



新体制合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术是一门先进的雷达技术,是利用合成孔径原理,实现高分辨的微波成像,具备全天时、全天候、高分辨、大幅宽等多种特点,广泛用于军事、民用领域。

新体制 SAR 系统及其信号处理

*NEW SYSTEM SAR AND ITS
SIGNAL PROCESSING*

李兴广·陈磊 赵爽 陈殿仁 张乐乐 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

新体制 SAR 系统及其信号处理

李兴广、陈磊、赵爽、陈殿仁、张乐乐 著

东南大学出版社

·南京·

内容简介

新体制合成孔径雷达(SAR)技术是一门先进的雷达技术。本书重点介绍两种新体制 SAR:星载 MIMO SAR 和机载前视 SAR 系统,阐述了这两种 SAR 系统的基本原理、组成部分及成像算法。全书共分为 7 章,包括新体制 SAR 的研究背景和意义、传统 SAR 原理及成像算法、星载多通道 SAR 成像系统、星载混合相控阵 MIMO SAR 成像系统、基于星载 HPMSAR 的二维 DBF 处理技术、基于星载 HPMSAR 的多通道混合信号处理技术、机载前视 SAR 成像系统及算法。本书是作者和课题组从事新体制 SAR 技术研究工作的经验和总结,力求体现设计性、实用性和创新性。

本书主要读者对象为从事新体制 SAR 系统及其相关领域研究、设计、制造的科研人员、工程技术人员和教学工作者。

图书在版编目(CIP)数据

新体制 SAR 系统及其信号处理 / 李兴广等著. —南京:东南大学出版社, 2016.12
ISBN 978-7-5641-7004-2

I. ①新… II. ①李… III. ①合成孔径雷达—图象处理 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 317237 号

新体制 SAR 系统及其信号处理

出版发行 东南大学出版社
社 址 南京市四牌楼 2 号
网 址 <http://www.seupress.com>
出 版 人 江建中
责任编辑 姜晓乐(joy_supe@126.com)

经 销	全国各地新华书店
印 刷	虎彩印艺股份有限公司
开 本	700mm×1000mm 1/16
印 张	12
字 数	190 千
版 次	2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5641-7004-2
定 价	42.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系调换。电话(传真):025-83791830

前 言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar) 是利用合成孔径原理, 实现高分辨的微波成像, 具备全天时、全天候、高分辨、大幅宽等多种特点, 最初主要是机载、星载平台, 随着技术的发展, 出现了弹载、地基 SAR、无人机 SAR、临近空间平台 SAR、手持式设备等多种形式平台搭载的合成孔径雷达, 广泛用于军事、民用领域。

从 1953 年, 伊利诺伊大学采用非聚焦方法使角度分辨力由 4.13 度提高到 0.4 度, 并获得第一张 SAR 图像起, SAR 技术得到了很大程度的发展和应用, 为了适应现代高科技战争的特点, 成像质量高 (空间和辐射分辨力高), 成像幅宽大, 具备多模式 (扫描、可变入射角条带、斜视、聚束)、多波段、全极化、三维成像、动目标检测与成像能力, 对平台运动姿态变化的适应能力强成为现代战争对新体制 SAR 的要求。由于能够对飞行路线正前方场景成像, 前视 SAR 除了辅助飞机起飞降落等民用用途之外, 还能够使雷达载机具有对正前方视场中目标进行高分辨力侦查、识别, 起到对战机、导弹等进行导引的作用, 实现对地正前视高分辨成像侦察和打击, 有助于构建“察打一体”武器系统。星载合成孔径雷达不受日照和天气条件的限制, 可实现全天候、全天时对地观测, 并对某些地物具有一定的穿透能力, 这些特点使它在农业、林业、地质、水文等民事领域以及战场侦察、军事动向监视等军事领域有着广阔的应用前景。然而传统星载 SAR 由于雷达体制和信号处理方法的落后, 已不能满足星载 SAR 单星多任务处理和高成像指标的要求, 研究新体制星载 SAR 成像系统及其信号处理方法具有重要的现实意义。星载多通道 SAR 将数字波束合成 (Digital Beam-Forming, DBF) 处理技术应用到星载 SAR 成像系统中, 可有效解决上述问题。

由于新体制 SAR 的研究越来越受到人们重视, 从事 SAR 研制、生产、使用的相关单位和科技工作者逐渐增多, 作者根据对新体制 SAR 研究的工作经验和学习心得, 结合近年来课题组的研究成果, 完成了本书的写作, 分享给所有从事 SAR 技术领域的科技人员和教学人员参考。

本书共分为 7 章, 第 1 章为新体制 SAR 的研究背景和意义, 主要介绍新

体制 SAR 的发展历史,第 2 章为传统 SAR 原理及成像算法,第 3 章对星载多通道 SAR 成像系统进行分析,并以此为基础给出第 4 章内容:星载 HPM-SAR 成像系统,针对此系统,第 5 章给出二维 DBF 处理技术,第 6 章进一步提出一种星载多通道系统最优信号处理方法,称为多通道混合信号处理技术,这种技术可以适用于所有星载多通道 SAR 成像系统,第 7 章讨论机载前视 SAR 的结构和成像原理。

