



高新科技译丛



Springer

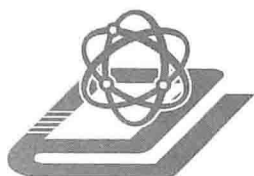
A New Target Detector Based on Geometrical Perturbation Filters
for Polarimetric Synthetic Aperture Radar (POL-SAR)

基于几何扰动滤波的 极化合成孔径雷达目标检测方法

Armando Marino 著 万群 邹麟 陈慧 樊荣 译
殷吉昊 审校



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

基于几何扰动滤波的极化 合成孔径雷达目标检测方法

A New Target Detector Based on Geometrical Perturbation
Filters for Polarimetric Synthetic Aperture Radar (POL - SAR)

[意] Armando Marino 著

万群 邹麟 陈慧 樊荣 译

殷吉昊 审校

藏书

国防工业出版社

著作权合同登记 图字:军-2013-057 号

图书在版编目(CIP)数据

基于几何扰动滤波的极化合成孔径雷达目标检测方法/

(意) 马里诺 (Marino, A.) 著; 万群等译. —北京: 国防工业出版社, 2014. 7

(高新科技译丛)

书名原文: A new target detector based on geometrical perturbation filters for polarimetric synthetic aperture radar (POL - SAR)

ISBN 978 - 7 - 118 - 09376 - 6

I. ①基... II. ①马... ②万... III. ①合成孔径雷达—
雷达目标识别 IV. ①TN959.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 098424 号

基于几何扰动滤波的极化合成孔径雷达目标检测方法

A New Targer Detector Based on Geometrical Perturbation Filters for Polarimetric Synthetic Aperture Radar (POL - SAR)

Translation from the English language edition:

A New Target Detector Based on Geometrical Perturbation Filters for Polarimetric Synthetic Aperture Radar (POL - SAR) by Armando Marino

© Springer - Verlag Berlin Heidelberg 2012

Springer - Verlag Berlin Heidelberg is part of Springer Science + Business Media(www.springer.com)
All rights reserved.

本书简体中文版由 Springer - Verlag Berlin Heidelberg 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 插页 4 印张 14 字数 255 千字

2014 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 69.90 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

本学位论文中的部分内容已经 发表于以下的期刊文章之中：

Horn R, Marino A, Nannini M, Walker N, Woodhouse I H. 2008. The SARTOM Project: Tomography for enhanced target detection for foliage penetrating airborne SAR, EMRS-DTC 2008, 5th Annual Technical Conference 24 – 25th June, Edinburgh, UK.

Marino A. Cloude S R, Woodhouse I H. 2009. Polarimetric target detector by the use of the polarisation fork, Proceedings on POLinSAR'09, Frascati, Roma, 2009.

Horn R, Marino A, Nannini M, Walker N, Woodhouse I H. 2009. The SARTOM Project, tomography and polarimetry for enhanced target detection for foliage penetrating airborne SAR, EMRS – DTC 2009, 6th Annual Technical Conference 7 – 8th, Edinburgh, UK, July 2009.

Marino A, Cloude S R, Woodhouse I H. 2009. Selectable target detector using the polarisation fork, Proceedings on IGARSS'09, Cape Town, South Africa, July 2009.

Marino A. Cloude S R, Woodhouse I H. 2010. A Polarimetric Target Detector Using the Huynen Fork, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 48, 2357 – 2366.

Marino A, Cloude S R. 2010. Detecting Depolarizing Targets using a New Geometrical Perturbation Filter, Proceedings on EUSAR'10, Aachen, Germany, June 2010.

Marino A, Cloude S R, Woodhouse I H. 2010. New classification technique based on depolarised target detection, Proceedings on EUSAR'10, Aachen, Germany, June 2010.

Walker N, Horn R, Marino A, Nannini M, & Woodhouse I H. 2010. The SARTOM Project: Tomography and polarimetry for enhanced target detection for foliage penetrating

airborne P – band and L – band SAR, EMRS – DTC 2010, 6th Annual Technical Conference 13 – 14th, Edinburgh, UK, July 2010.

Marino A, Cloude S R, Woodhouse I H. 2010. Detecting Depolarizing Targets with Satellite Data: a New Geometrical Perturbation Filter, Proceedings on IGARSS' 10, Honolulu, Hawaii, July 2010.

