



国防科学技术大学

全国优秀博士学位论文丛书

宽带极化 信息处理的研究

王雪松 著

国防科技大学出版社

寬帶極化信息處理的研究

王雪松 著

國防科技大學出版社

·長沙·

图书在版编目(CIP)数据

宽带极化信息处理的研究/王雪松著. —长沙:国防科技大学出版社,2005.4
(国防科学技术大学全国优秀博士学位论文;3/曾淳主编)

ISBN 7-81099-152-3

I. 宽… II. 王… III. 极化(电子学)—研究 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 005479 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:耿 筠 责任校对:肖 滨

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:23.5 字数:474 千

2005 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 7-81099-152-3/N·1

全套定价:280.00 元

序 言

当今世界,科学技术日新月异,科技创新已经成为社会生产力解放和发展的重要标志。科学技术的迅猛发展,正在引发一场广泛而深刻的军事变革,知识军事的时代已经来临。在新的历史条件下,面对世界新军事变革的严峻挑战,面对推进中国特色军事变革和军事斗争准备的紧迫需求,军队研究生教育的地位和作用比以往任何时候都更加突出。

博士学位论文水平反映了高层次创新型人才培养的质量,同时学位论文也是博士生学科专业知识水平、特别是创新能力的集中体现。教育部每年评选 100 篇左右的全国优秀博士学位论文,作为国家 21 世纪教育振兴计划的重要内容,已成为提高研究生培养质量,鼓励创新,促进高层次创造性人才脱颖而出的重要措施。国防科技大学作为我军工程技术的最高学府,承担着为国家和军队信息化建设、研究开发国防高科技和先进武器装备、培养军队高级工程技术和指挥人才的重要历史使命,是我军实现新军事变革和军队信息化建设的人才培养和科学研究重要基地。提高人才培养的质量已成为我们现阶段迫切需要解决的问题之一。

自 1999 年教育部开展全国优秀博士学位论文评选以来,我校积极参加评选工作,并以全国优秀博士学位论文评选为契机,组织学校博士学位论文的评优工作,同时参加湖南省和军队优秀博士、硕士学位论文的评选,在我校研究生中大力倡导科学严谨的学风和勇攀高峰的精神,营造鼓励人才积极创新、支持人才实现创新的浓厚氛围,为学生的禀赋和潜能的充分开发创造一种宽松的环境。同时通过深化博士学位论文评阅制度改革;实施创新

工程,资助博士研究生创新研究;加强学校研究生指导教师队伍建设;建立激励机制,鼓励优秀人才脱颖而出等措施不断完善质量保证体系的建设。

博士学位论文是博士生学术水平、科研能力、创造性成果的集中体现,也是学校研究生教育水平、学术水平和创新能力的重要标志。全国优秀博士学位论文是我国优秀博士学位论文中的杰出代表,全国优秀博士学位论文作者是具有创造能力和竞争能力的高层次创造性人才,是支撑国家崛起的骨干创新力量。认真总结全国优秀博士学位论文的成功经验,对于进一步提高博士生教育的整体水平,培养数量更多、水平更高的高层次创造性人才,具有十分重要的启示作用。我校已有五篇博士学位论文获全国优秀博士学位论文,有五篇博士学位论文被评为全国优秀博士学位论文提名论文。现将这些优秀论文汇集出版,旨在为广大在学博士生及其导师树立高水平博士学位论文的范本和学习榜样,也期望进一步推动我校研究生教育改革的深入发展,以培养高层次创新性人才为目标,认真总结创新性人才的培养经验和方法,深入探讨博士生教育改革的思路 and 措施。

努力提高我军新型军事科技人才培养质量,为我校的快速发展和我军现代化服务,是我们今后一个阶段十分重要的任务。我们要在培养大批各类专业人才的同时,努力为优秀人才的脱颖而出创造条件。尤其要下功夫造就一批真正能站在世界科学技术前沿的学术带头人和尖子人才,以应对世界新军事变革的严峻挑战,为推进中国特色军事变革做出新的更大贡献。

国防科学技术大学研究生院

曾淳

2005年3月于长沙

历届国防科学技术大学 全国优秀博士学位论文及 全国优秀博士学位论文提名论文

2001 年三篇全国优秀博士学位论文：

信息与通信工程学科,王雪松博士的论文《宽带极化信息处理的研究》,导师庄钊文教授;