新体制 SAR 系统的发展方兴未艾,其在军事、民用等多个领域有着广阔的应用前景,且其信号处理方法尚存在很大研究空间。受作者水平所限,对一些问题的阐述可能不够准确,有失偏颇,书中难免存在不足和疏漏之处,敬请广大读者朋友批评斧正。

作者

2016 年 10 月

目 录

1 新体制 SAR 的研究背景和意义	001
1.1 SAR 研究热点和难点	001
1.1.1 新体制 SAR 论证	001
1.1.2 新体制和特殊应用条件下的成像	002
1.1.3 SAR 图像处理	002
1.1.4 运动目标检测与成像	002
1.1.5 ISAR 运动补偿与成像	003
1.1.6 SAR 的干扰和抗干扰	003
1.2 新体制 SAR 的发展	003
2 传统 SAR 原理及成像算法	006
2.1 SAR 成像原理	006
2.2 SAR 回波信号模型	009
2.3 RD 算法原理	012
2.3.1 RD 算法的距离向处理	012
2.3.2 距离徙动校正处理	013
2.3.3 RD 算法的方位向处理	015
2.4 SPECAN 算法原理	016
2.4.1 Dechirp 处理和频谱分析方法	016
2.4.2 SPECAN 算法的方位向处理	017
2.5 CS 算法原理	018
2.5.1 方位向 FFT	020
2.5.2 Chirp Scaling 处理	021
2.5.3 距离向处理、距离徙动校正	023
2.5.4 相位残差补偿、方位压缩	023
2.5.5 方位向 IFFT 处理	024

3 星载多通道 SAR 成像系统	025
3.1 引言	025
3.2 合成孔径雷达对系统的要求	026
3.2.1 SAR 基本原理	026
3.2.2 SAR 测绘带宽与分辨力分析	026
3.2.3 SAR 对天线特性的要求	028
3.2.4 SAR 信号处理方法	029
3.3 传统多通道 SAR 成像系统	029
3.3.1 俯仰向多通道 SAR 系统	029
3.3.2 多相位中心方位多波束 SAR 系统	030
3.3.3 四元矩形阵列 SAR 系统	030
3.3.4 小结	031
3.4 相控阵 SAR 成像系统	031
3.4.1 星载宽带相控阵 SAR 成像系统	031
3.4.2 相控阵 SAR 成像系统的信号处理技术	035
3.5 MIMO SAR 成像系统	036
3.5.1 MIMO 雷达的基本原理	036
3.5.2 MIMO SAR 系统配置	039
3.5.3 MIMO SAR 宽带正交波形设计	042
3.5.4 MIMO SAR 宽测绘带高分辨力成像处理技术	046
3.6 本章小结	051
4 星载混合相控阵 MIMO SAR 成像系统	053
4.1 引言	053
4.2 HPMSAR 系统设计	054
4.2.1 HPMSAR 的基本原理	054
4.2.2 HPMSAR 天线发射方向图设计	057
4.2.3 HPMSAR 模糊函数	060
4.2.4 HPMSAR 宽带正交波形分析	061
4.3 多功能 HPMSAR 成像模式分析	062
4.3.1 HPMSAR 系统多任务实现	062
4.3.2 连续模式 HPMSAR 成像系统	063
4.4 HPMSAR 系统参数选择	068
4.4.1 接收天线设计	068

4.4.2	发射天线设计	073
4.4.3	PRF 选择	075
4.4.4	性能参数	076
4.4.5	HPMSAR 系统的天线设计流程	077
4.5	本章小结	079
5	基于星载 HPMSAR 的二维 DBF 处理技术	080
5.1	引言	080
5.2	系统预处理技术中需解决的问题	081
5.2.1	方位模糊	081
5.2.2	距离模糊	083
5.2.3	距离模糊与方位模糊的限制关系	085
5.2.4	信号混叠	085
5.2.5	高程空变	085
5.3	距离向 DBF	087
5.3.1	工作原理	087
5.3.2	信号模型	089
5.3.3	距离向多通道成像处理方法	091
5.3.4	距离向 DBF 成像处理流程	097
5.3.5	仿真实验验证	099
5.4	方位向 DBF	104
5.4.1	工作原理	104
5.4.2	信号模型	106
5.4.3	方位向多通道成像处理方法	108
5.4.4	仿真实验验证	109
5.5	基于多维波形编码技术的二维 DBF 处理技术	112
5.5.1	工作原理	112
5.5.2	仿真实验验证	114
5.6	本章小结	115
6	基于星载 HPMSAR 的多通道混合信号处理技术	117
6.1	引言	117
6.2	系统回波信号模型	118
6.3	系统采样频率	121