Marino A, Cloude S R, Woodhouse I H. 2012. Detecting Depolarizing Targets using a New Geometrical Perturbation Filter, IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, accepted.

谨以此学位论文献给我的祖父, Armando Marino,

我和他分享的不仅是他的名字, 也是

我们生活的美好时刻!

导师序语

对于遥感探测来说,既能遥远地探测、又能识别各种目标,一直以来都是促进该领域研究工作的关键推手,这可以追溯到第一幅航空摄影图片的诞生之日。在已经过去的 20 世纪里,由雷达衍生出的相关技术和产业,为目标的识别,也就是利用极化无线电波(Polarimetric Radio Waves)对目标进行主动传感(Active Sensing of Objects),提供了一个可资利用的、全新的领域。到了 20 世纪 70 年代,这样的各种实际系统被送入地球轨道;从此,为我们人类世界进行更为可靠的测绘和监控,创造了新的可能性。本论文所关注的问题是极化 SAR(Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达)成像技术的微波观测。微波成像技术广为人知的优势在于:它能够在几乎任何天气条件下,以及夜间环境中,得到令人满意的图像;除此之外,如果波长足够长,微波成像技术还具有穿透叶簇的能力。

由于一个目标被极化电磁波照射后,通常会将入射的电磁辐射,以不同的(有时是唯一的)极化方式散射出去,因此,本学位论文中所描述的各种方法的焦点均是极化(Polarimetry)。这种特性使得极化成为一种非常宝贵的工具,借助它即可完成目标的检测、分类。在过去的十年中,学术界已经越来越意识到 SAR 极化特性的重要性,这也促使更多的卫星系统须具备获得这种类型数据的能力,其中包括 ALOS - PALSAR^①, RADARSAT - 2^② 和 TerraSAR - X^③。现行标准中极化模式(至少是双极化模式)的便利性,在未来大多数的雷达卫星的飞行任务中,将会得到更多的应用。

本学位论文提出了一套开创性的、可用于雷达目标检测的方法。文中所阐述的检测方法,即“扰动分析”(Perturbation Analysis),是一种全新的方法,其为解释

① 译者注:Advanced Land Observing Satellite - Phased Array L - band Synthetic Aperture Radar (ALOS - PALSAR);先进的对地观测卫星(即 ALOS)在日本于 2006 年 1 月 24 日成功发射。在所携带的三个传感器中,L 波段的相控阵合成孔径雷达(即 PALSAR)能够利用全极化的观测模式日夜对地球进行观测。

② 译者注:RADARSAT - 2 是一颗搭载 C 波段传感器的高分辨率商用雷达卫星,由加拿大太空总署与 MDA 公司合作,于 2007 年 12 月 14 日在哈萨克斯坦拜科努尔基地发射升空。

③ 译者注:TerraSAR - X 卫星雷达是由德国宇航中心与该国 ADS Astrium 公司所共同开发,于 2007 年 6 月 15 日在哈萨克斯坦拜科努尔顺利发射,2008 年 6 月开始业务服务。

极化数据提供了新的途径,带来了飞跃性的改变。扰动分析能够推动和改善现有各种算法的性能界限,允许检测小于分辨单元,且藏匿在高电平杂波中的目标。这套方法论本身极其灵活,可适用于另外两个应用领域:其一,是用于海事监控的舰目标检测;其二,是用于土地改变分析的变化检测,各种动态生物系统的分类。本书是一件具有非常良好组织结构的作品,它涵盖了每一个细节和观点,以便从全面的视野来展示扰动分析可以大显身手的各种问题及其解决方案。在 Marino 博士的口试阶段,这套方法已见诸于两个期刊,逾 20 篇会议论文也已面世。此外,2011 年 9 月 14 日,在我国伯恩茅斯召开的遥感与摄影测量协会(Remote Sensing and Photogrammetry Society, RSPSoc)的年会上,该学位论文荣膺该协会所授予的“2011 年度最佳博士学位论文”(“Best PhD Thesis 2011”)。

Iain H. Woodhouse 教授

引 语

当我的学位论文行将出版之时,我一直在想如何才能完成一段最好的引言。我开始向那些身在出版界,且在该领域享有更加丰富经验的朋友们求助,请他们为我献言献策。于是,我收到了来自于他们的很多建议,在此,本人要向所有的朋友深表谢意。在这众多的建议之中,其中一条吸引了我很大一部分的注意力:“Armando,你应该以一种倾诉的方式开启你的引言,以一种幽默的形式告诉读者,你在攻读博士期间发生的,至今仍镌刻在记忆里的那些经历……这样,你一定能够吸引读者的注意力,以使其可以尽览前言中余下的部分。”我不得不承认,事实上我已经意识到这个建议极有可能来自一位爱开玩笑的损友,他只不过想要看我序言的笑话罢了。然而,紧接着我意识到,生活中你虽然犯了许多错误,但这些往往是吃一堑,长一智,从中你也有所悟。因此,我开始考虑:能否顺其意而为之,就写一些诙谐的东西以匹配这篇学位论文的前言。事实上,我确实是想不出有什么好写的!好吧,也许我能重新表述刚才那句话似乎会更好一些。我实在是想不出一个独特的、有意思的事件,因为有许多记忆的片段在我的脑海中被困住了,就像遇到了一个瓶颈似的。

我可以告诉各位朋友,在那段积极探索各种算法的时光里,我就像 Indiana Jones^① 一样,但既不是前途未卜,也并不是像在难逃一劫的德国黑森森林里(但愿我现在没有涉及侵犯版权的问题!)一样,而是搜寻可能存在的真正的目标:那些能使算法得出阳性检测的目标。或许,我也可以借用我的室友们的说法来进行描述:当他们发现我沉浸在前卫的摇滚音乐中而出神之时,我可能实际上在一边听一边工作。或许我可以谈谈我参加的第一次学术会议:那时候,我的朋友们将正在举例诠释“极化的方向性”的我,勾勒成一位“具有精神方面顽疾的、双手飞舞着的街头警察”;然而,实际上,我只不过是在和那种尖叫着狂奔的感觉作斗争。事实是,我发现在所有的研究中所经历的过程,就是一个令人难以置信,但又让人神魂颠倒的游戏。有时候你赢了,仅仅是一位初出茅庐者就能胜任的糊里糊涂的计算,但感觉就像应被授予诺贝尔奖;有时候你输了,你却仍然不间断地盘算着下一场比赛,奇

① 译者注:Indiana Jones 是《夺宝奇兵》系列电影的主角,也能看做是这个系列的又一名称。

谋一计将使你反败为胜。对我而言,由于找到过去单一的一个片段几乎不太可能,我只能这样说,数学和各种仿真模拟实验是一个游戏的结果,无论是优是劣,我享受玩在其中的那些或好或坏的精彩瞬间,这一点我相信读者在后文中也会找到。我最大的希望是,读者会对论文的内容也同样喜欢。但现在,我已经迫不及待地想开始更多地谈及本论文的内容了!

合成孔径雷达(SAR)是一种能够获得含有所观察场景散射行为的,具有较高分辨率图像的主动式微波传感系统。在本学位论文中,阐明了 SAR 极化(POL-SAR)在目标探测和目标分类上的贡献;与以往的方法相比,其优势在于它提供了更为有价值的信息。本学位论文的前两章将致力于介绍 SAR 和极化的概念,为后续部分更为深入探讨的内容奠定了基础。

本学位论文的核心,是介绍一套新的目标探测/分类方法,也就是一种对目标散射场的极化信息加以新的利用的方法,文中将利用两章的篇幅介绍该内容。第 4 章包含了所有的数学证明,这旨在使读者将各种物理和代数的概念用于得到后面将使用的一个最终的公式。另一方面,第 5 章则重点关注检测器的统计描述,这是为了提供更多和检测器的理论性能相关的信息(特别是它的 ROC,即接收机工作特性曲线^①)。

在向世界提出一个新算法的过程中,一个不可或缺的步骤就是其有效性的验证;在这篇论文中,将利用两章的篇幅来重点考察这一部分。第 6 章实现了一个基于从一部机载系统上所采集到的数据的验证,数据来自于参与一场战役的,旨在严密实施目标检测(包括使用伪装条件的情形)的 L 波段 E-SAR(German Aerospace Centre, DLR)。第 7 章主要关注的是本论文提出的方法在源于卫星所采集的数据上的验证,因为它代表了一类特别有意思的,实施目标检测的场景。该数据集包括 L 波段 ALOS-PALSAR(Japanese Aerospace Exploration Agency, JAXA), C 波段 RADARSAT-2(Canadian Space Agency)和 X 波段 TerraSAR-X(DLR)。

最后,衷心希望你和我一样喜欢这篇学位论文!

同年在上海举行的会议,作者向与会者展示了本论文的研究成果,并得到了与会者的肯定和评价。作者感谢所有与会者对本论文的支持和鼓励,特别是那些对本论文的研究成果表示感兴趣的与会者。作者感谢所有对本论文的研究成果表示感兴趣的与会者,特别是那些对本论文的研究成果表示感兴趣的与会者。

① 原文此处为“Receiver Operating Characteristic, curve”。

致 谢

毫无疑问,攻读博士学位绝不是那种没有众人的帮助就可以完成的任务。恐怕只有一个和整个学位论文一样长的,涵盖我的所有生活的,并且包含过去4年的,像编年史一样的详细说明才能囊括。它可以从我的导师开始,直到怀揣 Cameo 小票的男孩。因此,鉴于我没有足够的时间来书写那些内容,而且读者对我的日记也没有兴趣,我认为有两种方式可以来解决这个问题:第一,完成一张尽可能短的清单,但这会遗漏掉许多人的名字;第二,根本不写!考虑到忘恩负义并不在我最喜欢的罪孽之列,我将会试图采取第一种方法,并让那份清单尽可能简短。

首先,我要衷心感谢我的导师 Iain H. Woodhouse 博士,感谢他在寻求我的想法时那永无止境的鼓励和支持,即使初看起来这有些古怪,但也没有关系。其次,还有我在爱丁堡大学时的朋友们,他们帮助我和新的办公环境和谐相融,使我徜徉在众多的酒吧之间:Iain Cameron, Karen Viergever, Bronwen Whiteney, Mahmet Karatay, Rachel Gaulton。没有他们相伴,我可能还得与 IT 交战,很可能与“一品脱”的真实价值失之交臂。

许多人在我攻读博士学位,完成学位论文的过程中,对促成我取得实际的进展做出了贡献。其中,我愿将这份特殊的谢意赠予来自 AEL 咨询公司的 Shane Cloude。没有他绵绵不断的建议和意见,所做的整个工作就不能像现在学位论文里所展现的那样呈现在世人面前。我要感谢所有让我集思广益,就我的研究工作与我进行头脑风暴般讨论的人:Marco Lavalle, Andreas Reigber, Eric Pottier, Maxim Neumann 和 Laurent Ferro - Famil。我还十分感谢 Juan Manuel Sanchez Lopez 和 Rafael Schneider 的帮助,他们放弃了自己宝贵的时间,帮助我完成了学位论文的校阅工作。

我非常感谢支持我攻读博士学位的提议者们,这当中包括很多人士。然而,简而言之,在这份清单中必须列出的有:来自 eOsphere(股份)有限公司的 Nick Walker,来自英国国防部国防科学技术实验室的 Iain Anderson 博士,来自电磁遥感国防科技中心的 Tony Kinghorn 和 Neil Whitehall 以及来自德国航空宇航中心(DLR)的 Matteo Nannini。没有他们对我研究方向上的那些持续不断的调整建议,我绝不可能取得如今展现在论文中的结果。

我也要感谢在 DLR 工作的人们,正是他们在我的心中播下了这颗从事研究的种子(或许也是他们第一次浇灌了它)。没有他们,我肯定不会在爱丁堡开始我的博士生涯,或者在科学研究上培育出如此的激情。在此我只能列举其中一部分人的名字,如:Irena Hajsek, Florian Kugler, Luca Marotti, Kostas Papathanassiou 和 Rafael Schneider。

我将最后这一段作为一份特殊的谢意,以此献给在我攻读博士学位期间,陪伴在我身边的每一个人,特别是在刚开始这段征程时,家对我来说看似那样遥远。在这些人当中有我的双亲: Franco 和 Anna, 是二老接受了他们的儿子远离故土生活的想法, 赐予我尝试实现自己人生抱负的机会。其中还包括我的朋友, Pasquale Bellotti, Giampaolo Cesareo, Vincenzo Costa 和 Giuliano Raimondo。最后,但同样重要的是,我要感谢那位始终不渝地支持着我做出所有决定(那些决定总是将我的宏愿置之首位)的人,我的女朋友 Greer Gardner。

首字母缩略词

EM	Electro magnetic field	电磁场
SAR	Synthetic aperture radar	合成孔径雷达
PF	Polarisation fork	极化叉
FOLPEN	Foliage penetration	叶簇穿透
POLSAR	Polarimetric SAR	极化合成孔径雷达
POLinSAR	Polarimetric SAR interferometry	极化合成孔径雷达干涉测量
X - pol	Cross - polarisation	交叉极化
Co - pol	Co - polarisation	共极化
CR	Corner reflector	角形反射器
RedR	Reduction Ratio	降低率
SCR	Signal to clutter ratio	信杂比
SNR	Signal to noise ratio	信噪比
CNR	Clutter to noise ratio	杂波噪声比
pdf	Probability density function	概率密度函数
CDF	Cumulative distribution function	累积分布函数
DF	Discrete probability function	离散型概率函数
ROC	Receiver operating characteristic	接收机工作特性
H	Horizontal	水平的
V	Vertical	垂直的
SLC	Single look complex image	单视复图像
DEM	Digital elevation model	数字高程模型
LOS	Line of sight	视线
RVoG	Random volume over ground	随机方向体积层

OVoG	Oriented volume over ground	取向方向体积层
RCS	Radar cross section	雷达散射截面积
STD	Single target detector	单目标检测器
PTD	Partial target detector	部分目标检测器
hfs	Historical fire scar	历史的火迹

符 号

X_1, X_2	交叉极化零空间
C_1, C_2	共极化零空间
S_1, S_2	交叉极化极大值点
γ	复极化相关系数
γ_d	检测器
$\underline{k}$	散射矢量
k_1, k_2, k_3	散射矢量 $\underline{k}$ 的各分量
$\underline{\omega}$	散射机制
$\underline{\omega}_T$	重要目标 (散射机制)
$\underline{\omega}_P$	摄动目标 (散射机制)
$i(\cdot)$	复图像
$[S]$	散射 (辛克莱) 矩阵
$[C]$	协方差矩阵
$[T]$	相干矩阵
$[U]$	酉旋转矩阵
$\langle \cdot \rangle$	有限平均
$E[\cdot]$	期望值 (无限平均)
$\underline{k}^T$	$\underline{k}$ 的转置
$\underline{k}^*$	$\underline{k}$ 的复共轭
$\ \underline{k}\ $	$\underline{k}$ 的模

$ k_i $	分量 k_i 的幅度
$\left(\frac{b}{a}\right)^2, \left(\frac{c}{a}\right)^2$	降低率 RedR
T	检测器的门限
P_T	目标成分的功率
P_C	杂波成分的功率
$[I]$	单位矩阵
$[A]$	加权矩阵
$N(\cdot)$	高斯（正态）分布
$\Gamma(\cdot)$	伽马（Gamma）分布
$\delta(\cdot)$	狄拉克（Dirac）函数
X_i	随机变量
x_i	随机变量的实现
P_D	检测概率
P_F	虚警概率
P_M	漏报概率

目 录

第 1 章 绪论	1
参考文献	5
第 2 章 合成孔径雷达	7
2.1 基于 SAR 的雷达遥感	7
2.2 几何失真	10
2.3 目标的统计特性	12
2.4 雷达散射截面积	17
2.5 极化获取的表征:散射矩阵	18
2.5.1 散射矩阵	18
2.5.2 坐标系	20
参考文献	21
第 3 章 雷达极化特性	23
3.1 引言	23
3.2 电磁波的极化特性	23
3.2.1 极化椭圆	23
3.2.2 Jones 矢量	25
3.2.3 Stokes 矢量	26
3.2.4 Poincaré 极化球面	28
3.2.5 波的分解理论	29
3.3 目标极化:单目标	30
3.3.1 辛克莱矩阵和基变换	31
3.3.2 散射特征矢量	32
3.3.3 后向散射的情况	33
3.3.4 极化叉	34