计算机科学与技术学科,王意洁博士的论文《面向对象数据库的并行查询处理与事务管理》,导师胡守仁教授;

控制科学与工程学科,王正明博士的论文《弹道跟踪自校准方法》,导师黄柯棣教授。

2004 年二篇全国优秀博士学位论文：

机械工程学科,胡莒庆博士的论文《转子碰摩非线性行为与故障辨识的研究》,导师温熙森教授;

航空宇航科学与技术学科,黄玉辉博士的论文《液体火箭发动机燃烧稳定性理论、数值模拟和实验研究》,导师王振国教授。

2003 年三篇全国优秀博士学位论文提名论文：

机械工程学科,刘耀宗博士的论文《碰摩转子混沌振动识别与控制技术研究》,导师温熙森教授;

计算机科学与技术学科,彭伟博士的论文《移动自组网络中的广播与路由技术研究》,导师卢锡城教授;

航空宇航科学与技术学科,黄玉辉博士的论文《液体火箭发动机燃烧稳定性理论、数值模拟和实验研究》,导师王振国教授。

2004 年二篇全国优秀博士学位论文提名论文:

原子与分子物理学科,曾交龙博士的论文《使用细致谱项模型研究铝等离子体的辐射不透明度》,导师袁建民教授;

计算机科学与技术学科,李舟军博士的论文《传值 CCS 和 π -演算互模拟等价的验证理论和算法》,导师陈火旺教授。

摘 要

本文以宽带极化雷达体制为背景,提出了瞬态极化这一崭新概念,从根本上突破了经典极化概念的“时谐性”或“窄带性”等定常性约束,以瞬态极化概念为核心,建立了全新的极化电磁信息处理的基本理论框架。它不但完全包容了经典极化理论体系,而且更为重要的是,它为非常电磁波极化表征以及雷达目标宽带极化散射特性刻画提供了有力的理论工具。利用这一理论体系,深入研究了宽带条件下的电磁信号滤波、雷达目标增强、宽带高分辨雷达目标检测以及宽带雷达目标识别等诸多应用问题。

本文的研究工作分为两个层次:第一层次为电磁极化信息处理的基础理论。在电磁波的瞬态极化表征方面,提出了电磁波瞬态极化描述子、瞬态极化时频域分布、瞬态极化投影集、极化聚类中心、极化散度、极化测度、瞬态极化状态变化率等基本概念;在瞬态极化意义上雷达目标极化散射特性刻画方面,导出了目标的瞬态极化散射方程和瞬态极化散射测量方程,通过目标瞬态极化散射算子、瞬态极化测量算子等概念实现了目标极化散射特性刻画,以此为基础,提出了目标散射波极化聚类中心谱、极化散度谱、极化域色散谱、瞬态极化状态变化率谱及其极化域平均分布等特征参量描述方法。这些概念和方法的提出,为以后的雷达极化信息处理应用研究奠定了理论基础。

第二层次以宽带极化雷达体制为背景,研究上述基础理论在电磁信号滤波、雷达目标增强、雷达信号与目标检测,以及目标散射特征提取与识别等领域的应用问题,具体内容包括:

(1) 研究了 SINR、PDSI 宽带极化滤波问题,并分析了相应的滤波器性能。

(2) 提出了宽带雷达收、发天线约束条件的集合论表征方法,建立了基于 SCR 目标增强问题的非线性规划模型,利用 Lagrange 乘子法将其转化为一组线性最优化问题以及一个单调函数寻求零点问题,在此基础上提出了 IBSA 增强算法,首次解决了商性极化增强最优化问题的快速线性化求解问题。

(3) 提出了横向极化滤波的概念,利用它研究了宽带高分辨雷达信号和目标极化检测问题,证明了检测性能的极化域优化问题本质上就是宽带极化滤波和极化增强问

题,以3种典型地物杂波为背景对两类真实飞机目标进行了宽带高分辨极化检测仿真实验,同常规单极化高分辨雷达检测性能相比,获得了数分贝的明显改善。

(4) 以目标宽带极化散射特性刻画作为切入点,研究了目标宽带散射特征提取和识别问题,提出了目标极化散射各向异性程度、宽带极化散射各向异性程度极化域谱及其边缘分布的概念,并提取了相应的特征;提出了目标宽带极化散射结构稳定度、整体稳定度及相应的分布密度、目标稳定度熵的概念,对目标极化散射的稳定性予以了定量的描述,利用 Beta 分布参数拟合的方法提取了相应的稳定度特征;分别利用极化测度与极化散度的概念、从两个不同的角度刻画了目标的宽带极化域色散特性,并提取了相应的极化域色散特征;对五类军用飞机目标进行了宽带极化特征提取与识别实验,提出了基于高维特征空间线性划分和基于树状分类器的两种识别方法,均取得了良好的识别结果。

