

国外信息技术优秀图书选译

空时自适应处理原理

(第3版)

Principles of Space-Time Adaptive Processing(3rd Edition)

Richard Klemm 著

南京电子技术研究所 译

罗群 马林 总审

国外信息技术优秀图书选译

空时自适应处理原理

(第3版)

Principles of Space-Time Adaptive Processing
(3rd Edition)

Richard Klemm 著
南京电子技术研究所 译
罗群 马林 总审



高等教育出版社

图字:01-2007-4416 号

Original English Language Edition published by The IET, Copyright 2006, All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

空时自适应处理原理:第3版/(德)克莱姆(Klemm, R.)著;南京电子技术研究所译. —北京:高等教育出版社, 2009. 4

书名原文: Principles of Space-Time Adaptive Processing, 3rd Edition

ISBN 978-7-04-026211-7

I. 空… II. ①克…②南… III. 自适应雷达-雷达信号-信号处理 IV. TN957.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 016408 号

策划编辑	刘 英	责任编辑	刘 英	封面设计	刘晓翔
版式设计	陆瑞红	责任校对	杨凤玲	责任印制	陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 涿州市星河印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 36.75
字 数 750 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2009 年 4 月第 1 版
印 次 2009 年 4 月第 1 次印刷
定 价 66.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 26211-00

编审委员会

总 审：罗 群 马 林
总 校：周万幸 陈国海

翻译委员会

主 任：于文震
副主任：岳 兵
委 员：黄桂根 廖 晖 王 峰 汪 洋 吴 刚 吴明敏 吴沁文
谢世厚 丁琳琳 张晓斌 蔡晓睿 赵 磊 沙 舟 彭 敏
阴大兴 余 楠 王 瑛

技术校订委员会

主 任：李 明
副主任：刘 刚 傅有光
委 员：刘 颖 肖建华 吴沁文 沙 舟 张晓斌 汪银辉

编辑委员会

主 任：吴 施
副主任：陈 玲 陈勇华
委 员：蔡晓睿 王炳如 陆 萍 汪 琳 陈 艳 林 璨 宋于卿
林 晶 杨慰民

中文版序

自从 1976 年 Brennan, Mallett 和 Beed 发表用以抑制机载雷达杂波的空时自适应处理(STAP)的第一篇文章后,经过十几年的时间,各国的雷达界科学家都已意识到该主题的重要性。如今,STAP 已成为国际雷达会议和刊物的一个常规主题,我希望我的书能对该领域有所贡献。

特别要提出的是,从 STAP 发展的早期起,中国科学家就一直对其表现出浓厚的兴趣,并做出贡献。Syracuse 大学王宏教授对 STAP 体系(JDL-GLR, Sigma Delta STAP)做了开拓性的工作,从 20 世纪 80 年代末起,清华大学彭应宁教授、北京航空航天大学毛士艺教授以及西安电子科技大学保铮院士和吴顺君教授都活跃在该领域。如今,将我的书译成中文版使该丰富多彩的学科会有更广泛的传播,令我深受感动。

非常感谢我的朋友上海交通大学史习智教授对本书翻译工作的推动。此外,我还要感谢完成此项艰巨任务的南京电子技术研究所各位翻译人员及阴大兴教授。最后,对高等教育出版社为中文版所做的细致工作深表谢意。

Richard Klemm

于德国波恩

献给我亲爱的 Eka

作者传记

Richard Klemm, 1940 年生于德国柏林, 分别于 1968 年、1974 年获得柏林科技大学通信学硕士与博士学位。

1968 年至 1976 年, R. Klemm 于位于德国 Wachtberg 的德国国防研究院无线电与数学研究所 (FGAN-FFM) 工作, 主要研究领域是雷达自适应杂波和干扰抑制。

1977 年至 1980 年, 他在意大利 La Spezia 市 SACLANT ASW 研究中心从事主/被动声呐空间信号处理研究, 重点是应用于浅海的匹配场处理。

自 1980 年, R. Klemm 重新返回 FGAN-FFM (现 FGAN-FHR), 并一直从事移动传感器平台反干扰和动目标检测工作。他发表了多篇关于雷达和声呐信号处理多方面的文章, 尤其重点关注了空-时信号自适应处理。他是许多著名期刊的永久审稿人, 如 *IEEE Transactions on Aerospace Systems* 及 *IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation*。他曾被世界上多个国家及组织邀请做 STAP 方面的学术报告。

Klemm 博士是 AGARD (现 RTO-SET 小组) 传感器与传播小组成员, 也是 URSI C (信号与系统) 委员会成员。他主持了若干次 AGARD 和 RTO 专题讨论会, 并担任 AGARD 航空电子小组会议主席。他于 1996 年 3 月在德国 Königswinter 发起并主持了第一届欧洲合成孔径雷达会议 (EUSAR'96)。他于 2001 年荣获 ROT-SET 优秀奖, 2003 年获得 IEE Clarke-Griffiths 奖金, 2004 年获得 RTO 冯·卡尔曼奖章, 并被授予电子科技大学 (中国成都) 荣誉教授。

在业余时间 R. Klemm 还是一位热情的古典钢琴演奏家。在“科学与音乐”标题下, 他喜欢将他的技术与音乐相结合, 在很多科技会议上进行钢琴独奏。Klemm 博士已婚并有三个孩子和四个孙子。

第一版前言

过去几年里空-时处理正逐渐流行起来,尤其是应用于机载动目标显示 MTI (moving target indication) 雷达的空-时自适应处理 STAP (space-time adaptive processing) 已经成为国际雷达会议的主要议题。虽然主要用于机载 MTI 雷达,但也可能存在其他方面的应用。

机载和星载雷达在民用和军用中发挥着重要作用,如地球观测、监视和侦察等。在机载和星载雷达的各个方面中,运动目标探测能力扮演着重要角色。本书着重说明机载和星载 MTI 雷达的特殊部分:杂波回波抑制。

且看一个简单的公式

$$f_D = \frac{2v_p}{\lambda} \cos \alpha$$

它表明杂波多普勒频率对个别杂波散射体与飞行方向之间夹角的依从性。看起来很难相信,我们可以就这样一个简单的事情撰写一本厚厚的书。但这是真实的——本书就是处理这个小公式的结果。

由以上公式给出的杂波多普勒频率的方向依从性导出了自适应杂波滤波的概念。本书的主要目的是以低成本、缩减计算时间、质量、能耗等设计接近最优性能的次优处理器,换句话说,就是在小型雷达平台上进行实时运算。空-时信号处理的基础是可以从后向散射场区域中提供空间采样的多通道相控阵天线。

自从我启动这项工作后,雷达界发生了翻天覆地的变化。15 年前,相控阵天线被认为是未来的事情,因为这项技术仍处于初级阶段,而时至今日已成为当今科技水平的代表。在同一时期内,数字技术取得了突飞猛进的进展,产生了包括并行处理结构在内的强大可编程信号处理器。除此之外,针对开发新的阵列处理技术和算法开展了大量理论工作。对大量应用,下一代雷达将包括有源多通道相控阵天线。这类雷达将提供高灵活度、高可靠性以及与适当的阵列处理器相结合所提供的多通道信号处理的能力。换句话说,就是实时-机载 MTI 技术。

在我开始有关机载 MTI 的工作时,在公开文献中找不到什么可用资料。第一批

出版物要追溯到 20 世纪 70 年代(关于 DPCA 的论文甚至更早)。关于机载雷达自适应杂波对消的第一篇论文是 BRENNAN 等[62]的一篇文章。在此期间,对空-时自适应处理的研究,即今日众所周知的“STAP”,迅猛兴起。这样的研究遍及全世界,尤其是美国和中国。

而大量现有文献是关于次优处理器设计问题的。“次优”意味着杂波抑制性能尽可能地接近最优处理器,但是成本和复杂性低得多。我的初衷并不是总结和比较文献中建议的所有各类技术解决方案——这会超出本书的篇幅限制,并且最后仍然会给读者留下如何选择自己最偏爱的解决方案的问题。与此相反,我会尽力帮助读者理解与自适应空-时处理有关的现象,从上述问题中得到尽可能多的领悟。我希望读者能欣赏这一点。

本书除了取材于很多其他作者的文献外,还试图总结自己在机载和星载 MTI 雷达领域约 15 年的研究心得和结果。从这种意义上来讲,本书将无法覆盖整个 STAP 领域。但时至今日,文献中存在大量的对 STAP 处理器结构的建议,以至于几乎不可能描述全部建议,更无法进行比较。遵循我自己的研究以及交流心得的主线,我希望能为读者更好地理解相关问题做出贡献,这将比提供现有文献的综述更有意义。

本书实际上包括了对线性天线阵所获得的许多结果的节选,这些结果是基于第 2 章给出的特定参数集的。因此,这些结果并非详尽无遗。当然,也不可能涉及雷达参数所有可能的组合。此外,线性阵通常不使用在雷达中。但是,线性阵相对容易进行数字处理,所显示的一些基本特性,可以作为理解各种效应的良好基础。从这种意义上来讲,展示的例子可指导雷达设计师怎样寻找解决实际问题的方案。

必须声明,所有上述结果是基于简单信号和杂波模型计算得到的。除了展现给读者的信息外,还存在许多未解答的问题,部分问题与“现实世界”有关,例如,计算机模型的有限正确性。这些限制条件大多数由理想和现实雷达传感器之间的差异以及目标和杂波环境的统计特性引起。所获得的一些结果可能过于乐观而需要实验验证。但是,我相信这些模型研究会有益于理解观测到的现象背后的机理,以用来预先选择有可能的实际解决方案。遵照这条线索,这里展示的一些结果已经为诸如 EUCLID、SWORD 和 AMSAR 等国际工程项目做出了贡献。

假设读者已经具有脉冲多普勒雷达的一些基本知识,包括雷达距离方程式、常规 MTI 技术、天线阵、信号和阵列处理,并熟悉统计检测理论和复矩阵代数。

本书将系统地介绍机载 MTI 系统设计,其结构如下:首先,简要回顾阵列和信号处理技术并介绍所使用的信号和杂波模型(第 1 章~第 3 章),就机载杂波的一些基本特性做一个小结。其次,从阵列处理理论给出的最优处理开始讨论空-时自适应杂波滤波器(第 4 章)。该部分讨论空-时杂波抑制技术的基本特性,但要牢记在实际系统中实现这些技术是不现实的。随后的第 5 章~第 7 章给出基于线性阵的次优处理技术,这种技术越来越适应于实际要求,包括机上和实时处理。这几章中所讨论的技术均基于矢量子空间中的信号处理,即被称之为部分自适应技术。

第 8 章研究非线性天线结构,讨论具有实际数量传感器的圆形平面阵。第 9 章处理空-频技术。第 10 章研究干扰条件下的杂波抑制问题,特别提出杂波和干扰应同时滤波还是用级联反干扰/反杂波滤波器的问题。在第 11 章中介绍了空-时处理在 SAR 或 ISAR 中的两项应用。虽然这两项应用在性质上差异很大,但实际上它们基于相同的数学背景。在第 12 章中给出空-时滤波其他方面的问题(阵列误差、实现问题、处理技术的计算复杂性等)和结果。这 12 章的每一章都有简短的总结,着重说明各章的主要结论。本书的结尾是我在递交手稿最后一刻之前收集到的 350 多篇参考文献的一个列表,目的是为了使本书包括尽可能多的近期文献。

虽然本书包括了大量数字结果,但并不意味着它是一本用户可以从中提取技术数据的手册,它仅仅给出了空-时处理的原理并向雷达设计者表明怎样找到问题的解决方案。从这种意义上讲,我也期望本书可以作为大学或其他技术院校课程的基础文献。我诚挚地希望,读者可以发现本书对其有所裨益并推动其在该领域中的研究。

总结过去 15 年来在机载和星载 MTI 雷达方面所做工作的动机源自我受瑞典爱立信和中国三所大学邀请参加的几次学术讨论会。由于目前大家对这个领域的兴趣非常浓厚,所以我觉得应该将我所知的许多细节与公众交流。我对空-时自适应处理领域的贡献至少有一项:据我所知,这个领域的所有作者都如我在 1983 年的论文 [300] 中所表示的那样,将天线单元数表示为 N , 回波脉冲数表示为 M , 我将保持这种惯例。

鸣谢:我要感谢 FGAN-FFM 院长 Habil. J. Grosche 博士对这项工作的大力而热情的支持。

FFM 电子部主管 Wirth 博士早在 1980 年就建议我开始自适应机载 MTI 的研究。他持续的鼓励和大量富有成果的讨论及建议大大地改进了我对问题的理解。非常感谢 Wirth 博士的合作。

我要感谢我的同事 U. Nickel 博士和 J. Ender 博士,他们给予了我大量有价值的想法。此外,我还要对 O. Kreyenkamp 的讨论和建议表示感谢。也要感谢 W. - D. Wirth 博士和 O. Kreyenkamp 在校对清样时提供的帮助。

特别要感谢 G. Gniss 夫人。她进行了全部数字评估工作并耐心地听取了我对各种物理现象的解释。如果没有她持续、热心的协助,要写这样一本书是不可能的。非常感谢 G. Gniss 夫人 25 年以来的出色合作。

非常感激德国国防部 H. Wolff 多年来对我的研究活动的持续支持,在本书中对这些研究做总结。

感谢瑞典 Mölndal 爱立信的 Östen Erikstats,他邀请我在其公司的雷达分部举办一个讲座,此次邀请鼓励我编写空-时处理方面的全部资料,并推动我将所做工作整理成书。

我也非常感谢中国教授彭应宁(北京)、吴顺君和保铮(西安)以及黄顺吉(成

都),感谢他们提供我在他们的大学就空-时自适应处理讲课的机会。与他们及其同事和学生的谈话对本书非常有价值。

写一本书意味着首先要大量学习。我想感谢所有那些以出版物对空-时自适应处理领域做出贡献和对国际会议做出贡献的作者。对于可能忽略的出版物,我表示歉意。

应重点提及与出版商,尤其是策划编辑 J. Simpson 的出色合作。非常感谢雷达、声呐和导航 IEE 论文集的编辑 H. Griffiths 教授的鼓励支持。非常感谢 IEE 雷达系列丛书的编辑 E. D. R. Shearman 教授和 P. Bradsell 教授以及西门子-Plessey 的 C. Wigmore 和 N. Steward 博士对手稿的评阅和给予的大量有益建议。尤其感谢 DERA 的 John Mather 博士仔细审查手稿,他的大量批注和建议大大地改进了本书的质量。

R. Klemm

1997 年于 Wachtberg

第二版前言

世界范围的对空-时自适应处理的兴趣持续强劲。作为 STAP 活动(以及并不限于 SAR)基础的小小的多普勒公式(见第一版前言)还没有失去其梦幻魅力。没有任何未来军用机载或星载观测雷达可以设计成不具有慢速运动目标检测能力。我们认为,本书的第二版将有助于介绍这个仍然令人着迷的领域。在此期间,获得了许多新的结果和对各类问题的其他心得。

第二版内容增加了大约 30%。比较大的改动如下:

- 更正了少数错误。非常感谢读者们的建议。
- 新增加的第 10 章介绍距离和多普勒雷达模糊性的影响。
- 新的第 12 章给出了双基地雷达结构中空-时自适应杂波抑制的介绍。
- 新的第 14 章着重解决有多普勒的杂波时的目标方位和速度估计问题,同时包括各种处理器结构的 Cramér-Rao 界限及雷达参数对估值精度的影响,研究了自适应单脉冲的性能。

• 第 7 章增加了由内部杂波运动引起的用时间解相关降低空-时 FIR 滤波器性能的讨论。

- 在第 2、3、4、7 章加入了距离走动的影响。
- 第 2、4 章分析了在大距离分辨单元中多普勒扩展的影响。
- 第 10 章增加了关于杂波多普勒距离依从性和有关补偿技术的讨论。
- 第 10 章增加了具有参差 PRI 的空-时 FIR 滤波器的使用。
- 更新了参考文献,包括了 210 篇以上最近的出版物。

我希望读者能认同这种努力,也希望第二版能够像第一版一样被国际雷达界接受。

鸣谢:我非常感谢 FGAN-FHR 院长 K. Krücker 教授对于这项工作的支持。FGAN-FHR/EL 主管 J. Ender 博士给出了大量有见识的建议,增进了我对某些问题的领悟。非常感谢我的同事 U. Nickel 博士,他提供了大量有价值的想法。同第一版一样,G. Gniss 夫人进行了数字评估,我非常感谢她在完成这本著作中的热情协助。

我要感谢 G. Galati 教授(意大利)、R. T. Hill 教授、E. J. Ferraro 博士(美国)、P. Bhartia 博士(加拿大)、G. P. Quek(新加坡)、E. Velten 博士、K. Krücker 教授(德国)、W. Klembowski 博士(波兰)、B. Kutuza 教授(俄罗斯)及 S. Kent 博士(土耳其)为我提供在其组织内就空-时自适应处理举行讨论会的机会并与他们的同事和学生讨论细节。

我特别感谢 P. Richardson, 他仔细地审核了整部手稿, 提出了大量有价值的建议并已全部并入本书。最后, 非常感谢与出版商的出色合作, 尤其感谢策划编辑 R. Harwood 博士以及责任编辑 Diana Levy。

R. Klemm
2001 年于 Wachtberg

第三版前言

虽然空-时自适应处理(STAP)大约出现在30年以前,但世界范围内的兴趣仍然持续增长,这反映在期刊和会议论文集中大量的论文以及本书第二版的流行。第二版的成功激励我再次修订做出一个新版本,希望可以找到与第二版同样热情的读者。

第三版新增了以下一些新的主题:

- 更正了发现的错误。
- 新增加了第15章,关于雷达距离方程式对STAP性能影响,这里特别强调了目标强度的作用。
- 在第14章中扩展了使用自适应单脉冲进行方位和多普勒估值的内容,包括地面目标跟踪传感器的一些特殊问题。
- 第8章增加了两节,讨论特种天线(360° 覆盖阵列以及多极化单元阵列)产生的问题。
- 在第11章中增加了一节,关于多干扰机场景下处理圆阵的内容。第10章增加了使用带有参差PRI的空-时FIR滤波器的问题。
- 参考文献进行了更新,包括了150篇以上的近期出版物。
- 总页数增加了约20%。

我希望读者能认同这种努力,也希望第三版会像前两版一样被国际雷达界接受。

鸣谢:感谢FGAN-FHR院长J. Ender教授对这项工作的支持以及关于某些论题的大量有益讨论。非常感谢U. Nickel博士和W. Bürger博士在我们的合作过程中大量有益的建议。也感谢I. Gröger夫人对新的部分进行的数字评估。非常感谢W. Bürger博士和F. Schulz,他们仔细阅读了手稿并给出了有价值提示。

我尤其感谢仔细阅读手稿的匿名审稿人提出的所有有价值的建议,这些建议均已并入本书。最后,非常感谢与出版商的出色合作,尤其是策划编辑Sarah Kramer以及责任编辑Wendy Hiles和Phil Sergeant。

R. Klemm
2005年于Wachtberg

目 录

作者传记	I
第一版前言	I
第二版前言	I
第三版前言	I
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 MTI 雷达基础	3
1.1.2 一维杂波对消	3
1.1.3 机载和星载雷达问题	4
1.1.4 平台运动的影响	5
1.1.5 相控阵雷达的一些注解	9
1.1.6 系统和实验	10
1.1.7 模型正确性	11
1.1.8 历史回顾	12
1.2 雷达信号处理工具	14
1.2.1 最优处理器	14
1.2.2 正交投影	21
1.2.3 线性子空间变换	22
1.2.4 用数字滤波器抑制杂波	28
1.2.5 范例	33
1.2.6 角度或频域处理	36
1.3 谱估计	37
1.3.1 信号匹配, SM	38
1.3.2 最小方差估值器, MVE	38
1.3.3 最大熵方法, MEM	39

1.3.4 正交投影, MUSIC	40
1.3.5 谱估值器比较	40
1.4 小结	41
第2章 信号和干扰模型	43
2.1 发射和接收过程	43
2.2 多普勒效应	44
2.3 空-时信号	45
2.3.1 空间维:阵列几何	45
2.3.2 时间维:脉冲串	46
2.4 干扰	48
2.4.1 地杂波	48
2.4.2 运动杂波	50
2.4.3 人为干扰	50
2.4.4 噪声	51
2.5 去相关效应	51
2.5.1 时间去相关	51
2.5.2 空间去相关:系统带宽影响	53
2.5.3 距离门内多普勒扩散	54
2.5.4 系统多普勒扩散	56
2.5.5 全相关模型	56
2.6 标准参数组	56
2.6.1 多重时间折叠杂波	58
2.6.2 关于图像质量的说明	59
2.7 小结	59
第3章 机载杂波性质	60
3.1 空间-多普勒特性	60
3.1.1 等值多普勒频移	60
3.1.2 多普勒方位杂波轨迹	61
3.2 空-时协方差矩阵	66
3.2.1 分量	67
3.2.2 偏置相位中心天线(DPCA)原理	69
3.2.3 特征谱	77
3.3 功率谱	82
3.3.1 傅里叶谱	82
3.3.2 高分辨力谱	84

3.4 雷达参数对干扰谱的影响	85
3.4.1 阵列指向	85
3.4.2 时间和空间采样	85
3.4.3 去相关影响	88
3.4.4 杂波和干扰机谱	95
3.5 自适应空-时杂波抑制的问题	98
3.5.1 原理说明	98
3.5.2 一些结论	99
3.6 小结	100
第4章 全自适应空-时处理器	103
4.1 引言	103
4.2 概述	104
4.2.1 最优自适应处理器(OAP)	104
4.2.2 正交投影处理器(OPP)	108
4.3 最优处理与运动补偿	110
4.3.1 RF运动补偿原理	110
4.3.2 修正方向图	111
4.3.3 和最优处理器的相互联系	112
4.4 雷达参数的影响	115
4.4.1 发射波束宽度	115
4.4.2 阵列与样本长度	116
4.4.3 采样影响	117
4.4.4 CNR的影响	122
4.4.5 带宽影响	123
4.4.6 运动杂波	132
4.5 距离多普勒 IF 矩阵	132
4.6 小结	133
第5章 空-时子空间技术	135
5.1 空-时子空间变换的原理	136
5.2 辅助特征矢量处理器(AEP)	137
5.2.1 与最优自适应处理器(OAP)的比较	138
5.2.2 减少通道数	139
5.2.3 带宽影响	140
5.3 辅助通道处理器(ACP)	142
5.3.1 与最优处理器的比较	145