6.3.1	有效相位中心与有效样本位置	121
6.3.2	传统均匀采样情况	122
6.3.3	均匀采样的特殊情况	123
6.3.4	采样频率	124
6.4	方位向多通道预滤波方法	124
6.4.1	工作原理	124
6.4.2	矩阵求逆法	125
6.4.3	投影法	130
6.4.4	传统 NULL-steering 方法与多通道预滤波方法的比较	131
6.4.5	非带限信号引起的方位模糊	132
6.4.6	仿真分析	135
6.5	多通道混合信号处理技术	138
6.5.1	系统分析	138
6.5.2	系统流程	140
6.5.3	仿真分析	141
6.6	本章小结	144
7	机载前视 SAR 成像系统及算法	145
7.1	引言	145
7.2	前视 SAR 静止目标回波数学模型	145
7.2.1	前视成像系统几何模型	145
7.2.2	回波信号方位向特性	147
7.3	基于 RD 的前视 SAR 静止目标成像算法研究	149
7.3.1	方位向调频率	150
7.3.2	前视 SAR 距离多普勒(RD)算法	150
7.3.3	成像区域大小和成像分辨力分析	156
7.4	改进的 ECS 成像算法	158
7.4.1	算法过程推导	158
7.4.2	成像仿真	163
7.5	图像清晰度提高方法	167
7.6	本章小结	169
	参考文献	170

1 新体制 SAR 的研究背景和意义

1951 年,美国 Goodyear Aerospace 公司的 Carl Wiley 发现,通过对多普勒频移进行处理,可以改善波束垂直向上的分辨力^[1]。根据这一原理,可以得到雷达目标的二维图像,合成孔径雷达(SAR)应运而生。

合成孔径雷达的特点是分辨力高,能全天候工作,可有效穿透某些掩盖物和识别伪装。传统的 SAR 被广泛应用于侦查遥感、环境检测、资源普查、城市规划、重点工程选址、抢险救灾等领域^[2],随着微波技术和计算机技术的发展,SAR 体积越来越小,功耗越来越低,成像分辨力越来越高,已经被应用到导弹导引头、深空测试等领域。

经过多年的发展,SAR 从开始的单波段、单极化、固定入射角、单工作模式,逐渐向多波段、多极化、多入射角和多工作模式方向发展,天线也经历了固定波束视角、机械扫描、一维电扫描及二维相控阵的发展过程。未来几年,SAR 的研究热点以及发展趋势是新体制 SAR、多参数(多频段、多极化和多视角)SAR 系统、聚束 SAR、极化干涉 SAR 及合成孔径激光雷达^[3]。

1.1 SAR 研究热点和难点

1.1.1 新体制 SAR 论证

SAR 系统设计追求的目标:图像质量高(空间和辐射分辨力高),成像幅宽大,具备多模式(扫描、可变入射角条带、斜视、聚束)、多波段、全极化、三维成像、动目标检测与成像能力,对平台运动姿态变化的适应能力强。为此,SAR 平台必须安装精密的导航和姿态测量系统(GPS/INS/IMU),多平台之间必须采用精密的时间同步设备(如原子钟、GPS 授时等),SAR 系统必须采用全极化相控阵天线(灵活的波束扫描能力、大功率合成能力和良好的鲁棒性),采用具有极高频率稳定度的振荡源,增大发射信号带宽(有时必须采用子带合成),多通道同时接收处理,以及与系统设计相适应的灵活、稳

定、实时性强的成像与图像处理算法。新体制 SAR 设计中的三大同步(时间、空间和相位)、波位设计、性能指标分析和各种误差源的影响分析是研究热点。

1.1.2 新体制和特殊应用条件下的成像

一些新体制 SAR、小平台(如无人机)SAR、大斜视应用(如弹载)条件下的成像算法,常常遇到以下情况:

- (1) 由于分辨力的提高和成像幅宽的增大,方位和距离的耦合不再能够忽略,算法的实时性也经受考验。
- (2) 小平台的运动补偿困难,难以连续获得满足质量要求的图像。
- (3) 大斜视角工作,距离徙动需要精确补偿,图像质量难以保证。
- (4) 为了减小算法运算量,减小成像算法对平台姿态稳定性的依赖,或者滤除相干斑,需要采用时域/频域子孔径成像算法。
- (5) 在缺乏可用的雷达平台运动传感器数据时,必须采用基于实测数据参数估计的自聚焦算法。
- (6) 缺乏适用于超高分辨力成像的子带合成算法。
- (7) 缺乏进行 InSAR 的基线有效估计与相位解缠的算法。
- (8) 不规则飞行路径下的双/多基地 SAR 成像。
- (9) 工程化算法与实时成像处理器设计。

1.1.3 SAR 图像处理

相干斑抑制,图像增强,几何校正,数字高程图(DEM)生成,像素点定位(有地面控制点和无参考点两种),辐射/极化定标,目标检测,特征提取(民用需求广)与识别(军事需求广),多传感器图像融合(多波段、多极化 SAR 图像的融合,SAR 图像与光学图像的融合)等也是目前 SAR 研究的热点和难点。

1.1.4 运动目标检测与成像

SAR 的军事应用迫切需要解决地面慢速运动目标的检测与成像问题。其难点在于从强杂波背景下对运动目标的检测和参数估计,目前采用的方法主要有单通道和多通道方法,其缺点是:

- (1) 单通道 SAR 系统中主要采用基于运动目标参数估计的检测与成像方法和邻近单元杂波对消法,但是效果均不好。
- (2) 多通道 SAR 系统采用基于杂波对消的运动目标检测与成像

(DPCA、STAP)方法,但是运动目标坐标精确定位困难。

1.1.5 ISAR 运动补偿与成像

ISAR 的四类典型目标是飞机、舰船、弹道导弹和太空飞行器,上述目标运动的非合作特性导致其运动补偿非常困难。

1.1.6 SAR 的干扰和抗干扰

SAR 干扰主要有噪声干扰、相干干扰(用侦察到的雷达信号参数和待保护区域的散射强弱分布构造相应的虚假场景)和复合干扰(噪声干扰和相干干扰的复合)三种方式。SAR 的抗干扰技术主要包括采用低截获概率雷达发射信号、重频和载频捷变、空域自适应干扰对消三类。研究新的实时 SAR 干扰和抗干扰技术也是 SAR 领域研究的热点和难点。

1.2 新体制 SAR 的发展

20 世纪 90 年代,Witte 和德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)的 Sutor、Moreira 等人合作研制了前视 SAR 的实验系统——视景增强区域成像雷达(Sector Imaging Radar for Enhanced Vision, SIREV)^[5-7],这也是公开报道的首部前视 SAR 成像系统。如图 1.1 所示。



图 1.1 首部前视 SAR 挂机飞行

波音公司和其研制无人机的合作伙伴 Insitu 以及微型合成孔径雷达制造商 ImSAR 在 2008 年 1 月测试的 NanoSAR^[8]如图 1.2 所示,其重量只有 0.9 kg,大小仅像鞋一般,可以搭载在重量只有 18 kg 的美国“扫描鹰”(ScanEagle)无人侦察机上。

