舍入噪声	443
7.2.9	快速傅里叶变换处理时的饱和与截断	444
7.3	空中目标——搜索、截获与跟踪	445
7.3.1	空中目标搜索	445
7.3.2	虚警控制	451
7.3.3	空中目标跟踪	453
7.4	地形跟随/地形回避	456
7.5	真实波束地图	462
7.6	多普勒波束锐化	464
7.7	合成孔径雷达测绘	466
7.8	地面移动目标显示和移动目标跟踪	470

7.8.1 地面移动目标综述	470
7.8.2 地面移动目标门限设置	473
7.8.3 地面移动目标跟踪	474
7.9 无噪声武器投放	478
7.10 数据链	479
7.10.1 简介	479
7.10.2 数据压缩	481
7.10.3 干扰机抑制	483
7.11 自适应处理	486
7.12 习题	490
7.13 参考文献	491
附录 A	496
附录 A.1	496
附录 A.2	497
附录 A.3	498
附录 A.4	499
附录 A.5	501
附录 A.6	503
附录 A.7	505
术语表	506
符号表	508
缩略语表	511

第 1 章

隐身系统绪论

1.1 引言

猜测和了解是两种完全不同的概念。隐身的目的就在于让敌方处于不断的猜测中，当他们发现目标时，为时已晚。过去的这些年里，隐身平台，特别是飞机这种平台，逐渐为大众熟知。但隐身研究实际是在 20 世纪 70 年代中期才有了最早的萌芽，由美国国防部预先研究计划局(DARPA)率先在美国空军和海军的有关项目中得以应用。其中，大部分项目至今仍高度保密，不过仍有部分项目，尤其是最早期项目现已解密，因此，隐身技术的基本概念得以描述。出于保密原因，对于如图 1.1 和图 1.2 中所示的现役飞机 F-117A 和 B-2，此处不便多说，不过它们都是从那些早期项目中脱胎而成的。如今，技术已经发展了好几代，在这些飞机上也体现了出来，但最基本的隐身原理一直没变。