关键词: 宽带极化信息处理,瞬态极化,瞬态极化投影集,极化聚类中心,极化散度,极化测度,瞬态极化状态变化率,瞬态极化时频分布,瞬态极化散射算子,瞬态极化测量算子,横向极化滤波,极化域色散,目标宽带极化散射各向异性程度,极化域谱,目标瞬态极化散射结构稳定度分布,目标瞬态极化散射结构稳定度熵,极化滤波,极化目标增强,极化检测,极化目标识别,树状分类器

ABSTRACT

In this thesis, the theory and application techniques of wide-band radar polarization information processing are investigated deepgoingly and systematically against the background of wide-band polarimetric radar system.

A completely new concept of instantaneous polarization (IP) is introduced in this thesis, which essentially break through the “harmonic” or “narrow-band” constant restrictions on classical polarization concept. With the concept of instantaneous polarization being the nucleus, a completely new framework of theory on electromagnetic(EM) polarization information processing is constructed. Not only does this theory covers the whole system of classical polarimetry, but also it provides powerful theoretic tools for the representation of inconstant EM waves’ polarization and description of radar target’s wide-band polarization scattering characteristics. Using this theory system, some application subjects, such as EM signal filtering, radar target enhancement, radar signal and target detection, and radar target recognition, are investigated deepgoingly.

The work of this thesis includes two levels:

The first level is mainly concerned with the basic theory on EM polarization information processing. On the instantaneous polarization representation of EM waves, some basic concepts, such as EM wave’s instantaneous polarization descriptor, instantaneous polarization time-frequency distribution, instantaneous polarization projection set, polarization cluster center, polarization divergence, polarization measure, instantaneous polarization state velocity, are introduced. With regard to the description of radar target’s polarization scattering characteristics in the sense of instantaneous polarization, target’s instantaneous polarization scattering equation and instantaneous polarization scattering measurement equation are deduced. Via the concepts of target instantaneous polarization scattering operator and instantaneous polarization measurement operator, target’s polarization scattering characteristics are described. Furthermore, some characteristic parametric description methods, which are based on the concepts of target scattered wave’s polarization

cluster center spectrum, instantaneous polarization state velocity spectrum and its polarization-domain average distribution, are introduced. These concepts and methods establish the theoretic basis for the followed application investigation on radar polarization information processing.

In the second level, the above basic theory is utilized to investigate some application problems in the fields of EM signal filtering, radar target enhancement, radar echoes and target detection and target scattering feature extraction and recognition, against the background of wide-band and high-resolution radar system. Firstly the problem of SINR- and PDSI-sense wide-band polarization filtering are discussed. Performances of these polarization filters are analyzed in detail. Secondly, the set representations of wide-band radar transmitting and receiving antennas' constraints are introduced. A nonlinear programming model is constructed for SCR-based target polarization enhancement problem. Using Lagrange multiplier method, this nonlinear optimization problem is finally transformed to a series of linear optimization problems and a zero-search problem of a monotone function. The IBSA algorithm is presented on this basis, which realizes the linearized fast solution of the optimization problem of quotiented polarization enhancement for the first time. Thirdly, the concept of transverse polarization filtering is introduced, by which the problem of wide-band and high-resolution radar echoes and target polarization detection is investigated. It is proved that the optimization of detection performances in polarization domain be essentially problems of optimal wide-band polarization filtering and enhancement. Wide-band and high-resolution radar detection experiments are performed with two kinds of real aircraft targets in three kinds of ground clutter. In comparison with conventional single-polarization high-resolution radar detection performances, distinguished improvements are achieved. Finally, beginning with the description of target's wide-band polarization scattering characteristics, problems of target wide-band scattering feature extraction and recognition are investigated. Concepts of target polarization scattering non-isotropy degree, wide-band polarization scattering non-isotropy degree polarization-domain spectrum and its marginal distributions are introduced. Corresponding target features are then extracted. Furthermore, concepts of target wide-band polarization scattering structure's stability, integration stability and corresponding distribution densities, target stability entropy are introduced. These concepts describe target polarization scattering stability quantitatively. Via Beta distribution parametric fitting, target's stability features are extracted. From two different points of view, target's wide-band polarization-

domain dispersion phenomena are described by using the concepts of polarization measure and polarization divergence, respectively. Therefore the polarization-domain dispersion features are extracted. On the basis of above-mentioned target polarization scattering features, wide-band radar recognition experiments are performed for five kinds of military aircraft targets. Two kinds of recognition algorithms, which are based on high-dimension feature space linearly demarcation and tree-like classifiers, respectively, are presented. Satisfied recognition results are achieved for both of these two algorithms.

Key words: Wide-band polarization information processing, Instantaneous polarization, Instantaneous polarization projection set, Polarization cluster center, Polarization divergence, Polarization measure, Instantaneous polarization state velocity, Instantaneous polarization time-frequency distribution, Instantaneous polarization scattering operator, Instantaneous polarization measurement operator, Transverse polarization filtering, Polarization-domain dispersion, Target wide-band polarization scattering non-isotropy degree, Polarization-domain spectrum, Target instantaneous polarization scattering structure stability degree, Target instantaneous polarization scattering structure stability entropy, Polarization filtering, Polarization target enhancement, Polarization target recognition, Tree-like classifier

目 录

摘 要	(i)
-----	-------

第一章 绪 论

1.1 引言	(1)
1.2 雷达极化信息处理发展概况	(2)
1.2.1 极化的历史回顾	(2)
1.2.2 经典雷达极化信息的建立	(3)
1.2.3 雷达极化信息处理研究现状	(4)
1.2.4 雷达极化信息处理面临的新课题	(7)
1.3 本文主要工作简介	(9)

第二章 电磁波的瞬态极化及其表征

2.1 引言	(12)
2.2 极化域	(13)
2.2.1 电磁波的极化描述子	(14)
2.2.2 极化域	(17)
2.2.3 拓广极化域	(19)
2.2.4 极化轨道	(21)
2.3 电磁波瞬态极化的定义与表征	(26)
2.3.1 电磁波的解析表征	(26)

2.3.2 电磁波的时域瞬态极化描述子	(27)
2.3.3 电磁波的频域瞬态极化描述子	(36)
2.3.4 电磁波的时、频域瞬态极化的信息等价性问题	(41)
2.3.5 电磁波瞬态极化的时频分布	(42)
2.3.6 典型电磁波的瞬态极化描述子	(49)
2.4 天线瞬态极化的定义与描述	(68)
2.5 宽带电磁波的接收	(69)
2.5.1 接收电压	(69)
2.5.2 天线的瞬时接收功率	(70)
2.5.3 天线接收功率频谱	(71)
2.5.4 天线接收电压的 Wigner 时频分布	(71)
2.5.5 天线与电磁波的宽带极化匹配系数	(72)
附 录	(74)

第三章 雷达目标电磁散射的瞬态极化表征

3.1 引言	(76)
3.2 目标的瞬态极化散射方程与瞬态极化散射算子	(77)
3.2.1 目标瞬态极化散射方程和瞬态极化散射算子	(79)
3.2.2 目标的功率型瞬态极化散射方程和功率型瞬态极化散射算子	(81)
3.3 目标瞬态极化散射测量方程与瞬态极化测量算子	(84)
3.3.1 目标瞬态极化散射测量方程	(84)
3.3.2 雷达天线瞬态接收功率及目标的瞬态极化测量算子	(85)
3.4 目标瞬态极化散射算子与瞬态极化测量算子的极化基变换	(88)
3.4.1 目标 S-型瞬态极化散射算子的变基公式	(88)

3.4.2	目标 M-型瞬态极化散射算子的变基公式	(90)
3.4.3	目标瞬态极化测量算子的变基公式	(91)
3.4.4	目标 S-型算子行展开矢量的变基公式	(92)
3.4.5	目标 S-型行展开矢量外积的变基公式	(95)
3.5	目标瞬态极化散射特性的描述	(97)
3.5.1	双频矢量连续电磁波激励下目标瞬态极化散射特性描述	(97)
3.5.2	目标瞬态极化散射特性的参量表征	(103)
3.5.3	目标散射波频域极化聚类中心的极化域谱	(105)
3.5.4	目标散射波频域极化散度的极化域谱	(112)
3.5.5	目标散射波频域极化测度的极化域谱——目标的频域极化域色散谱	(115)
3.5.6	目标散射波频域极化状态变化率的极化域谱及其极化域平均分布	(117)
3.5.7	目标瞬态极化散射时域特征参量	(123)
3.5.8	目标瞬态最优极化	(124)

第四章 宽带电磁信号极化滤波

4.1	引言	(126)
4.2	宽带电磁波的极化滤波模型	(128)
4.3	多辐射源情况下的极化滤波:完全极化情形	(133)
4.3.1	多信号源——干扰源情况下信号干噪比 SINR 的极化优化	(133)
4.3.2	多信号源——干扰源情况下信号干扰功率差 PDSI 的极化优化	(137)
4.3.3	SINR 最优解与极化轨道及电磁环境参数的关系	(143)
4.4	多辐射源极化滤波:部分极化情形	(146)
4.5	SINR 极化滤波器的通带性能	(152)

4.5.1 SINR 极化滤波器	(153)
4.5.2 极化轨道约束下局部化 SINR 滤波器的极化域通带性能分析	(154)
4.5.3 Poincare 球上 SINR 极化滤波器的通带性能分析	(159)
4.5.4 结论	(163)
4.6 部分极化约束情况下 SINR 极化滤波器的通带性能	(163)
4.6.1 部分极化情况下的 SINR 极化滤波器	(163)
4.6.2 SINR 极化滤波器通带性能分析	(165)
4.6.3 结论	(169)
4.7 PDSI 极化滤波器性能分析	(169)
4.7.1 利用局部最优极化改善信号接收的效果及性能分析	(170)
4.7.2 以信号极化作为极化基时极化轨道族的有效度	(172)
附 录	(175)

第五章 宽带雷达目标极化增强

5.1 引言	(180)
5.2 宽带雷达目标极化增强的数学模型	(182)
5.2.1 宽带雷达收、发天线的约束条件	(182)
5.2.2 宽带雷达目标极化增强的最优化模型	(184)
5.2.3 雷达收、发天线极化皆为极化域单分量信号情况下的目标宽带极 化增强模型	(189)
5.3 雷达目标极化增强的非线性优化处理	(191)
5.3.1 雷达目标极化增强的非线性规划模型	(192)
5.3.2 Lagrange 乘子法分析求解与问题的转化	(193)
5.3.3 $f(\xi_0)$ 的微分性质	(197)
5.3.4 迭代算法	(199)

5.3.5 算法性能评估	(200)
5.3.6 实验结果及结语	(201)

第六章 宽带雷达目标极化检测

6.1 引言	(205)
6.2 宽带电磁信号极化检测	(206)
6.2.1 高分辨雷达回波模型	(207)
6.2.2 宽带电磁信号的横向极化滤波	(208)
6.2.3 基于横向极化滤波器组的高分辨雷达回波信号检测	(211)
6.2.4 高分辨雷达信号极化检测仿真实验及结论	(217)
6.3 宽带雷达目标极化检测及其检测性能的极化域优化	(222)
6.3.1 宽带雷达目标和杂波的高频极化散射模型	(223)
6.3.2 基于横向极化滤波器组接收的宽带雷达目标极化检测	(224)
6.3.3 基于高斯模型的高分辨雷达目标极化检测模型	(228)
6.3.4 目标为零均值随机过程情形下高分辨极化目标检测及检测性能 的极化域优化	(230)
6.3.5 目标为确定性情形下高分辨极化目标检测及检测性能的极化域 优化	(237)
6.3.6 高分辨雷达目标极化检测仿真实验及结论	(240)
附 录	(256)

第七章 宽带雷达目标极化特征提取与识别

7.1 引言	(257)
7.2 目标宽带极化散射特性的信息分解表征方法	(259)
7.2.1 正交极化激励下目标宽带极化散射特性的瞬态能量谱和瞬态极化 投影集表示	(261)