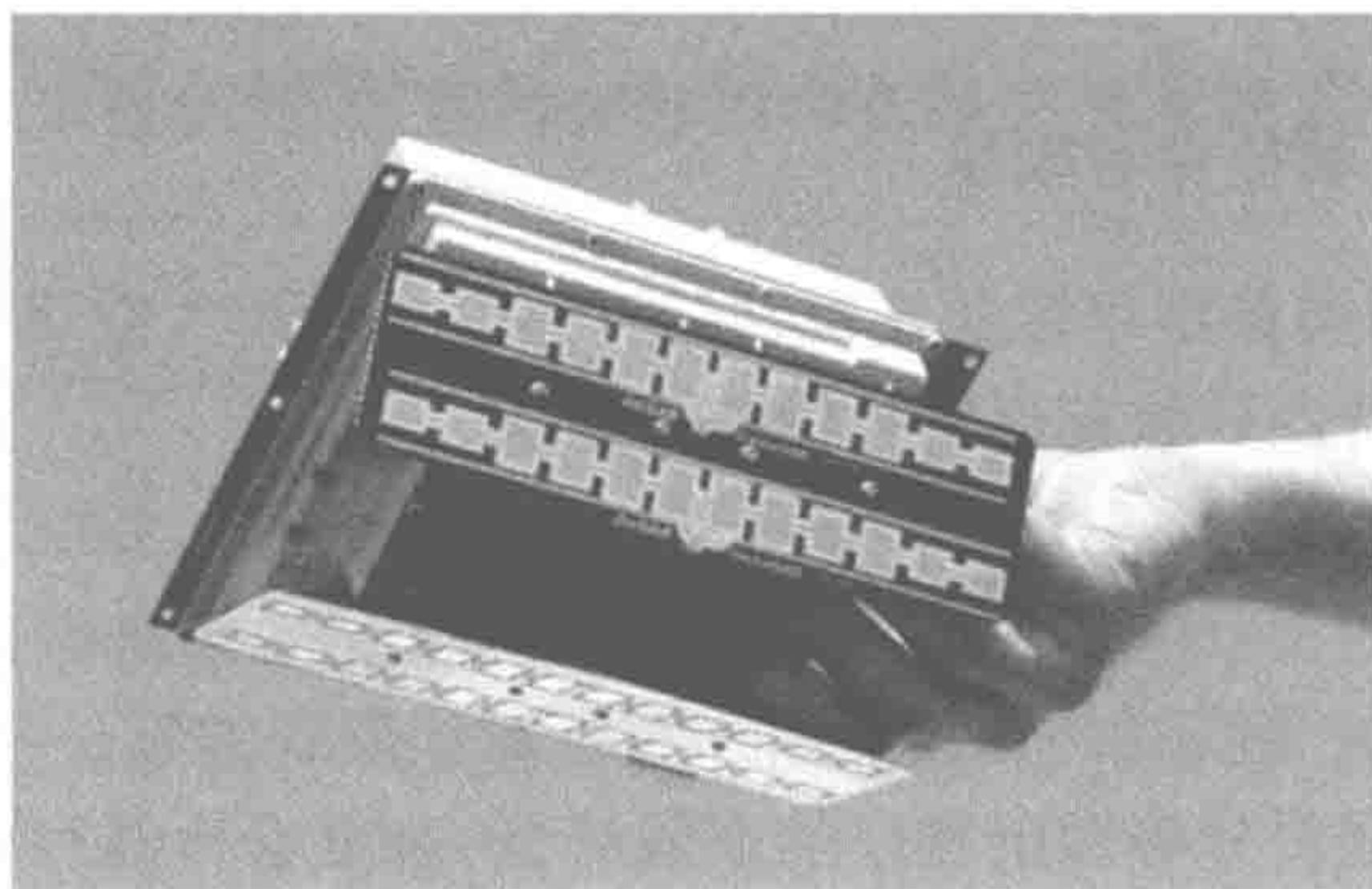


图 1.2 微型合成孔径雷达

美国一家专门从事小型合成孔径雷达(SAR)研究的 ImSAR 公司 2006 年和一家从事远程无人机开发的 Insitu 公司合作,成功地实现了世界上最小的纳米合成孔径雷达(NanoSAR)^[9]的原型机开发,重量仅为 1 磅(0.454 kg),如图 1.3 所示。

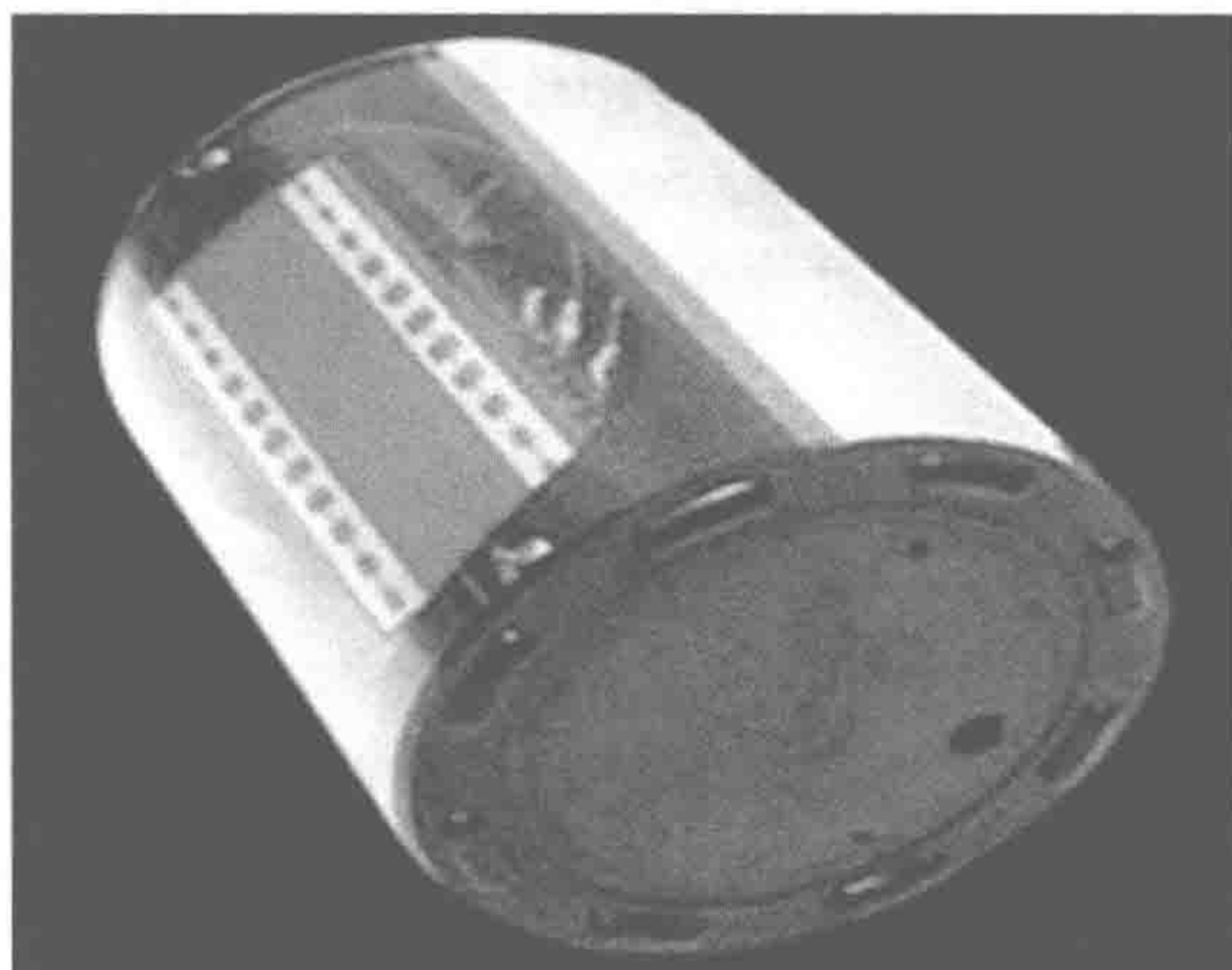


图 1.3 NanoSAR

2009 年,一种新型合成孔径雷达(SAR)被应用于两个环绕月球勘测平台——印度空间研究组织“印度月船 1 号”探测器和美国宇航局月球勘测轨道器,如图 1.4 所示,该仪器有助于人类重返月球。目前月球勘测轨道器装配的是最新的微射频新型合成孔径雷达,装配在“印度月船 1 号”上的该装置重 9 kg^[10],装配在月球勘测轨道器上的微射频新型合成孔径雷达重 14 kg。