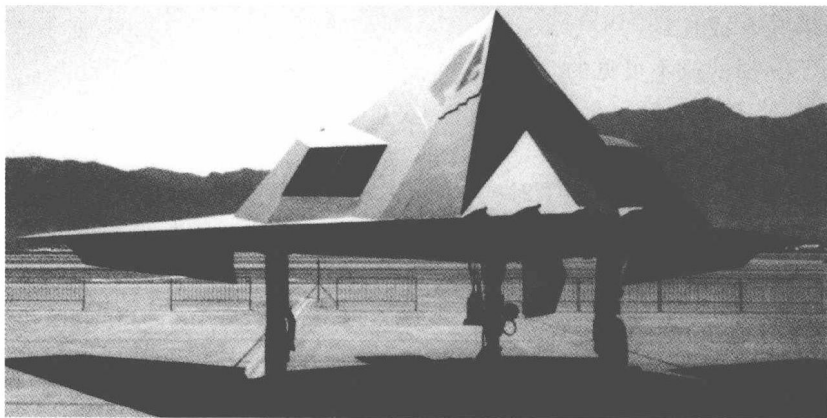


图 1.1 F-117A 隐身攻击战斗机

2 射频隐身导论

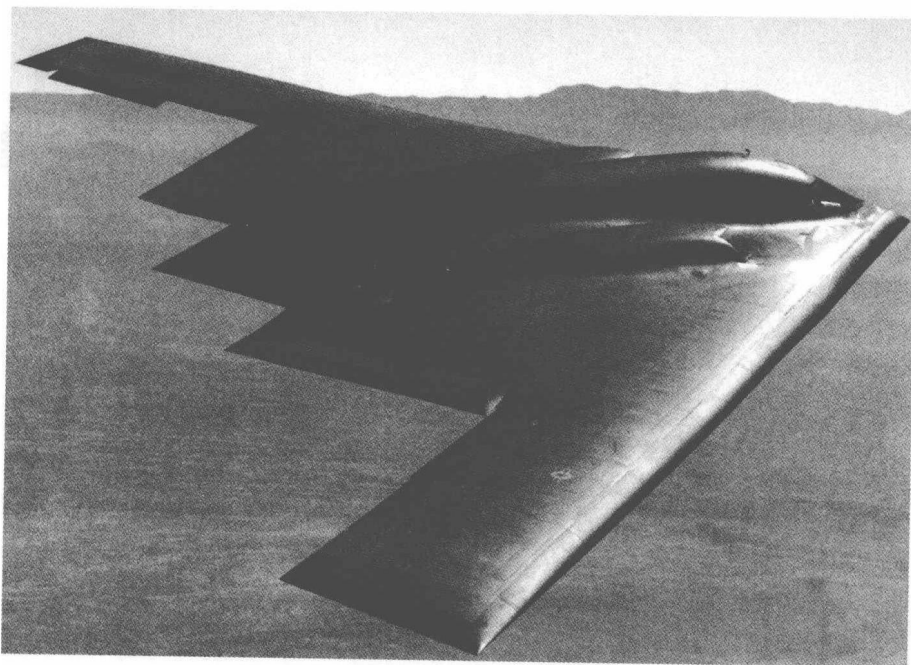


图 1.2 B-2 隐身轰炸机

隐身的挑战

- 在传感器、密集的干扰措施、反辐射武器和发射机定位器不断改进的未来探测环境中继续生存并茁壮成长；
- 成为不易损的或不可见的。

隐身的方法

- 通过采用反辐射导弹和电子对抗,使威胁方尽量少使用主动传感器；
- 降低可预估性,增强“随机性”,使威胁方增大其截获接收机、监视、火控和导弹的复杂性和成本；
- 减缩有源和无源目标特征,增强“隐藏性”,以降低武器系统的可见性；
- 采用作战序列与自然环境及人为环境相结合的战术,增强降低可探测性的效果；
- 利用已有经验和机外传感器指引,使本机有源与无源暴露程度最小。

隐身不是一项单一的技术而是许多技术的综合,这些技术使得系统更难于被探测与攻击。隐身雷达和数据链设计包括有源目标特征与无源目标特征的减缩。有源目标特

征的定义是隐身平台上所有可见的辐射源,包括声波、化学物质(烟迹和飞机凝结尾流)、通信系统、雷达、敌我识别、红外、激光以及紫外线。无源目标特征的定义是隐身平台上所有需要外部照射才可探测到的特征,包括磁性与引力的异常,阳光与寒冷外层太空的反射,声波、雷达与激光照射的反射,以及周围射频[有时称为“溅落轨迹”(splash track)]的反射。有源雷达和数据链目标特征的减缩需要采用能使可能的截获接收机位置处的辐射功率密度最小化的技术。有源目标特征减缩也依赖于采取缩短辐射过程中暴露时间的策略。

有源目标特征减缩的方法通称为低截获概率(LPI)技术,如图 1.3 所示。无源目标特征减缩技术一般称为低可探测性(LO)。这两项技术都需要不断加强天线罩、天线腔和天线设计的开发,以此作为共用子系统的交互式元件,使带内、带外雷达截面(RCS)更小。这样,通过采用能使后向反射回波最小化的专门的天线设计技术,可以减缩带内的无源雷达目标特征。低截获概率系统(LPIS)设计是工程方面的问题,有更多的优化限制,因此与其他现代设计难题相比并没有什么区别。隐身设计者必须始终坚持建立这样的设计理念:即使威胁方已完全了解了该隐身设计,对其而言,这也不算是很大的帮助。

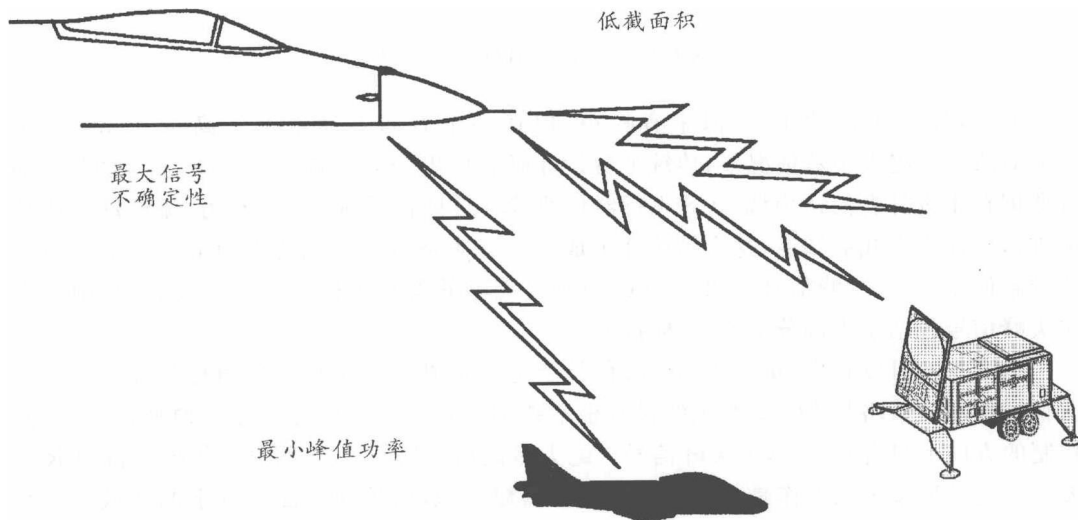


图 1.3 LO/LPIS 目标

传统天线设计的旁瓣和主瓣方向图与图 1.4(a)中所示基本一致。有一部分相邻旁瓣和主瓣,高于各向同性辐射,而其余旁瓣低于各向同性辐射平均 3~6 dB。另一方面,低可探测性和低截获概率天线的旁瓣低于各向同性辐射 -10~-30 dB,平均可低于各向同性 20 dB 以上。这些低旁瓣是在主瓣损耗和孔径面积完全使用的情况下得以实现的。图 1.4(b)显示了理想的 LO/LPI 天线方向图。