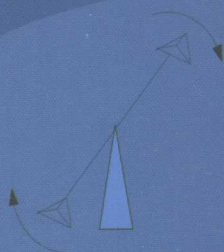




SAR微动目标检测成像的 理论与方法

*Theories & Methods for SAR Micro-motion
Target Detection and Imaging*

邓彬 黎湘 著
王宏强 秦玉亮



科学出版社

SAR 微动目标检测成像的 理论与方法

邓 彬 黎 湘 著
王宏强 秦玉亮

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述了合成孔径雷达(SAR)应用于微动目标探测的最新研究成果。全书共分七章,其主要内容包括:SAR微动目标指示概念的提出、SAR微动目标与背景建模、目标微动对SAR和SAR地面运动目标指示的影响、杂波抑制和微动目标检测、SAR微动目标聚焦成像、SAR微动目标检测-成像联合实现以及SAR微动目标检测成像方面的若干开放性问题。对新兴的THz-SAR微动目标探测也进行了简要介绍。

本书在现象、概念、模型、原理、特征、思想和方法等方面对传统SAR/GMTI技术进行了推广,揭示了微动目标SAR图像特征及其形成机理,阐述了一系列微动目标检测成像方法,形成的理论框架对高分辨对地观测、精细化探测、SAR海量图像快速解译和干扰对抗具有一定的指导意义。

本书可以作为高等院校相关专业研究生学习空间(遥感)信息获取与处理的参考书,对从事相关研究的广大科技工作者和工程技术人员也具有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

SAR微动目标检测成像的理论与方法/邓彬,黎湘等著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-041947-7

I. ①S… II. ①邓… ②黎… III. 合成孔径雷达-目标探测-雷达成像-研究 IV. ①TN958

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第220608号

责任编辑:余 丁 高慧元/责任校对:赵桂芬

责任印制:肖 兴/封面设计:蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年10月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:294 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

SAR/GMTI 技术是公认的探测匀速和匀加速运动目标的有力手段。然而,探测区域中往往还大量存在一些微动目标,如旋转的天线、振动的车辆引擎、悬停直升机的旋翼等。目标微动蕴涵着反映目标身份标识的精细特征,提取后对 SAR 图像解译非常有利。例如,通过提取引擎、履带或车轮的微动特征有望使 SAR 系统具备运动车辆识别能力。但是,目标微动使回波多普勒产生复杂的非线性或周期性微多普勒调制,导致 SAR 图像出现非对称畸变甚至“鬼影”。对此,传统的 SAR/GMTI 技术难以解决。

因此,近年来随着 SAR 和目标微动研究的蓬勃发展,两者的结合即 SAR 目标微动研究——包括 SAR 目标微动影响规律、SAR 微动目标检测成像等正逐渐成为遥感领域的热点,涌现出一批研究成果。其中,SAR 振动目标检测内容被 2008 年新出版的《雷达手册》第三版收录。作者所在的国防科学技术大学空间电子技术研究所从 2006 年开始跟踪这一方向,并将上述研究统称为 SAR/MMTI;相继完成博士论文 2 篇,硕士论文 2 篇,引起学术界关注。其中,博士论文《合成孔径雷达微动目标(SAR/MMTI)研究》和硕士论文《双通道 SAR 振动目标检测与成像方法研究》2014 年被评为湖南省优秀学位论文。据 Google 学术搜索,2011 年《IEEE 地学与遥感汇刊》刊发的我们的论文 *The influence of target micromotion on SAR and GMTI* 自发表以来每年增加引用 10 次以上。英国斯特拉斯克莱德大学和伦敦大学学院学者联合发表在 *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 上的综述文章也对 SAR/MMTI 研究成果进行了着重报道。此外,2012 年美国太赫兹视频 SAR (ViSAR) 计划发布,相关器件取得突破,SAR 工作波段有望从微波、毫米波波段拓展至太赫兹波段,波长变得更短,对微动探测更加有利,SAR/MMTI 理论方法研究和应用呈现出更加光明的前景。

本书就是在这一背景下完成的。主要以作者所在课题组的研究工作和原始论文为基础,兼顾国内国际其他单位的代表性工作,对 SAR/MMTI 技术进行系统地梳理和总结,介绍 SAR 在地面微动目标探测中应用的最新研究成果。

在本书的研究与撰写过程中,作者得到了遥感领域诸多专家和国家科技项目的帮助,在此表示衷心的感谢。感谢 SAR 经典教科书 *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar: Algorithms and Implementation* 作者之一 Wong 博士的指导,并谨以此书纪念他的去逝。感谢黄培康、陈定昌、吴一戎、毛二可、王润生、粟毅、朱炬波、许小剑、焦李成等院士和教授提供的建议。感谢国家自然科学基金的持

续资助(题目“基于散射/运动/先验联合的旋转天线目标 SAR 图像解译技术”、“基于稀疏贝叶斯方法的 THz-SAR 振动目标成像研究”),感谢国家杰出青年科学基金、高分辨率对地观测重大专项的支持。另外还要感谢已毕业研究生朱厦和陈颖滨,书中也介绍了他们在攻读博士和硕士期间的相关工作。研究生苏伍各、吴称光、王瑞君、杨琪、蒋彦雯、高敬坤、陈硕参与了书稿的翻译校对工作,也向他们表示感谢。

《左传》中说,太上有立德、立功、立言,此之谓三不朽。作者不敢奢望“一书立言”,更不敢奢望在知识更新迅疾如电的时代“虽久不废、流芳百世”,但希望本书的出版能够为推动我国 SAR 目标微动研究起到一定的促进作用。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 4 月

目 录

前言

第1章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 SAR/GMTI	2
1.2.1 SAR/GMTI 概念	2
1.2.2 SAR/GMTI 历史与现状——系统/试验层面	4
1.2.3 SAR/GMTI 历史与现状——理论/技术层面	6
1.2.4 SAR/GMTI 发展趋势	9
1.3 SAR/MMTI	9
1.3.1 SAR/MMTI 概念	10
1.3.2 SAR/MMTI 历史与现状——系统/试验层面	13
1.3.3 SAR/MMTI 历史与现状——理论/技术层面	17
1.3.4 SAR/MMTI 发展趋势	20
1.4 本书各章内容简介	21
参考文献	22
第2章 SAR 微动目标与背景建模	29
2.1 引言	29
2.2 SAR 目标微动建模	29
2.2.1 转动	29
2.2.2 振动	30
2.2.3 正弦运动	32
2.2.4 摆动	33
2.2.5 统一模型	34
2.3 SAR 目标散射建模	35
2.3.1 复 RCS 与散射中心模型	35
2.3.2 理想点散射中心模型	37
2.3.3 展布式散射中心模型	38
2.3.4 局域式散射中心模型	38
2.3.5 滑动型散射中心模型	39

2.3.6 SAR 微动目标回波模型	44
2.4 SAR 背景建模与回波快速生成	44
2.4.1 背景建模	45
2.4.2 2D FFT 法回波快速生成的充要条件	47
2.4.3 匀速直线航迹斜视 SAR 回波快速生成	49
2.4.4 匀加速航迹 SAR 回波快速生成	53
2.4.5 误差航迹 SAR 回波快速生成	61
2.5 SAR 背景成像——Legendre 多项式方法	64
2.5.1 RDA 原理	64
2.5.2 基于 L-展开的 RDA 新补偿因子推导	66
2.5.3 仿真实验	68
2.6 本章小结	71
参考文献	71
第 3 章 SAR 目标微动影响分析	74
3.1 引言	74
3.2 锯齿现象与成对回波现象及其数学原理	74
3.2.1 锯齿原理	75
3.2.2 广义成对回波原理	83
3.2.3 原理适用条件	86
3.3 目标微动对 SAR 成像的影响	87
3.3.1 不同微动类型对 SAR 图像的影响	87
3.3.2 不同微动参数对 SAR 图像的影响	90
3.3.3 不同目标个数对 SAR 图像的影响	92
3.3.4 不同散射类型对 SAR 图像的影响	93
3.3.5 目标微动对不同 SAR 成像算法的影响	96
3.3.6 目标微动对 SAR 极限方位分辨率的影响	99
3.4 目标微动对 SAR/GMTI 及 MTI 的影响	101
3.4.1 目标微动对单多通道 SAR/GMTI 的影响	101
3.4.2 目标微动对 MTI 的影响	104
3.5 本章小结	104
参考文献	105
第 4 章 SAR 微动目标检测	106
4.1 引言	106
4.2 基于回波 GLRT 的 SAR 微动目标检测	107

4.2.1 SAR 微动目标方位回波模型	107
4.2.2 GLRT 检测器流程	107
4.2.3 GLRT 检测器性能	109
4.2.4 GLRT 检测器计算复杂度	112
4.2.5 仿真实验	112
4.3 基于断续正弦曲线特征的 SAR 微动目标检测	117
4.3.1 距离像序列正弦曲线特征	118
4.3.2 正弦曲线提取与检测流程	118
4.3.3 性能分析	121
4.3.4 仿真实验	122
4.4 基于 SAR 图像鬼影特征的 SAR 微动目标检测	124
4.4.1 PRI 变换	125
4.4.2 傅里叶变换与 PRI 变换的结合	126
4.4.3 性能分析	127
4.4.4 仿真实验	128
4.5 SAR 微动目标检测的多通道方法——DPCA	132
4.5.1 双通道 SAR 回波模型	133
4.5.2 DPCA 处理后信号特点	134
4.5.3 检测方法	136
4.5.4 仿真实验	136
4.6 SAR 微动目标检测的多通道方法——ATI	138
4.6.1 ATI 处理后信号特点	138
4.6.2 检测方法	139
4.6.3 仿真实验	140
4.7 本章小结	142
参考文献	142
第 5 章 SAR 微动目标成像	144
5.1 引言	144
5.2 SAR 微动目标距离徙动校正方法	144
5.2.1 微动目标 RCMC 的必要性准则	145
5.2.2 基于降带宽思想的微动目标 RCMC	145
5.2.3 基于相位补偿的微动目标 RCMC	147
5.2.4 基于 DSKT 的微动目标 RCMC	150
5.3 SAR 微动目标平动分量补偿的 WHT 方法	154

5.3.1 具有平动的目标回波模型	155
5.3.2 信号特点分析	155
5.3.3 平动分量估计的 WHT 方法	156
5.3.4 仿真实验	156
5.4 SAR 微动目标多普勒混叠条件下的信号分离方法	158
5.4.1 信号模型	158
5.4.2 Chirplet 分解	159
5.4.3 算法流程	160
5.4.4 仿真实验	160
5.5 SAR 微动目标多普勒解缠与成像方法	162
5.5.1 多普勒混叠时的多普勒解缠	163
5.5.2 补偿微动的目标自聚焦成像	165
5.5.3 利用微动目标伪窄带成像	166
5.5.4 仿真实验	169
5.6 SAR 微动目标成像的多通道方法	172
5.6.1 基于 DPCA 的目标微动参数估计与成像	172
5.6.2 基于 ATI 的目标微动参数估计与无法成像分析	181
5.7 本章小结	185
参考文献	185
第 6 章 SAR 微动目标检测-成像联合实现	188
6.1 引言	188
6.2 检测-成像联合实现理论框架	188
6.2.1 基本框架	189
6.2.2 正问题建模	190
6.2.3 初值估计与先验建模	191
6.2.4 逆问题求解	192
6.3 SAR 微动目标回波观测建模	193
6.3.1 SAR 任意运动任意散射目标观测数据的 Fredholm 方程	193
6.3.2 Fredholm 方程矩阵化表示	196
6.3.3 微动-点散射中心模型	198
6.3.4 微动-滑动型散射中心模型	198
6.4 SAR 微动目标参数初值估计	202
6.4.1 微点模型目标特性与初始参数估计	203
6.4.2 微滑模型目标特性与初始参数估计	203

6.5 SAR 微动目标参数估计——MLE 方法	211
6.5.1 MLE 优化	212
6.5.2 实验结果	213
6.6 SAR 微动目标参数估计——贝叶斯方法	216
6.6.1 基于稀疏贝叶斯方法的图像重建	217
6.6.2 实验结果	221
6.7 本章小结	223
参考文献	224
第 7 章 若干开放性问题与研究方法总结	225
7.1 需要进一步研究的问题	225
7.2 THz-SAR	226
7.3 研究方法	227
参考文献	228
附录 A 俯仰和纵摇时距离模型近似的证明	229
附录 B 小幅快速微动对 RCMC 影响的证明	230
附录 C 微动目标 PFA 图像张角效应的证明	232

第1章 概 论

1.1 引 言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)可全天时、全天候、远距离对地面/海面静止场景进行二维高分辨成像,在军事侦察、海洋观测和环境监测等方面有着极其重要的应用价值。地面/海面还存在大量运动目标,如道路上的车辆、战场上的高机动性武器装备等,具有时敏性、高价值/高威胁、难检测等特性,常常淹没在强地海杂波中并在 SAR 图像上呈现模糊和错位。对此, SAR 运动目标指示(SAR/ground moving target indication, SAR/GMTI)技术是探测这类时敏目标的有力手段,对战场感知、洋面监测、精确制导和交通监视具有重要的意义。SAR/GMTI 技术将目标运动视为匀速或只有径向加速度,采用二阶距离模型进行聚焦处理,可实现对 SAR 静止场景中匀速运动的车辆、坦克等目标的检测、位置/运动参数估计和重新聚焦成像,估计和成像的结果可以标注和叠加在静止场景 SAR 图像上。

然而,探测区域中往往还存在大量“特殊”运动的目标,如防空阵地中的旋转天线、用于空气调节的大型风扇、转动的风车、车轮、振动的车辆引擎、颠簸行驶的车辆、摆动的舰船、旋转的舰载雷达天线和直升机高速旋转的旋翼等。这些目标或目标部件的非匀加速运动(如振动和转动)一般称为微动。

微动形式普遍存在于客观的世界。一方面,微动往往蕴涵着对目标识别和 SAR 图像解译极为有利的特征和信息,一般来说精细、稳定、难以伪装,并且可感知、可描述、可提取、可利用。例如,通过提取履带或车轮的转动这一微动特征有望使 SAR 系统具备轮式和履带车辆的识别能力。而不同类型坦克、装甲车辆的振动特性差异也很大,振动幅度从几毫米到几厘米不等,振动频率从几赫兹到几十赫兹不等,与车辆类型、尺寸、机械结构和动力系统密切相关。在民用上目前也有通过在高速公路收费站采集汽车振动信号用于判定车型进行相应收费的研究。有趣的是,自然界中的鸟在飞翔时其翅膀振动调制的频谱分量也“相当稳定、适于识别”^[1],翅膀振动频率从几赫兹到十几赫兹,可由经验公式 $572/L^{0.827}$ 估计(L 是以 mm 为单位翅膀长度)。当然,舰船摆动等微动并不稳定,但摆动带来的更大转角也有利于获得更高分辨的 SAR 图像,摆动周期将来提取后也有助于舰船识别。

另一方面,运动与成像是—对既相互统一又相互对立的矛盾,“运动是成像的

依据,也是问题的根源”(保铮院士)。微动由于不能用低阶模型近似而不利于运动目标信息的长时间积累,同时使回波多普勒产生非线性或周期性微多普勒调制,其调制破坏了传统杂波抑制和目标检测算法所依赖的动目标信号特点,不利于动目标的检测和动静目标的分离,还将引起 SAR 图像非对称畸变甚至出现成对的“鬼影”。转动等微动形式有时还会带来目标姿态的显著变化从而导致理想点散射中心模型失效。对此,传统的 SAR/GMTI 技术无法解决。

从辩证的观点看,尽管目标微动对 SAR 成像和 SAR/GMTI 技术产生极其不利的影响,但恰可利用微多普勒调制进行 SAR 干扰,其干扰效果用现有技术手段难以消除。

本书系统地研究了目标微动对 SAR 回波信号的调制,力图全方位、多域性、深层次、有重点地揭示微动目标 SAR 图像特征及其物理机理和数学原理,在 SAR、SAR/GMTI 现有体制和水平下探索微动目标检测、参数估计和成像方法,实现微动目标在 SAR 图像上的重新聚焦或标注。这一技术在本书中统称为 SAR 微动目标指示(SAR/micro-motion target indication, SAR/MMTI),该技术是对 SAR/GMTI 技术的推广和发展。开展这一研究对于充分挖掘 SAR 数据信息、实现海量 SAR 图像自动解译从而提高高价值/高威胁目标探测能力具有重要意义,能够为我军战场感知、干扰对抗和精确制导技术发展提供有力的理论支撑。

1.2 SAR/GMTI

SAR/MMTI 是在 SAR/GMTI 的基础上发展起来的。为此,首先对 SAR/GMTI 的概念和现状进行综述,理清其发展的脉络。

1.2.1 SAR/GMTI 概念

SAR/GMTI 是 SAR 与 GMTI 在技术层面的结合。早在 SAR 兴起之前,GMTI 就被机载低分辨雷达广泛用于对地面运动目标进行检测。一般来说,MTI 是一种通过抑制静止目标(杂波)来提高运动目标检测和显示性能的技术,GMTI 则是 MTI 技术在对地面运动目标检测中的应用,通常采用相位中心偏置天线(displaced phase center antenna, DPCA)、空时自适应处理(space-time adaptive processing, STAP)等技术补偿雷达平台运动的影响。与 GMTI 相对应的是空中运动目标指示(airborne-moving-target indication, AMTI(注意连字符),不过,AMTI 还表示机载运动目标指示(airborne moving target indication)或自适应运动目标指示(adaptive moving target indication),存在歧义,因此实际中用得较少。MTI 也容易与另外两个概念混淆:运动目标检测(moving target detection, MTD)和脉冲多普勒(pulse Doppler, PD)处理。丁鹭飞等将具有多普勒滤波器组(多个带通滤

波器)并在信号处理线性动态范围等方面有所改善的系统称为MTD系统^[2],以区别于只有脉冲对消器(等效为单个带阻滤波器)的MTI系统。此外,尽管PD与MTI一样是利用多普勒频移从静止目标中检测运动目标,所基于的物理原理相同,但在实际应用中却有所区分。Skolnik根据PRF来区分^[1],认为MTI一般采用低PRF避免距离模糊,不过易导致速度模糊或盲速,PD则正好相反,一般采用中高PRF避免盲速,但却要以距离模糊为代价。Richards则基于所得到的信息和处理方式来区分^[3],认为MTI完全在时域对慢时间信号通过脉冲对消等方式进行处理,运算量小,侧重于杂波抑制,获取的信息也很有限,而PD则是在多普勒域对信号通过滤波器组等方式进行处理(类似MTD),运算量大,侧重于目标检测和估计,能获得更多信息和更高的信干比。事实上,无论采用何种方式,都是在脉冲雷达运动条件下以运动目标的检测为目的,对概念过于纠缠似无必要。

GMTI技术能够检测地面运动目标,但由于一般发射低距离分辨波形和积累时间较短而无法对运动目标成像。因此,在SAR出现13年后^[4],Raney于1971年首次提出将GMTI与SAR进行结合,利用SAR系统而不增加硬件设备、在其固有成像功能基础上拓展得到GMTI功能,即利用信号处理技术在对静止场景成像的同时实现对地面运动目标的检测、参数估计和成像。我们在IEEE标准雷达定义的基础上增加其技术内涵从而给出SAR/GMTI的定义。

定义 1.1 SAR/GMTI 是一种能够检测地面运动目标(特别是地面慢速运动车辆)并将其显示在SAR图像上的合成孔径成像雷达或技术。

其处理流程如图1.1所示,可见上述定义中的“显示”有两种方式:标注式和叠加式。前者只需将运动目标的位置、速度等参数以符号的形式标注在静止SAR图像中合适的位置上即可,后者需先对在静止SAR图像上表现为模糊或错位的运动目标重新聚焦成像,再将其叠加在静止SAR图像上(运动目标原有的像由于模糊后强度较弱一般不会产生明显的影响)。也就是说,GMTI的概念在实际中含义较广,不仅仅指标注,尽管目前标注式仍占主流。

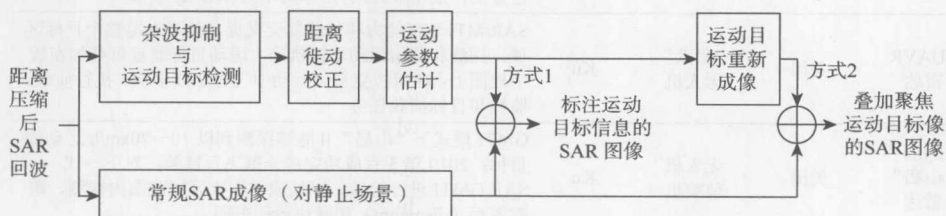


图 1.1 SAR/GMTI 数据处理框图

此外, SAR/GMTI 与 GMTI 存在以下区别: ①在体制上 GMTI 采用低分辨率波形和相对较高的 PRF, SAR/GMTI 则由于要兼顾对大场景成像和较大的不模糊距离而恰恰相反, 两者在积累时间长短和波束宽窄上也有一定的区别, 因此传统 GMTI 系统采用 SAR 与 GMTI 交替工作模式, 或者不具备 SAR 成像功能; ②在功能上 GMTI 只能检测运动目标 (最多可获距离像), 而 SAR/GMTI 还可对运动目标清晰成像 (另一通道同时对静止场景成像); ③在方法上 GMTI 一般采用频域滤波、DPCA 或 STAP, 而 SAR/GMTI 除了可以利用这些方法还可利用时频分析、子孔径对消等更多的方法。

1.2.2 SAR/GMTI 历史与现状——系统/试验层面

目前, 世界上已有多种 SAR/GMTI 雷达系统, 可配备在战斗机、侦察机、无人机、导弹、卫星等平台上。截至 2011 年, 典型的机载、星载 SAR/GMTI 系统和计划总结如表 1.1 所示。

表 1.1 典型 SAR/GMTI 雷达系统和计划

系统/计划名称	研制国家	平台	波段	GMTI 方面主要功能/性能特点或任务试验等情况
AN/APG-76 雷达	美国	战斗机	Ku	采用三端口干涉法抑制杂波并可靠检测和跟踪地面运动目标; 以色列已购买至少 50 部用于装备 F-4 战斗机, 美国海军选用战斗机作为测试平台进行了空中试验; 最早具有 SAR/GMTI 功能的机载雷达系统 ^[5,6]
AN/APG-77-81 雷达	美国	战斗机	X	对地海目标有 GMTI 功能; 群目标分离和多目标跟踪
AN/APY-3 雷达	美国	E-8 侦察机 JSTARS	X	具有广域活动目标监视指示模式 (WAS/MTI) 和合成孔径/固定目标指示模式 (SAR/FTI), 可监视敌方腹地 100km 的地面移动目标, 对地面机动目标和直升机等慢速移动目标进行探测、定位和识别; 可区分出轮式和履带式车辆的运动; 曾成功观测到伊拉克撤军画面
AN/APY-6 雷达	美国	飞机	X	最小可检测速度为 2~4m/s (取决于目标方位角), 可检测范围为 $\pm 105^\circ$, 185km; 可将动目标放置到地图正确的位置上; 能用 0.3m 分辨率对动目标 SAR 成像
TUAVR 雷达	美国	“猎犬”无人机	Ku	SAR/MTI 套接能力和传感器交叉提示技术纵览整个目标区域, 探测和测绘运动车辆轨迹, 运动目标航迹可叠加在数字地图上; 在伊拉克自由行动中飞行 200 多次, 执行侦察、监视和目标捕获任务
Lynx “山猫” 雷达	美国	无人机 侦察机	Ku	GMTI 模式下 “山猫” II 能够探测到以 10~70km/h 运动的目标; 2010 年 5 月成功完成一批飞行试验, 对下一代 SAR/GMTI 进行检验, 以低成本在大区域范围内探测、跟踪散兵 (dismount) 和慢速运动车辆
HISAR 系统	美国	RQ-4、RC-7B 侦察机	X	具有 SAR、广域 MTI 模式和复合 SAR/MTI 模式; 能用文字显示和传输运动目标的坐标和速度 (1~19m/s)

续表

系统/计划名称	研制国家	平台	波段	GMTI 方面主要功能/性能特点或任务试验等情况
MP-RTIP 雷达	美国	E-10A 侦察机	X	为更新 JSTARS 机载雷达而研发, 具有目标跟踪、无源信号侦收、干扰和通信等多种功能, 可用于快速、连续跟踪并成像运动目标, SAR/MTI 两种模式可以同时工作; 2004 年首次地面试验, 2008 年后完成了 SAR 和 GMTI 模式的试验, 2011 年完成飞行测试
AER-II 雷达	德国	飞机	X	四通道 SAR/MTI, 能够检测公路众多运动目标 ^[7]
PAMIR 系统	德国	飞机	X	采用合成带宽技术使信号带宽达到 1.8GHz, 具有扫描 GMTI 功能, 最小可检测速度设计指标小于 1m/s, 天线方位向波束宽度是 2.8°, 方位向扫描范围是 ±45° ^[8]
I-Master 雷达	英国	WK180 无人机	Ku	轻型 (重 30kg), 具有条带和聚束两种 SAR 成像模式, 具有 MTI 功能
SOSTAR 系统	欧洲	飞机	X	具有 SAR/GMTI 同时工作模式, 可在远距离 (超过 150km) 获取高分辨率的 SAR 图像; 2007 年进行了飞行试验
SRTM 任务	美国	航天飞机	X	目的为录取 DEM 数据、并利用天线的沿迹分量进行地面动目标检测, 顺轨基线长度 7m ^[9]
宽域搜索雷达	德国	导弹	Ka	具有三种模式: 扫描 SAR、聚束 SAR、MTI (前视方位扫描, 多普勒域分离杂波, 可获得运动目标距离像) ^[10]
Lacrosse SAR	美国	卫星	X	不仅能够跟踪舰船、装甲车辆、机动或弹道导弹的动向, 还具有发现和识别假目标的能力
TerraSAR-X 系统	德国	卫星	X	采用双接收天线结构和 ATI 技术, 测速范围约为 4~17m/s, 可用于交通监视 ^[11] ; 存在升级计划
RADARSAT 系统-II	加拿大	卫星	C	SAR/GMTI 为实验模式 (MODEX), 采用 ATI、DPCA、动目标匹配滤波三种方法进行运动目标检测 ^[9] , 基线长 7.5m, 全孔径发射/双孔径接收, 最小可检测速度为 6m/s (RCS=12m ²)
COSMO-SkyMed 计划	意大利	卫星	X	四颗卫星, 主要任务是监视、侦察与情报收集, 灵活的收发机制提供了多个可选的相位中心从而有利于 GMTI 处理 ^[9] ; 最先提供了汶川震区遥感影像
Techsat-21 计划	美国	分布式卫星		重要任务之一为实现高性能地面运动目标检测 ^[12] , 计划已终止
SAR-Train 概念	法国	分布式卫星	X	多颗小卫星完全沿航向分布, 像火车一样排成一列, 有利于 GMTI 信号处理; 处于概念阶段 ^[9]

此外, 国外机载或星载 SAR/GMTI 方面的雷达系统或计划还包括: 美国 APY-7 雷达、AMSTE 项目、AIRSAR 系统、Discoverer II 计划 (含 HRP-GMTI 功能)、FORESTER 系统、TESAR 系统、“天基雷达” (SBR) 计划、“创新天基雷达天线技术” (ISAT) 计划; 荷兰 FMCWSAR 计划; 德国 E-SAR 系统、F-SAR 系统、TRAMRAD 系统、TanDEM-X 系统 (即 TanDEM-L 计划)、“干涉钟摆”系统; 英国 Andover 系统; ASTOR 系统、PodSAR 系统; 法国 Carpe 计划、Eagle MALE 系统、RAMSES 系统、SWORD 系统、“干涉车轮”系统; 瑞典 CARABAS-II 系统、LORA 系统; 澳大利亚 INGARA 系统; 意大利 ALS-SAR 系统、BISSAT 计划、MCARM 系统; 俄罗斯 VEGA-M SAR 系统等。总的来说, 机载 SAR/GMTI

技术相对成熟,星载 SAR/GMTI 尽管对侦察监视和战略预警意义重大,但受大功率电源、天线和系统成本制约而仍处于概念/试验验证和关键技术攻关阶段,分布式星载 SAR/GMTI 则处于仿真验证阶段。

可见,国外主要军事大国已在越来越多的平台上搭载了 SAR 系统,其中,地面慢速运动目标成为检测和跟踪的焦点。无论 JSTARS、MP-RTIP 等机载系统,还是 RADARSAT-II 等星载系统,其核心任务之一就是发现和跟踪敌方慢速行驶的坦克、装甲车等重要军事目标,以及监视机械化部队的动态。其中一个亟待解决的关键问题是在不中断 SAR 成像情况下实现高性能的地面慢动目标自动检测。现有较为成熟的 SAR/GMTI 系统普遍采用人机交互的半自动处理模式^[13],对操作人员的要求较高。为此,同时实现成像与运动目标自动检测显得尤为重要,这也是 RADARSAT-II 和 TerraSAR-X 系统在动目标检测试验模式下亟待攻克的核心问题之一。

目前国内发展也较快,中国科学院电子学研究所、电子科技集团公司第十四研究所、第三十八研究所、西安电子科技大学、北京航空航天大学、国防科学技术大学等多家单位一直在积极进行 SAR/GMTI 系统的研制或试验。2001 年,国防科学技术大学研制出国内第一部机载超宽带 SAR 系统,并于 2002~2004 年连续进行了飞行试验,基于这些实测数据,对单通道超宽带 SAR 慢速运动目标检测等进行了研究^[5]。中国科学院、电子科技集团公司第三十八研究所、西安电子科技大学和航天科技集团公司五院 504 所分别通过试飞试验获取了高质量的机载多通道 SAR/GMTI 图像,有力地推动了国内 SAR/GMTI 技术的发展与应用。

1.2.3 SAR/GMTI 历史与现状——理论/技术层面

SAR/GMTI 技术自 1971 年提出后,其研究一直方兴未艾。围绕 SAR/GMTI 基本处理流程(图 1.1)研究的各种理论和算法层出不穷。从以下五个方面阐述 SAR/GMTI 理论与技术研究现状,当然,部分内容存在一定交叉,检测与估计在实际中有时也非截然可分。

1. 运动影响分析方面

1971 年, Raney 在提出 SAR/GMTI 技术时即首先分析了目标速度对 SAR 图像的影响^[14],指出在 SAR 图像中,目标距离向速度带来一次相位误差从而导致目标方位位置错位,方位向速度和距离向加速度带来二次相位误差从而导致目标散焦,并在一定条件下均会导致目标附加的距离单元徙动。Sharma 等^[15]、Rüegg^[16]、Bethke 等^[17]、Baumgartner 等^[18]、Gray 等^[19]和 Djurovic 等^[20]则进一步指出,目标方位向加速度和径向向加速造成三次相位误差,从而引起方位图像非对称畸变。此外,朱岱寅等^[21]还分析了目标匀速运动对极坐标格式算法(polar format algorithm, PFA)成像的影响,指出 PFA 对只有距离向匀速运动分量的目标能够

完全聚焦（实际上其他成像算法亦是如此）。

2. 杂波抑制与运动目标检测方面

平台运动会导致杂波谱扩展，而且 SAR 处于下视状态，运动目标信号淹没在强大的地杂波中。因此需要首先进行杂波抑制。杂波抑制与运动目标检测有时难以显式地区分，常在一起讨论。根据 SAR 天线相位中心个数，可将杂波抑制与运动目标检测分为单通道和多通道两类方法。此处的多通道有时也称为多天线或多孔径，事实上，在 SAR/GMTI 领域，这些概念都不如多相位中心更为准确，但已约定俗成。

1) 单通道方法

如图 1.2 所示，单通道方法分为回波域方法和（复）图像域（包括复图像傅里叶变换域）方法，分别以符号 A 和 B 表示。其基本思想或者利用动静目标多普勒中心频率差异，如 $A_2^{[22]}$ 、 $A_6^{[23, 24]}$ 、 $A_7^{[25-27]}$ ，或者利用多普勒调频率差异，如 $A_3^{[28]}$ 、 $A_5^{[29]}$ 、 $B_2^{[30]}$ 、 $B_3^{[31, 32]}$ 、 $B_4^{[33]}$ 、 $B_5^{[34]}$ 、 $B_6^{[35]}$ 、 $B_7^{[35, 36]}$ ，或者兼而用之，如 $A_4^{[37]}$ 。此外还包括经典的广义最大似然比检验 (A_1)^[38]、基于灰度 SAR 图像的图像滤波 (B_1)^[39]和运动目标阴影检测 (B_8)^[40]等方法。不过，由于在图像中动目标常常模糊和受背景杂波影响，往往难以从图像中检测出运动目标，即使检出其检测性能也难以保证。此外，部分方法在检测的同时还给出了运动参数的估计，如 A_1 、 A_3 、 A_5 、 B_3 等。

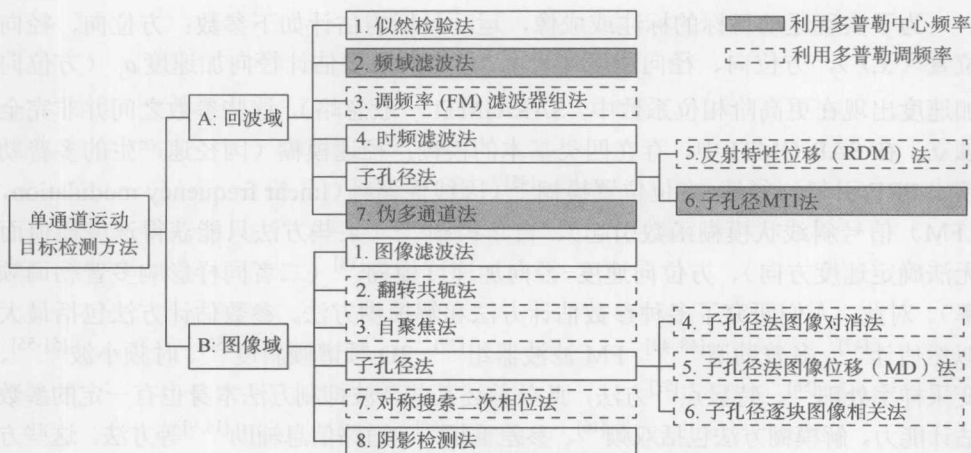


图 1.2 单通道杂波抑制与运动目标检测方法

2) 多通道方法

单通道方法对雷达系统要求简单，性能也受到限制，多通道数据具有空域信息，更利于杂波的抑制。目前，多通道方法主要包括 DPCA 法、STAP 法和沿迹干涉 (along-track interferometry, ATI) 法，以及 DPCA-ATI 等混和方法。DPCA