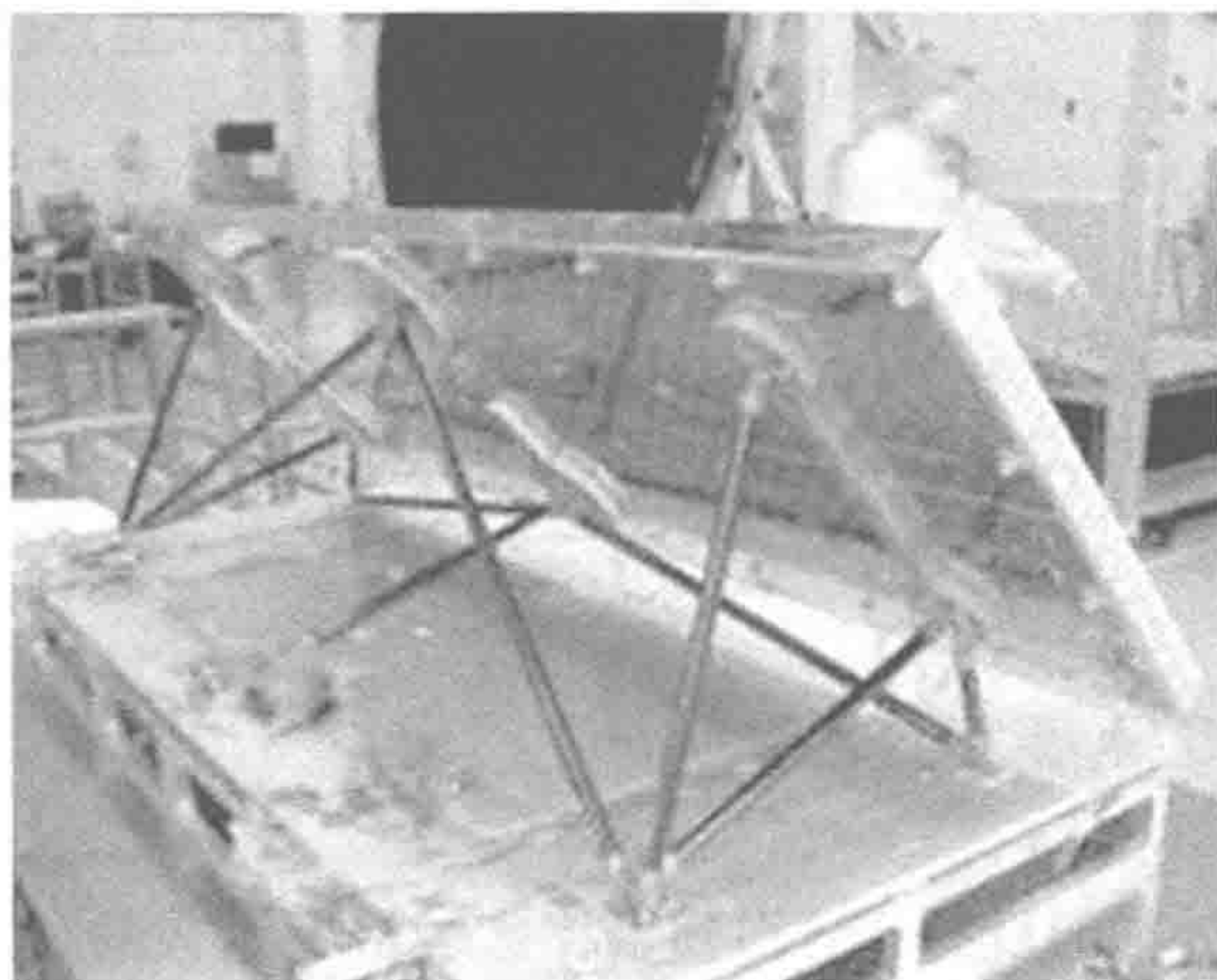


图 1.4 微射频新型合成孔径雷达(Mini RF)

TerraSAR-X^[11]雷达卫星是德国第一颗卫星,如图 1.5 所示,由德国政府和工业界共同研制。TerraSAR-X 可在高 514 km 的极轨道上环绕地球,利用有源天线昼夜搜集雷达数据,无论是气象环境还是云层覆盖的分辨力精度均可达到 1 m。



图 1.5 TerraSAR-X 雷达卫星

2 传统 SAR 原理及成像算法

2.1 SAR 成像原理

SAR 成像处理的目的是要得到目标区域散射系数的二维分布,它是一个二维相关处理过程,通常可以分成距离向处理和方位向处理两个部分。在处理过程中,各算法的区别在于如何定义雷达与目标的距离模型以及如何解决距离-方位耦合问题,这些问题直接导致了各种算法在成像质量和运算量方面的差异。

一般来说,忽略多普勒频移所引起的距离向相位变化,距离向处理变为一维的移不变过程且相关核已知,即退化为一般的脉冲压缩处理;同时将雷达与目标的距离按 2 阶泰勒(Taylor)展开并忽略高次项,则方位向处理也是一个一维的移不变过程,并退化为一般的脉冲压缩处理,这就是经典的距离多普勒(Range Doppler, RD)算法的实质。

若考虑多普勒频移对距离向相位的影响,同时精确地建立雷达与目标的距离模型,则不论距离向处理还是方位向处理都变为二维的移不变相关过程。线性调频尺度变换(Chirp Scaling, CS)算法即在此基础之上将二维数据变换到频域,利用 Chirp Scaling 原理及频域的相位校正方法,对二维数据进行距离徙动校正处理、距离向及方位向的聚焦处理,最终完成二维成像处理。

当方位向数据积累延迟小于全孔径时间(即方位向为子孔径数据)的情况下,方位向处理必须使用去斜(Dechirp)处理及频谱分析的方法。在 RD 和 CS 算法的基础之上,采用 Dechirp 处理及频谱分析的方法完成方位向处理的算法分别称为频谱分析(SPECAN)算法和扩展 CS(Extended Chirp Scaling, ECS)算法。

本节以基本的正侧视条带工作模式为例,对 SAR 的成像原理进行分析和讨论。

正侧视条带 SAR 的空间几何关系如图 2.1 所示。图中, $\alpha\beta$ 平面为地平

面, oy 垂直于 $\alpha o\beta$ 平面。SAR 运动平台位于 S 点, 其在地面的投影为 G 点。SAR 运动平台的运动方向 Sx 平行于 $o\beta$, 速度大小为 v_a 。SAR 天线波束中心与地面的交点为 C , CG 与运动方向 Sx 垂直; S 与 C 的距离为 R_s , $\angle B_1SB_2$ 称为天线波束的方位向宽度, 大小为 β_a 。 P 为测绘带内的某一点, 一般情况下取斜距平面 CSP 进行分析, 称 SAR 运动的方向 Sx 为方位向(或方位维), 称天线波束指向方向 SC 为距离向(或距离维)。

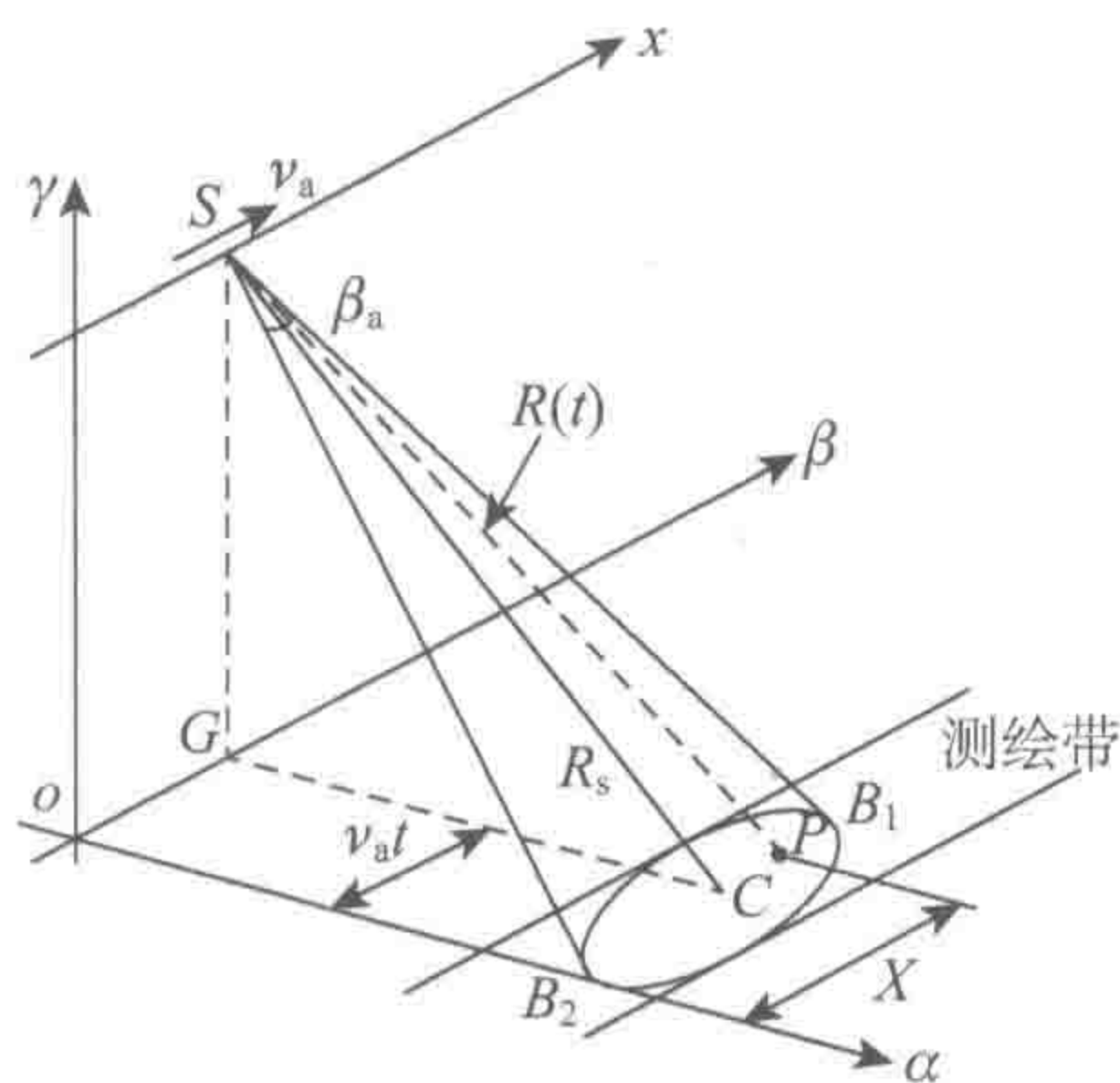


图 2.1 正侧视条带 SAR 几何关系示意图

假定 P 的方位向坐标为 X ; 在 t 时刻, SAR 运动平台 S 与 P 的距离为 $R(t)$ 。若当 $t=0$ 时刻, SAR 运动平台位于方位向 0 点, 则 t 时刻, $R(t)$ 的表达式为:

$$R(t) = \sqrt{R_s^2 + (v_a t - X)^2} \quad (2.1)$$

将式(2.1)在 $\frac{X}{v_a}$ 附近进行 2 阶 Taylor 展开, 有:

$$\begin{aligned} R(t) &= R\left(\frac{X}{v_a}\right) + R'\left(\frac{X}{v_a}\right) \left(t - \frac{X}{v_a}\right) + \frac{1}{2} R''\left(\frac{X}{v_a}\right) \left(t - \frac{X}{v_a}\right)^2 \\ &= R_s + \frac{(v_a t - X)^2}{2R_s} \end{aligned} \quad (2.2)$$

假设雷达发射连续的正弦波, 即发射信号 $S_t(t)$ 为:

$$S_t(t) = \text{Re}(A e^{j\omega_c t}) \quad (2.3)$$

式中, A 为发射正弦波的幅度; ω_c 为发射信号的载频。

发射信号 $S_t(t)$ 经点目标 P 散射后, 雷达接收机接收到的信号 $S_r(t)$ 为:

$$S_r(t) = \text{Re}[KAe^{j\omega_c(t-\alpha)}F(x)] \quad (2.4)$$

式中, c 为光速; K 为复常数; α 为回波信号相对于发射信号的时间延迟, 且:

$$\alpha = 2R(t)/c \quad (2.5)$$

$F(x)$ 为考虑雷达水平方向增益变化而引入的加权函数。若不考虑雷达天线的加权作用, 即令 $F(x) = 1$, 则式(2.4)变为:

$$S_r(t) = \text{Re}[KAe^{j\omega_c(t-\alpha)}] \quad (2.6)$$

根据式(2.6), 雷达运动平台相对于点目标的运动将造成回波信号的相位随时间不断变化, 从而引起回波瞬时频率的变化, 产生多普勒频移。多普勒频移量 $f_d(t)$ 为:

$$f_d(t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d(\omega_c \alpha)}{dt} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[\frac{2\omega_c R(t)}{c} \right] \quad (2.7)$$

将式(2.2)内的 $R(t)$ 代入可得:

$$\begin{aligned} f_d(t) &= -\frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[\frac{2\omega_c R(t)}{c} \right] \\ &= -\frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left\{ \frac{2\omega_c R_s}{c} \left[1 + \frac{(v_a t - X)^2}{2R_s^2} \right] \right\} \\ &= -\frac{2v_a^2}{\lambda R_s} (t - t_0) \end{aligned} \quad (2.8)$$

式中, λ 为雷达工作波长, 且 $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega_c}$; $t_0 = X/v_a$, 为雷达波束中心通过 P 点的时间。

回波信号的瞬时频率 $f_r(t)$ 为:

$$f_r(t) = f_c + f_d(t) = f_c - \frac{2v_a^2}{\lambda R_s} (t - t_0) \quad (2.9)$$

由式(2.9)可知, 多普勒频移的存在将使回波信号的瞬时频率在载波频率 ω_c 附近作线性变化。也就是说, 由于雷达运动平台匀速直线前进, 回波信号 $S_r(t)$ 在方位向将为线性调频(Chirp)信号:

$$S_r(t) = \text{Re} \left\{ KA \exp \left[j \left(\omega_c t - \frac{4\pi R_s}{\lambda} - \frac{2v_a^2}{\lambda R_s} (t - t_0)^2 \right) \right] \right\} \quad (2.10)$$

其中 $\frac{4\pi R_s}{\lambda}$ 为固定相位项, 略去后, 式(2.10)可简化为: