

## 星载 SAR 成像处理算法综述

李春升 杨威\* 王鹏波

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

**摘要:** 该文首先回顾了欧美等国家星载 SAR 卫星技术的发展历程及发展趋势,介绍了各国在轨卫星及未来卫星发射计划等相关情况,在此基础上对星载合成孔径雷达卫星成像处理算法进行了总结和分析。论文具体分析了各主要成像算法的优缺点并指出其适用范围和应用现状,进而阐述了星载合成孔径雷达成像处理算法的发展趋势,重点介绍了基于压缩感知理论和基于新模式的成像处理算法,并给出了仿真结果。

**关键词:** 合成孔径雷达; 时域算法; 距离多普勒域算法; 多变换域算法; 2 维频域算法

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)01-0111-12

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.20071

## A Review of Spaceborne SAR Algorithm for Image Formation

Li Chun-sheng Yang Wei Wang Peng-bo

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** This paper first reviews the history and trends in the development of spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite technology in the USA and Europe. The basic information regarding launched satellites and future satellite plans are introduced. Then, this paper summarizes and categorizes the imaging algorithms of spaceborn SAR satellites, and analyzes the advantages and disadvantages of each algorithm. Next, the scope and the application status of each algorithm are presented. Then, the paper presents details of trends related to the SAR imaging algorithm, which mainly introduces the algorithms based on compressive sensing theory and new image modes. The simulation results are also presented. Finally, we summarize the development direction of the spaceborne SAR imaging algorithm.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Time-domain algorithm; Range-doppler domain algorithm; Multiple-domain algorithm; Two-dimensional domain algorithm

### 1 概述

随着空间信息遥感技术的快速发展,控制和利用空间成为世界军事强国谋求的重要目标之一,星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)由于其不受天气、气候的影响,能全天时、全天候、高分辨率、大区域对地观测,因此成为空间信息遥感技术飞速发展时代的主旋律之一。

星载 SAR 工作在微波频段,因此和光学遥感手段相比,其对地面植被、沙漠等具有一定的穿透能力,能揭露可能使传统光学成像卫星受骗上当的伪装,常用于发现丛林中的机械化部队、埋藏于地下数米深的设施等,比如美国用“长曲棍球(Lacrosse)”卫星侦察伊朗和朝鲜的地下设施或工事。SAR 对金

属目标具有灵敏的探测能力,特别适用于昼夜监视舰船、坦克、导弹发射架等目标。同时,星载 SAR 在灾害处理、地质与勘探、海洋环境、大气环境、农业、林业、制图等领域也发挥着越来越重要的作用<sup>[1-5]</sup>。

和光学图像的“所见即所得”不同,星载 SAR 原始回波信号呈现出噪声特性,因此如何将类噪声信号经过处理转换成可视图像是星载 SAR 技术研究的核心内容。本文以星载 SAR 卫星的发展为背景,首先介绍星载 SAR 卫星的发展历程、现状及未来趋势,在此基础上结合星载 SAR 卫星工作模式和性能指标对成像处理算法进行总结和阐述,尤其对高分辨率星载 SAR 成像处理算法进行分析。

### 2 星载合成孔径雷达卫星发展概况

从 1952 年 Shervin 首次提出采用相位校正的全聚焦阵列概念以来,合成孔径雷达已历经一个甲子

2012-09-20 收到, 2012-10-08 改回; 2012-10-19 网络优先出版  
国家高技术研究发展计划(863 计划)(2011AA\*\*\*\*\*)资助课题  
\*通信作者: 杨威 yangweigigi@ee.buaa.edu.cn

发展,至今合成孔径雷达已广泛应用于国计民生的各个领域。星载合成孔径雷达卫星的发展主要经历了3个阶段:1970年~1990年为孕育期,美国是主要的研制、发展和应用国家;1990年~2000年为成长期,美国、俄罗斯、欧洲、加拿大和日本在这一时期推进了星载SAR技术的进步;2000年开始进入了蓬勃发展期,欧洲、加拿大、以色列、日本、印度等国先后发射了SAR成像雷达卫星,星载SAR技术的发展推动力已不仅仅依靠单项技术突破,而转变为依靠概念体制的推陈换代。

### 2.1 美国星载SAR卫星发展概况

美国是最早开发和应用合成孔径雷达技术的国家,积累了丰富的研制和应用经验。1978年,美国成功发射了第1颗星载SAR卫星Seasat-1<sup>[6]</sup>,揭开了天基SAR对地遥感观测的序幕。之后,在1981年、1984年和1995年,美国又成功地发射了SIR-A、SIR-B和SIR-C/X-SAR卫星。1988年美国发射了首颗长曲棍球雷达侦察卫星,在海湾战争中发挥了重要的作用。美国星载SAR卫星发展主要包括2个系列,分别是“长曲棍球”雷达成像侦察卫星系列和“太空雷达”成像侦察卫星系列。

#### (1) “长曲棍球”成像侦察卫星

长曲棍球卫星是世界上目前最为先进的星载SAR卫星,从1988年12月发射第1颗卫星至今已经先后发射了5颗长曲棍球卫星,目前长曲棍球1、长曲棍球2、长曲棍球3已经退役,长曲棍球4和长曲棍球5仍在轨工作。长曲棍球卫星重约12~16 t,轨道倾角为 $57^\circ$ 或 $68^\circ$ ,工作在L波段和X波段,具有水平和垂直两种极化方式,最优分辨率可达0.3 m。后续接替长曲棍球卫星工作的是未来成像构架(Future Imagery Architecture, FIA)卫星,在2010年9月21日和2012年4月3日已发射两颗,该卫星采用抛物面天线,最高分辨率为0.3 m。

#### (2) “太空雷达”成像侦察卫星

“太空雷达”(Space Radar, SR)是美国空军和美国国家侦察局的一个联合项目,是第1个真正面向战术应用的侦察卫星系统,因此在星载SAR发展的历史中具有里程碑的意义。Space Radar卫星具备0.1 m高分辨率成像、地面动目标指示(Ground Moving Target Indication, GMTI)、数字地形测绘(Digital Terrain Elevation Data, DTED)、海洋监视和反导以及战场实时调度和接收的能力,因此能直接支持战场作战。

### 2.2 俄罗斯星载SAR卫星发展概况

俄罗斯最早发射过分辨率为15 m的“钻石”民用遥感雷达卫星,但近些年来,俄罗斯在星载SAR

卫星发展领域相对缓慢。俄罗斯计划在未来几年内发射一个完整的高分辨率天基雷达星座。其中,俄罗斯机械制造科研生产联合体正在研制“秃鹰E”(Kondor-E)的卫星,Kondor-E分为光学型和雷达型,其中Kondor-E雷达型卫星为S波段小型雷达卫星,重1150 kg,并采用质量极轻的直径6 m的折叠式抛物面天线。拉沃奇金科研生产联合体为俄罗斯生产“阿尔康2”(Arkon-2)多功能雷达卫星,Arkon-2搭载一部3波段——X、L、P波段雷达,具备1 m分辨率的对地观测能力。

### 2.3 欧洲星载SAR卫星发展概况

近十几年来爆发的局部战争使欧洲认识到,仅依靠美国卫星提供的情报实施作战计划将使得欧洲在未来逐步丧失信息优势及世界事务中的话语权,因此以德国、法国、意大利为首的欧盟各国开始向天基侦察领域进军,并在天基SAR发展中走出一条不同于美国的、成功的、独立的道路。

#### (1) SAR-lupe星座

1998年,德国启动SAR-lupe系统研究工作,该系列的SAR卫星由5颗相同的卫星组成,分布在3个不同的轨道上,每颗卫星重约770 kg,工作在X波段,极化方式为HH,主要用于军事侦察。2008年7月,SAR-lupe中最后一颗SAR卫星入轨标志着欧洲SAR军事侦察卫星完成组网,是欧洲天基侦察能力发展的一个重要里程碑,欧洲从此具备独立、全天时、全天候、高分辨率的军事侦察能力。SAR-lupe具有条带和聚束两种成像模式,可获取多种分辨尺度的SAR遥感图像,得益于其高精度平台控制能力,其聚束模式可通过平台姿态控制实现,获取0.5 m分辨率、 $5.5\text{ km}\times 5.5\text{ km}$ 大小观测区域的图像。

#### (2) TerraSAR-X姊妹星

TerraSAR-X是德国研制的一颗军民两用雷达成像卫星,重1023 kg,工作在X波段,具备全极化的能力,该系列卫星的任务主要是将收集的数据应用于科学研究。TerraSAR-X卫星于2007年6月15日成功发射,具有高分辨率的聚束成像模式,可在1 m分辨率条件下,获得 $5\text{ km}\times 10\text{ km}$ 的测绘带宽(方位 $\times$ 距离)<sup>[7]</sup>。作为TerraSAR-X的姊妹星,TanDEM SAR卫星于2010年6月21日发射成功,并和TerraSAR-X卫星实现协同工作,完成对地表的3维测量,其精度可达到2 m。

#### (3) COSMO-SkyMed星座

COSMO-SkyMed雷达成像卫星星座是由意大利国防部和意大利航天局合作打造的军民两用卫星星座,由4颗卫星组成,每颗卫星重约1700 kg,工

作在 X 波段, 具有全极化的工作能力, 主要用于监视、情报、测绘、目标探测与定位、城市规划、商业成像服务等领域, 目前已有 3 颗卫星成功入轨工作。该系列卫星具有多极化、多模式的特点, 在 0.7 m 分辨率的条件下, 可实现  $10\text{ km} \times 10\text{ km}$  的测绘带宽(方位 $\times$ 距离)<sup>[8]</sup>。

#### 2.4 以色列星载 SAR 卫星发展概况

以色列 TecSAR 卫星的成功发射标志着以色列跻身于世界卫星研制强国之列, 提升了以色列情报获取能力, 尤其是增强了对中东地区态势的信息掌控能力。TecSAR 卫星工作在 X 波段, 其有效载荷是高分辨率 X 波段合成孔径雷达 XSAR, XSAR 的前身是机载型 X 波段多模式雷达, 通过改良将其搭载至卫星平台上。TecSAR 卫星采用了许多创新性技术, 其中质量轻、性能好和工作模式灵活是其最显著的特点。TecSAR 重量约 300 kg, 有效载荷只有 100 kg, 最优分辨率可达 0.7 m, 具有全极化的工作模式<sup>[9]</sup>。TecSAR 具备一种先进的工作模式, 即镶嵌模式(Mosaic), 能在 1.8 m 分辨率条件下, 通过拼接提升覆盖性能。

#### 2.5 加拿大星载 SAR 卫星发展概况

加拿大是最早发展星载 SAR 的国家之一, 早在 1976 年加拿大就开始启动“雷达卫星”(Radarsat)计划。作为最为成功的商用 SAR 系列卫星, 在 1995 年 11 月成功发射并运营了 Radarsat-1 卫星后, 在 2007 年 12 月 14 日再次成功的发射了 Radarsat-2 卫星, 该卫星同 Radarsat-1 一样工作在 C 波段, 重量由 2750 kg 降至 2280 kg。Radarsat-2 不仅继承了 Radarsat-1 卫星的已有的经典工作模式, 并在此基础上提高了星载 SAR 系统性能, 增加了新的工作模式, 其中具有代表性的包括: 全极化工作模式、超宽扫描模式、超精细条带模式(Ultra-Fine)<sup>[10]</sup>。加拿大计划在未来发射 Radarsat-3 卫星, 可和 Radarsat-2 卫星协同工作实现干涉功能。

#### 2.6 日本星载 SAR 卫星发展概况

2006 年 1 月日本发射的“先进陆地观测卫星”——ALOS 是日本目前在轨的最先进的星载 SAR 遥感卫星, 重约 3640 kg, 工作在 L 波段, 主要用于勘探自然资源、地图绘制、灾害监控等方面。ALOS 卫星搭载了 3 个传感器, 其中包括合成孔径雷达(PALSAR), PALSAR 主要有 3 种工作模式, 即条带模式、扫描模式和低数据率模式<sup>[11]</sup>。PALSAR 由于采用 L 波段进行对地观测, 因此不利于实现高分辨率对地遥感观测, 但其优势主要体现在 L 波段的穿透力和全极化信息的获取能力。

### 3 星载合成孔径雷达成像处理算法综述

#### 3.1 SAR 成像处理算法的雏形

合成孔径的概念最早在 1951 年 6 月由美国古德依尔公司(Goodyear Aerospace Co.)的威利提出, 利用频率分析的方法改善雷达的角分辨率。同时期, 伊利亚诺大学控制系统实验室独立的用非相干雷达作实验, 证实了利用频率分析可改善雷达的角分辨率, 并在 1953 年 7 月采用非聚焦型的孔径处理方法得到了第 1 幅合成孔径雷达图像。此外, 美国密执安大学雷达和光学实验室的利思等人发现了光学全息照相和合成孔径雷达概念的相似性, 并将光学处理思想引入合成孔径雷达信号处理中, 并通过机载飞行试验验证了光学处理方法的可行性<sup>[12]</sup>。

在合成孔径雷达概念提出的最初阶段, 许多科学家都尝试了从不同的角度对合成孔径的概念进行阐释, 在阐释的过程中提出了不同的孔径信号合成方法, 如用光学全息处理方法等。在此期间, SAR 信号的成像处理精度不高, 以非聚焦型处理方法为主, 但上述处理方法的提出及实现证明了合成孔径雷达的可行性, 为后续合成孔径雷达的发展奠定了基础。

#### 3.2 SAR 成像处理算法的现状

随着人们对合成孔径概念理解的不断深入, 人们意识到回波信号的存储和处理方式是合成孔径雷达技术的核心所在。上世纪 70 年代, 随着数字处理器的飞速发展, SAR 回波信号已普遍采用数字化的存储和处理方式, 同时按是否进行多普勒相位校正可将 SAR 成像处理算法分为聚焦型处理算法和非聚焦型处理算法。非聚焦型处理算法完全忽略多普勒相位校正这一步骤, 仅使用于低分辨率 SAR 回波信号处理, 如平均滤波等方法。非聚焦型成像处理算法能达到的方位向分辨率为  $\sqrt{\lambda R}/2$ , 分辨率随作用距离增加而恶化。由于作用距离远的原因, 星载 SAR 回波信号处理通常不使用非聚焦型成像处理算法。本节将结合星载 SAR 卫星的发展, 对星载 SAR 聚焦型成像算法进行分析和综述。

**3.2.1 时域处理算法** 时域处理算法主要以后向投影算法(Back Projection, BP)为代表。BP 算法起源于计算机断层扫描技术, 是一种基于时域处理的精确的成像算法<sup>[13]</sup>。其基本思想是通过计算成像区域内每一点到孔径长度内 SAR 天线平台之间的双程时延, 将对应的时域回波信号沿孔径方向进行相干叠加, 使来自该像素点的回波信号为同相, 实现能量的聚焦, 而其它点的回波信号由于相位不同相, 叠加结果趋近于 0, 因此可认为最终叠加结果即为

该像素点的值,从而恢复出每个像素的目标函数。对整个成像区域,按照上述过程逐个像素点地进行相干叠加处理,即可获得最终图像。

理论上,BP算法适用于各种模式回波信号的处理,是一种高精度的处理算法,但其缺陷在于需要消耗大量的计算资源。针对BP算法计算量巨大的缺点,在1996年和1998年,McCorkle,Olle Seger分别提出了四分树和局部BP处理算法,通过分块减小小时域算法的运算量<sup>[14,15]</sup>;2000年,Amier Boag提出一种快速的BP算法,即将成像区域分块,通过分级相干累加减小BP算法的运算量<sup>[16]</sup>。基于上述改进后,BP算法具有更广泛的应用领域,最具代表性的为双站SAR数据处理<sup>[17]</sup>和高轨SAR数据处理。

**3.2.2 距离频域方位时域处理算法** 距离频域方位时域处理算法主要以频谱分析算法(SPECAN)为代表。SPECAN算法起源于线性调频信号处理中的拉伸步进变换,并在1979年为了满足SAR多视处理要求而由欧洲空间技术中心(European Space Research and Technology Centre, ESTEC)和加拿大MDA (MacDonald Dettwiler and Associates Ltd)联合提出的一种SAR实时成像算法。SPECAN算法又叫去斜坡法,是目前国内外最常用的块视成像算法,在RADARSAR, SIR-C, ENVISAT, ALOS以及COSMO-SkyMed的扫描模式数据处理中均用到SPECAN算法。

之所以将SPECAN算法归结到距离频域方位时域的算法,是因为SPECAN算法距离压缩方式和RD算法相同,可在频域采用匹配滤波的方法完成距离信号的聚焦处理。而方位向则是通过时域去斜处理将调频信号变为单频信号后通过FFT变换完成压缩。这样处理的优势在于当方位向数据量比较大的时候可提高方位向的压缩效率。但SPECAN算法在距离校正时仅考虑了距离游走,且忽略距离徙动的空变性,因此SPECAN算法最初主要应用于分辨率比较低的扫描模式数据的成像处理。

为解决SPECAN距离徙动校正问题,Lamri在1998年提出一种改进的SPECAN算法,该算法将SPECAN算法中的标准傅里叶变换替代为变标傅里叶变换,其变换核含有能对方位像素间隔进行等距离调整的距离变标因子,通过Chirp-Z变换可以有效地实现变标傅里叶变换<sup>[18,19]</sup>。

**3.2.3 距离多普勒域处理算法** 距离多普勒域处理算法主要以距离多普勒算法(Range Doppler, RD)为代表。最初,RD算法主要是为处理SEASAT数据而提出的高效处理算法,但由于其概念明确、实

现方法简单,因此还被应用于JERS, ALOS, Radarsat-1, Envisat等星载SAR的数据处理。我国也于1990年,由北京航空航天大学首次利用RD算法获取了国内第1幅星载SAR图像,使用的数据正是SEASAT数据。

在星载SAR发展的孕育期,其分辨率不高,常采用L波段和C波段有效载荷,因此其数据处理的难度主要体现在孔径时间内,卫星同载荷的相对运动导致回波能量轨迹沿距离门弥散,导致方位/距离的耦合。由于这种耦合沿距离向还存在空变特性,因此如何精确、简单的消除耦合对处理的影响,将2维信号处理转变成两个1维信号处理是实现高精度、高效成像处理的关键。

距离徙动校正(Range Cell Migration Correct, RCMC)是方位/距离耦合的表现形式之一。距离徙动校正距离多普勒域内完成是RD算法区别于其它算法的最显著特征,也是称其为距离多普勒算法的原因。RD算法处理核心思想是利用方位向信号的时不变特性,在方位频域,即多普勒域内对距离位置相同而方位位置不同的一组目标一次完成距离徙动校正,在距离多普勒域内高效实现RCMC。RD算法的另一个特点在于能沿距离向调整参数,补偿RCMC的距离空变特性<sup>[20]</sup>。

二次距离压缩(Secondary Range Compression, SRC)是方位/距离耦合的另一个表现形式。在高分辨率或大斜视角条件下,在距离多普勒域内线性调频信号的调频率发生了变化,使用初始的线性调频斜率进行距离压缩将造成距离散焦<sup>[21]</sup>。这种现象可解释为在高分辨率或大斜视角条件下,每一距离单元内的时间带宽积发生了变化,因此距离向相位将受到方位向FFT的影响。SRC滤波函数是距离时间和方位频率的函数,根据不同的近似方式, SRC的实现方式主要分为3种,第1种是在距离频域-方位时域进行SRC,此时认为SRC和距离时间及方位频率均无关,这种情况下可将SRC操作合并到距离压缩步骤中。第2种是在2维频域中进行SRC,考虑其和方位向频率的相关性,忽略其随距离时间的变化。第3种是在距离多普勒域内进行SRC,同时考虑其和距离时间和方位频率的相关性,第3种方法精度最高,但操作复杂,计算量大,通常情况下不采用第3种处理方式。

在众多聚焦型算法中,RD算法是最容易理解的一种算法,其处理过程可视为回波接收的逆过程。RD算法通常用以处理分辨率为3 m~10 m的条带模式回波数据,综合考虑处理精度和效率, SRC建议采用第2种方式。以5 m分辨率为例,对于L波

段数据, 如 SEASAT, 在斜视角度小于  $5^\circ$  时即可满足处理精度要求; 对于 C 波段数据, 如 Radarsat-1, 在斜视角度小于  $15^\circ$  时均可满足处理精度要求; 对于 X 波段数据, 如 TerraSAR, 在斜视角度小于  $20^\circ$  时均可满足处理精度的要求<sup>[22]</sup>。

**3.2.4 多变换频域算法** 多变换域处理算法主要以线性变标算法(Chirp Scaling, CS)和频率尺度变换算法(Frequency Scaling, FS)为代表, 下面分别予以介绍。

#### (1) CS 算法

RD 算法易于理解和实现, 但其最大的缺陷在于距离徙动校正时的插值操作将消耗大量的计算资源, 因此在高分辨率、大斜视角条件下, RD 算法在处理效率上并无优势。基于上述原因, 出现了距离多普勒域外的其它成像算法, 其中最具代表性的为 CS 算法。

CS 算法由 MacDonalD Dettwiler 的 Ian Cumming 和 Frank Wong 以及德宇航的 Richard Bamler 团队在 1993 年共同提出, 并很快的被应用于德宇航 SAR 地面处理器中<sup>[23]</sup>。CS 算法的重要贡献在于避免了 RCMC 中的插值操作, 该算法的本质是基于 Papoulis 提出的 Scaling 原理, 通过对 Chirp 信号进行频率调制, 实现信号的尺度变化和时移, 从而利用复数相乘和快速傅里叶变换即可完成回波信号的处理, 因此处理效率大大提高<sup>[24]</sup>。

由于频率变标或时移不能过大, 否则引起信号中心频率和带宽的改变, 因此 CS 算法对距离徙动的校正通过两步完成的。首先在距离多普勒域补偿距离徙动的空变特性, 将处理不同距离向位置目标的距离徙动曲线校正成相同的形式, 进而在 2 维频域内完成残余距离徙动的精确校正, 因此 CS 算法是一种多变换频域算法。其次, CS 算法中考虑了 SRC 对方位频率的依赖问题, 因此其二次压缩效果同 RD 算法中 SRC 第 2 种方式的效果相当, 但在处理效率上却远优于 RD 算法。

经典线性变标算法推导过程中对 2 维频谱采用了近似的手段, 因此在处理高分辨率或大斜视角星载 SAR 回波数据上具有局限性, 体现在 RCMC 不精确造成距离向左右旁瓣不对称以及方位向残留相位误差影响方位向聚焦效果。针对上述问题, Davidson 等人提出了斜视角条件下的非线性变标算法, 一定程度上缓解了 2 维频谱近似处理对聚焦效果的影响<sup>[25]</sup>。以 3 m 分辨率为例, 利用非线性变标算法能在斜视  $15^\circ$  的条件下完成回波信号的精确成像处理。

CS 算法是一种更为高效、精确的处理算法, 其

处理过程无需插值, 仅需 FFT 操作和复数相乘即可完成, 适用于目前在轨 SAR 卫星条带模式回波信号的处理。同时, 以 CS 算法为内核衍生出许多的扩展算法, 包括适用于扫描模式的 ECS 算法<sup>[26]</sup>、适用于聚束模式的 DCS 算法和两步算法<sup>[27,28]</sup>、适用于 TOPS 模式的 BAS 算法<sup>[29]</sup>、适用于滑动聚束模式、TOPS 模式以及逆 TOPS 模式的三步成像算法等<sup>[30]</sup>。上述算法拓展了 CS 算法在不同分辨率、不同成像模式数据处理上的应用, 但当分辨率优于 0.5 m 时, 上述扩展算法不再使用, 需进行其它改进才能完成信号的精确处理。

#### (2) FS 算法

频率尺度变换算法(FS)算法是 CS 算法的变形, 由 Josef Mittermayer 提出并用于聚束模式数据的处理<sup>[31]</sup>。FS 算法要求所处理的数据为距离向解线性调频(Dechirp)之后的数据。该算法通过使用新的频率 Scaling 函数, 在不进行插值的情况下对距离徙动进行精确矫正。

与标准 CS 算法一样, FS 算法没有考虑二次距离压缩随目标距离的变化。对于大斜视角数据, 由于二次距离压缩误差的影响, 偏离参考距离的散射点无法精确聚焦, 因此 FS 算法不适合处理大斜视角数据。为此, 文献[32]提出用不同的参考距离对数据进行二次距离压缩的改进 FS 算法, 能得到较好的成像效果。文献[33]提出了一种改进 FS 算法, 该算法消除了信号在距离多普勒域中所作的泰勒展开近似, 实现了对参考距离目标的精确二次距离压缩和距离徙动矫正。同时补偿了 SRC 随距离变化的残余误差, 改善了测绘带边缘目标的聚焦性能。

**3.2.5 2 维频域算法** 2 维频域算法主要以  $\omega_k$  算法和 Chirp-Z-Transform(CZT)算法为代表, 下面分别予以介绍。

#### (1) $\omega_k$ 算法

CS 算法在二次距离压缩时忽略了其随距离时间的变化, 且在 2 维频域上采用了近似的表达形式, 因此无法适用于超高分辨率、超大斜视角的回波信号处理。RD 最精确的处理算法虽能满足处理精度的要求, 但在高分辨率、大斜视角条件下, 其 2 维插值核函数长度急剧增加, 消耗的计算资源难以接受。因此上述两种处理算法在处理高分辨率、大斜视角的数据时均具有局限性。为克服上述缺陷,  $\omega_k$  算法在 2 维频域通过 stolt 操作校正方位/距离的耦合, 且在推导过程中采用了精确的表达形式, 因此  $\omega_k$  具备处理高分辨率、大斜视角回波数据的能力。

$\omega_k$  算法最早源自于地震信号的处理。1987 年, Hellsten 和 Anderson 首次在 SAR 领域中使用了 Stolt

映射<sup>[34]</sup>, 并对 Carabas 数据进行处理<sup>[35]</sup>。Bamler 通过数字信号处理的方式完成了对  $\omega_k$  算法的推导<sup>[36]</sup>。和 CS 算法推导过程不同, 在 2 维频域的表达上,  $\omega_k$  算法采用的是完全精确的表达形式, 因此  $\omega_k$  算法十分适合于处理大孔径、高分辨率的数据。从推导过程中, 也不难发现  $\omega_k$  算法在处理高分辨率回波信号方面的优势, 但其仍然存在 3 个方面的缺陷, 第一是推导过程中假设等效速度不随距离发生变化, 这将限制其对宽测绘带 SAR 数据的处理能力; 第二是处理过程需要插值, 因此处理效率不如 CS 算法; 第三是现有的  $\omega_k$  算法均假设卫星飞行轨迹为直线, 在高分辨率条件下上述假设存在误差, 因此现有  $\omega_k$  算法难以满足超高分辨率 SAR 信号的处理。  $\omega_k$  算法存在多种近似<sup>[37]</sup>和改进的方式<sup>[38,39]</sup>, 但从本质上讲, 仍是处理效率和处理精度的折中考虑。

### (2) Chirp-Z-Transform 算法

Chirp-Z-Transform 算法是一种基于 Chirp Z 变换的成像算法, 该算法是在 2 维频域通过 Chirp Z 变换对距离徙动进行补偿, 是一种精确的成像算法。CZT 算法应用于意大利高分辨率星载 SAR 系统 COSMOS-Skymed 的数据处理。

CZT 算法的优点在于该算法无需对回波信号进行距离压缩、处理过程计算量较小、图像保真度高。同时由于该算法在 RCM 校正过程中不依赖线性调频信号的线性调频特性, 因此它可以应用于对非线性调频合成孔径雷达回波信号进行 RCMC。

CZT 算法同样没有考虑二次距离压缩随目标距离的变化, 当在大斜视角或者距离向宽幅成像时, 远离参考点处, 存在较大的二次距离压缩误差, 影响成像精度。为了解决这个问题, 文献[40]提出了一种分块 CZT 算法, 算法将成像区域的距离幅度进行分块, 通过缩小成像区域的距离宽度来减小 SRC 补偿的剩余误差。文献[41]对该算法进行了进一步改进, 在成像区域沿距离向连续分块, 进而在 SAR 接收数据的 2 维频域中沿距离频率为连续分块, 以降低 SRC 补偿剩余误差, 提高成像的距离分辨率。事实上, 将 CZT 算法思想应用于其它算法, 可以简化方位向处理、提高运算效率、增强图像质量。文献[42]提出了一种基于 CZT 算法的改进极坐标格式算法用于处理聚束模式的 SAR 数据。

**3.2.6 极坐标域算法** 极坐标域算法以极坐标格式 (Polar Format, PF) 算法为代表。极坐标格式算法是一种典型的聚束 SAR 成像算法。该算法对回波信号进行 Dechirp 接收, 在时域将参考点回波信号作为参考解调信号对回波信号进行解调, 解调后的信号

经 2 维插值, 再做 2 维 FFT 得到图像。

PF 算法采用极坐标格式存取数据可以有效减少系统所需空间, 自聚焦兼容性好。但也存在两个问题。第一, 去调频过程会带来残余视频相位 (Residual Video Phase, RVP), 不经处理会引起几何失真及方位散焦; 第二, 将极坐标格式转化为直角坐标格式的差值处理运算量大, 且差值精度会影响聚焦效果。对于第 1 个问题, 文献[43]提出了一种滤波方式以消除 RVP。针对第 2 个问题, 文献[44]首先提出采用 Chirp-Z 变换 (CZT) 实现方位向重采样以代替方位向插值。文献[45]提出在方位向、距离向均采用 CZT 达到完全避免差值的效果, 运算效率大大提高。文献[46]提出了一种基于 Scaling 原理的距离向重采样方法来替代距离向插值, 在完成距离向重采样的同时去除 RVP, 而方位向依然采用 CZT, 这样 PF 算法实现步骤更为简单。文献[47]基于时域 PF 算法, 提出了一种频域 PF 算法, 该算法直接将回波信号经距离向 FFT 变换到距离频域, 与参考点回波信号的频域共轭相乘, 然后进行 2 维插值, 做 2 维 IFFT 后得到图像。该算法因不进行 Dechirp 操作, 故可避免残余视频相位问题。文献[48]分析了将改进的极坐标格式算法用于非规则圆轨迹 SAR 成像, 其优势是计算效率高, 复杂度低。

### 3.3 SAR 成像处理算法的趋势

结合星载 SAR 技术的发展趋势不难发现, 目前 SAR 成像处理算法的发展趋势主要有两个方向。第 1 个方向是基于新理论的星载 SAR 成像处理算法, 其中以压缩感知理论在 SAR 成像处理中的应用为代表。第 2 个方向是基于新模式的星载 SAR 成像处理算法, 其中以面向中高轨 SAR 的成像算法、面向参数捷变 SAR 的成像算法以及面向 0.1 m~0.3 m 高分辨率星载 SAR 成像处理算法为代表。

**3.3.1 基于压缩感知理论的成像处理算法** 现代雷达系统所追求的高分辨率、高成像幅宽, 驱使人们去获取并处理越来越多的数据; 基于奈奎斯特采样定理和经典数字信号处理理论的雷达系统设计规模越来越大, 探测器成本也越来越昂贵。在处理庞大数据的过程中, 人们发现所获取的数据和观测场景之间经常存在着很大的不平衡性: 雷达获取庞大的数据, 而最后由系统处理得到的结果却又只保留其中小部分有用的信息。

2006 年, Donoho 等人提出了压缩感知 (Compressive Sensing, CS) 理论<sup>[49]</sup>, 为以上矛盾的解决提供了一种方法。它是近几年发展起来的建立在信号稀疏表示和逼近理论基础上的一个全新的研究领域。其充分利用目标场景的稀疏特性, 可以工作

在欠奈奎斯特采样率上，通过非线性迭代等方法，能较理想的恢复出与全奈奎斯特采样相近的结果。

2010年，Ender等人发表了综述性论文<sup>[50]</sup>，首次系统地论述了压缩感知在合成孔径雷达中的几种较为可能的应用前景。同年，我国973计划也正式设立了该方向的研究课题。2012年在德国召开了首届压缩感知雷达会议(CoSara2012)。近年来，越来越多的文献及科研成果证明，将压缩感知方法在低数据量成像、高维度成像、图像质量提升、动目标检测等方面都有很大的应用价值。

图1和图2分别给出了基于压缩理论的成像处理结果，从处理结果可看出，利用压缩感知理论可实现稀疏数据的精确成像。

### 3.3.2 基于新模式的成像处理算法

#### (1) 面向中、高轨的 SAR 成像处理算法

为满足对重要区域持续观测的应用需求，中、高轨星载 SAR 技术成为未来发展的方向之一，这也体现了未来星载 SAR 发展空间分布层次化的特点。中、高轨星载 SAR 分辨率性能不高(> 5 m)，但由于其轨道高度高、合成孔径时间超长，致使传统高效成像处理算法所假设的等效斜距模型已经失效，从而导致数据处理难度变大。对于中轨 SAR 数据，通常采用基于改进等效斜距模型的成像处理算法，文献<sup>[51]</sup>在2010年提出了基于改进等效斜距模型的非线性 CS 算法，较好地解决了中轨条件下运动轨迹的精确描述以及聚焦问题；文献<sup>[52]</sup>在2012年进

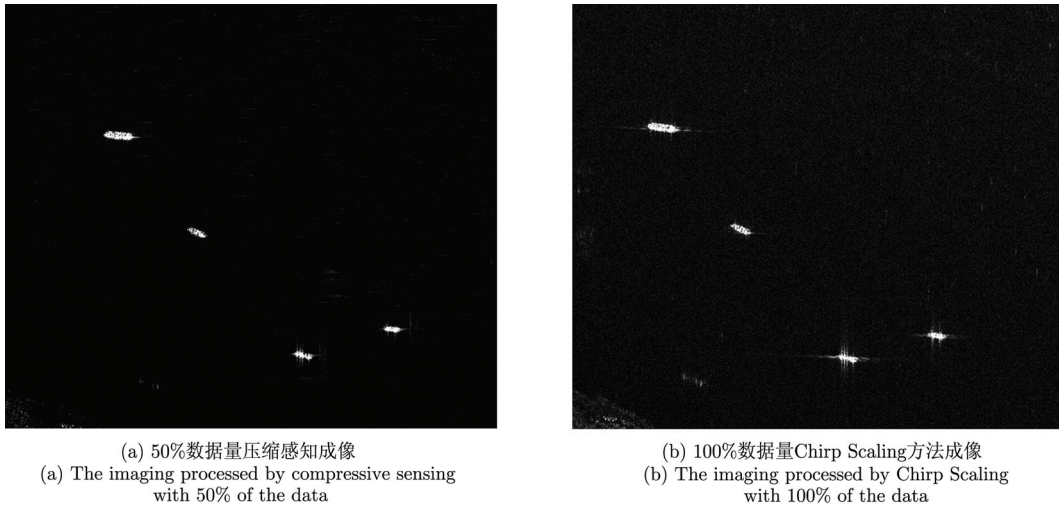


图1 温哥华 English 湾出海口

Fig. 1 The estuary of Vancouver English Bay

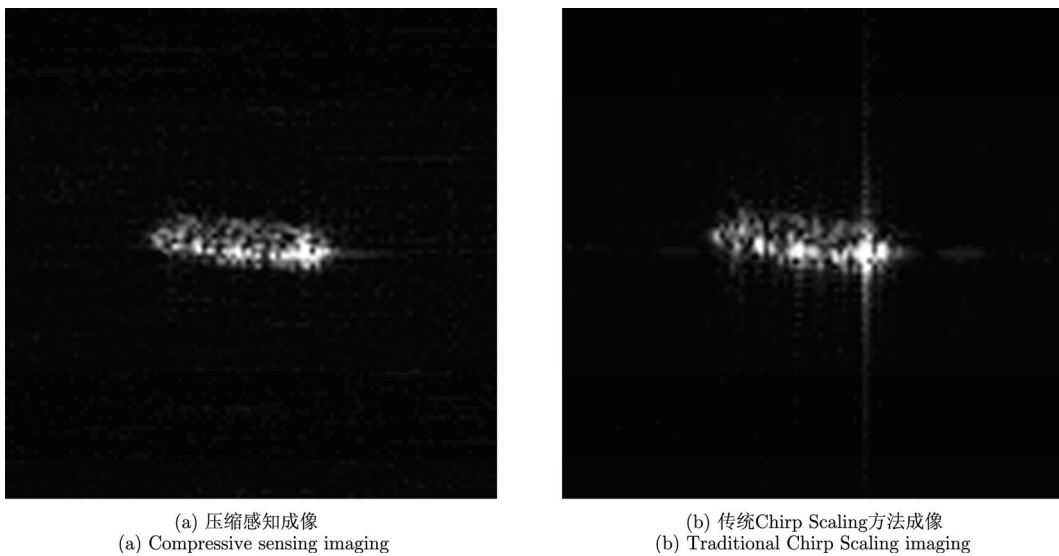


图2 Radarsat-1 商船成像细节

Fig. 2 The imaging of a merchant ship processed by Radarsat-1

一步提出了基于 KeyStone 变换的成像处理方法,也较好地完成了中轨 SAR 数据的聚焦处理问题。对于高轨 SAR 数据,由于卫星和目标的相对运动关系十分复杂,改进等效斜距模型也难以精确描述其运动轨迹,因此通常采用 BP 算法进行处理<sup>[53]</sup>,但其缺陷在于计算量较大。图 3 给出了基于改进 BP 算法的成像处理结果。通过图 3 示结果不难看出,基于改进 BP 算法能够实现数据的精确聚焦处理。

(2) 面向参数捷变 SweepSAR 的成像处理算法系统设计时,制约星载 SAR 测绘带宽的两个重要因素为星下点回波和发射脉冲遮挡,为缓解这一问题,Gerbert 等人提出基于重频捷变的 Sweep 工作模式<sup>[54,55]</sup>,通过重频变化跨越脉冲遮挡,通过数字波束形成技术(Digital Beam Forming, DBF)抑制星下点回波。这种成像工作模式具有适用于中等分辨率、广域监视的应用,能实现 5 m 分辨率,400 km 测绘带宽的性能。由于重频捷变造成方位向信号非均匀采样,传统的处理算法难以直接使用,因此针对 SweepSAR 数据的处理,北京航空航天大学最近提出了基于拉格朗日插值高效处理算法,图 4 给出了不同扫描周期条件下的成像处理结果,其分辨率为 5 m。

通过图 4 所示结果不难看出,利用基于拉格朗日插值的高效 CS 算法能在不同的扫描周期下完成数据的精确聚焦处理。

(3) 面向高分辨率、宽覆盖成像模式的处理算法追求高分辨率是星载 SAR 永恒的目标,但在传统星载 SAR 体制下,高分辨率和宽覆盖存在相互制约的关系<sup>[56]</sup>,因此为同时实现高分辨率和宽覆盖必须冲破传统的工作模式。目前实现高分辨率宽覆盖有多种手段<sup>[57]</sup>,但最具代表性的多通道滑动聚束模

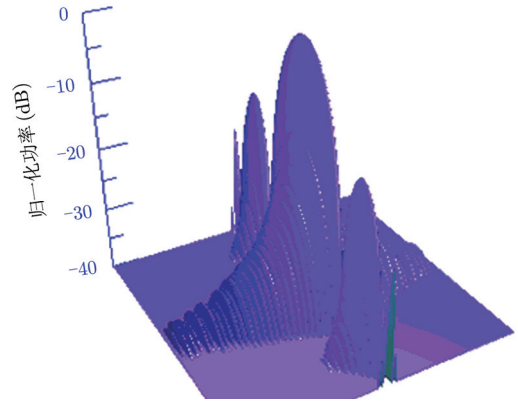


图 3 基于改进 BP 算法的成像处理结果

Fig. 3 The imaging result processed by modified BP algorithm

式,该模式有望在 TerraSAR-X2 上首次实现<sup>[58]</sup>。对于多通道滑动聚束模式的处理,其存在 4 个技术难点:首先,方位向非均匀采样校正需要在方位向欠采样的条件下完成,这是其和多通道条带模式的主要差异;其次,等效斜距模型难以满足处理精度的要求,需要构建更为精确的处理模型;再次,高分辨率、宽覆盖条件下对 2 维频谱精度的要求更高,需要补偿高阶项;最后是方位向参数的空变特性导致无法一次处理方位向过大的场景,需要制订合适的分块策略。充分考虑上述因素后,可获取高分辨率的星载 SAR 图像。为证明上述分析的正确性,以德国 HRWS 模式(0.25 m)和美国太空雷达计划(0.1 m)为背景开展回波仿真及成像处理试验,图 5 分别给出了 0.25 m 和 0.1 m 分辨率的成像处理结果 2 维投影图。

### 3.4 SAR 成像处理算法总结

SAR 成像处理算法的发展历史实际上反映的是其对星载 SAR 成像模式、工作体制、性能指标不断更新与提高的适应过程,如图 6 所示。因此随着未

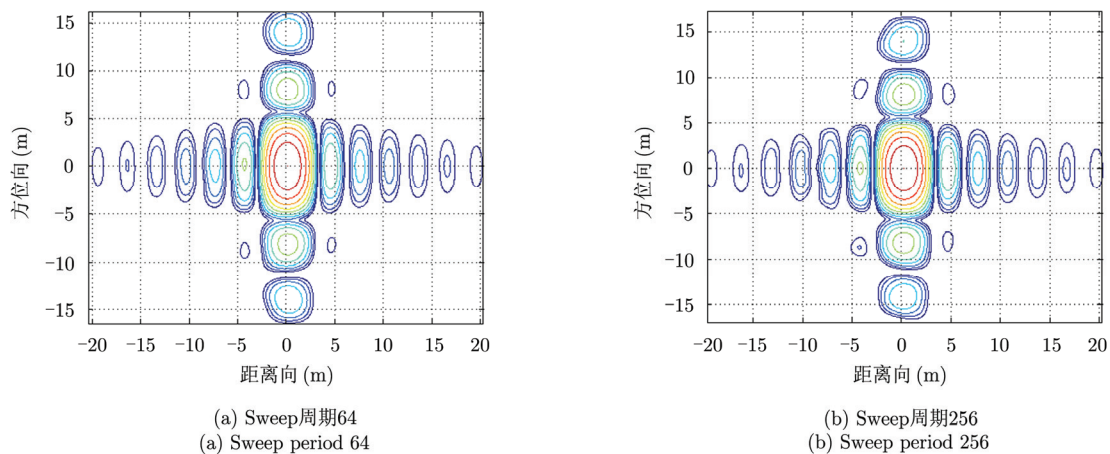


图 4 基于拉格朗日插值的 SweepSAR 数据处理结果

Fig. 4 The processing results with SweepSAR data based on Lagrange interpolation



来星载 SAR 技术的不断发展,新的或改进的成像处理算法也必将不断出现,以支撑星载 SAR 技术的飞速发展。

### 4 结束语

星载合成孔径雷达在空间遥感中发挥着不可替代的地位,且自 2000 年以来已取得了飞速的发展,星载 SAR 技术的发展趋势可概括为“单项技术突破

向概念体制更新转变、单源信息应用向多源信息应用转变、支持战略应用向支持战术应用转变”。星载 SAR 技术的发展趋势决定了 SAR 成像处理算法的发展趋势,在工程应用方面,尽可能对成熟的算法进行改进,使其具备更广泛的应用范围;而在前沿技术研究方面,则需注重新理论、新技术、新方法在 SAR 数据处理方面的应用,为星载 SAR 的可持续发展奠定技术储备。

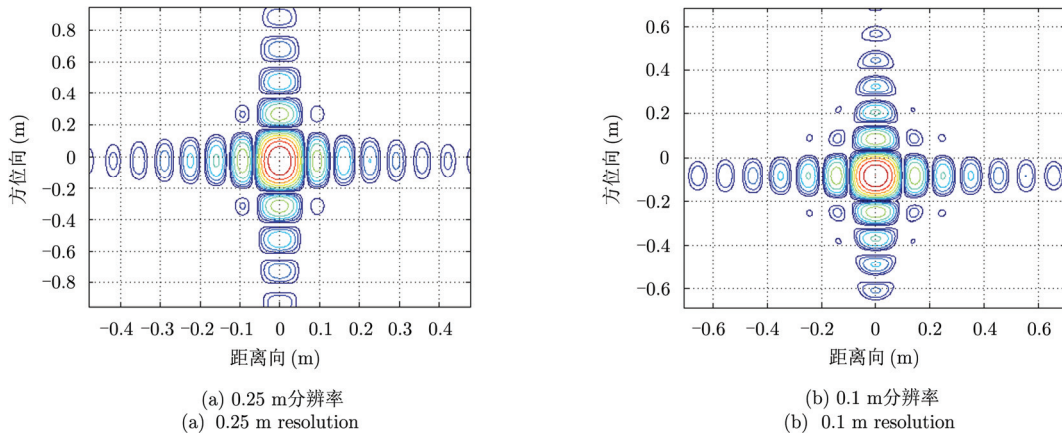


图 5 高分辨率、宽测绘带成像处理算法处理结果示意图

Fig. 5 The imaging results processed by high-resolution wide-swath imaging algorithm

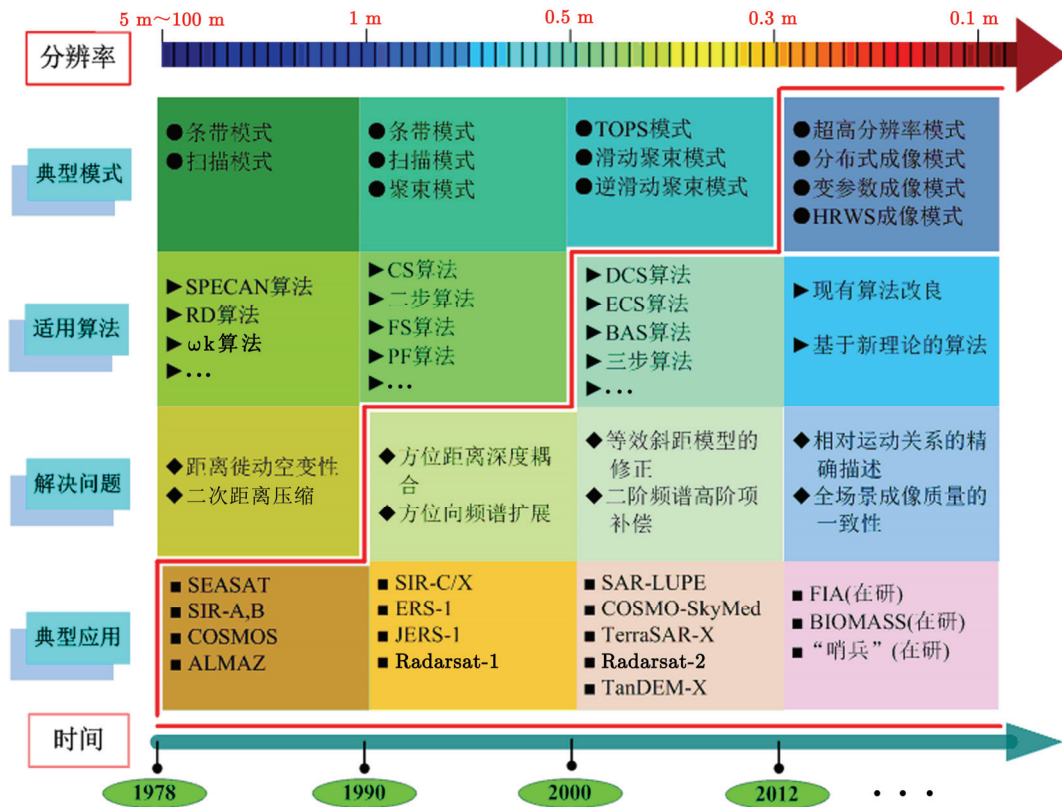


图 6 星载 SAR 成像处理算法发展历史示意图

Fig. 6 The diagram of the development history of spaceborne SAR imaging processing algorithms

## 参考文献

- [1] Marino A, Walker N, and Woodhouse I. Ship detection with Radarsat-2 Quad-Pol SAR data using a Notch filter based on perturbation analysis[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hawaii, IEEE Press, 2010: 3704-3707.
- [2] Migliaccio M, Gambardella A, Nunziata F, *et al.* ALOS-PALSAR Polarimetric SAR data to observe sea oil slicks[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, South Africa, IEEE Press, 2009: 669-672.
- [3] Margarit G, Malloriqui J J, and Pipia L. Polarimetric characterization and temporal stability analysis of urban target scattering[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2038-2048.
- [4] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1-10.  
Deng Yun-kai, Zhao Feng-jun, and Wang Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 1-10.
- [5] 王海洋, 江月松. 北斗卫星后向散射信号的星-星合成孔径成像系统: 概念与可行性[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 209-216.  
Wang Hai-yang and Jiang Yue-song. A synthetic aperture system based on backscattering signals of compass navigation satellite: concept and feasibility[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 209-216.
- [6] Townsend W. An initial assessment of the performance achieved by the Seasat-1 radar altimeter[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1980, 5(2): 80-92.
- [7] Lehner S, Schulz-Stellenfleth J, Brusch S *et al.* Use of TerraSAR-X data for oceanography[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Friedrichshafen, Germany, 2008: 1-4.
- [8] Caltagirone F, Spera P, and Vigliotti R. SkyMed/COSMO mission overview[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, USA, IEEE Press, 1998: 683-685.
- [9] Naftaly U and Levy-Nathansohn R. Overview of the TecSAR satellite hardware and Mosaic mode[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 423-426.
- [10] Brule L, Delisle D, Baeggli H, *et al.* RADARSAT-2 program update[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Korea, IEEE Press, 2005: 9-11.
- [11] Pottier E and Ferro-Famil L. Exploitation of ALOS-PALSAR SAR full-polarimetry data to the mapping of an African region[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, South Africa, IEEE Press, 2009: 9-12.
- [12] 张澄波. 合成孔径雷达[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-37.
- [13] 林世斌, 李悦丽, 严少石, 等. 平地假设对合成孔径雷达时域算法成像质量的影响研究[J]. 雷达学报, 2012, 1(3): 309-313.  
Lin Shi-bin, Li Yue-li, Yan Shao-shi, *et al.* Study of effects of flat surface assumption to synthetic aperture radar time-domain algorithms imaging quality[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(3): 309-313.
- [14] McCorkle Jone and Rofheart Martin. An order  $N^2 \log(N)$  back-projection algorithm for focusing wide-angle wide-bandwidth arbitrary-motion synthetic aperture radar[J]. *SPIE*, 1996, 2747: 25-36.
- [15] Olle Seger, Magnus Herberthson, and Hans Hellsten. Real time processing of low frequency ultra wide band radar data[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, May 1998: 489-492.
- [16] Amir Boag, Senior Member, Yoram Bresler, *et al.* A multilevel domain decomposition algorithm for fast  $O(N^2 \log(N))$  reprojection of tomographic images[J]. *IEEE Transactions on Imaging Processing*, 2009, 9(9): 1573-1581.
- [17] Yu Ding, David C Munson Jr. A fast back-projection algorithm for bistatic SAR imaging[C]. International Conference on Image Processing, New York, 2002, Vol.2: 449-452.
- [18] Lanari R and Hensley S. Chirp z-transform based SPECAN approach for phase-preserving ScanSAR image generation[J]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 1998, 145(5): 254-261.
- [19] Lanari R, Hensley S, and Rosen P. Modified SPECAN algorithm for ScanSAR data processing[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, USA, IEEE Press, 1998: 636-638.
- [20] Jin M J and Wu C. A SAR correction algorithm which accommodates large range migration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1984, 22: 592-597.
- [21] Wong F H and Cumming I G. Error sensitivities of a secondary range compression algorithm for processing squinted satellite SAR data[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Canadian, IEEE Press, 1989: 2584-2587.
- [22] Gunning I G and Wong F H. Synthetic aperture radar imaging algorithm and implementation[M]. Beijing: Electronic Industries Press, 2007: 155-191.
- [23] Breit H, Schattler B, and Steinbrecher U. A high precision workstation-based chirp scaling SAR processor[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Singapore, IEEE Press, 1997: 465-467.
- [24] Raney R K, Runge H, Bamler R, *et al.* Precision SAR processing using chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-799.

- [25] Davidson G W, Cumming I G, and TOM R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(1): 121-133.
- [26] Moreira A, Mittermayer J, and Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123-1136.
- [27] 王国栋, 周荫清, 李春升. 高分辨率星载聚束式 SAR 的 Deramp Chirp Scaling 成像算法[J]. *电子学报*, 2003, 31(12): 1784-1789.  
Wang Guo-dong, Zhou Yin-qing, and Li Chun-sheng. A deramp chirp scaling algorithm for high-resolution spaceborne spotlight SAR imaging[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12): 1784-1789.
- [28] Lanari R, Tesauro M, Sansosti E, *et al.* Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(9): 1993-2004.
- [29] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, *et al.* Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770-780.
- [30] Yang W, Li C S, Chen J, *et al.* A novel three-step focusing algorithm for TOPSAR image formation[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hawaii, IEEE Press, 2010: 4087-4091.
- [31] Mittermayer J and Moreira A. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [32] 郑义明. 用频率变标算法处理大斜视角 SAR 数据[J]. *系统工程与电子技术*, 2000, 22(6): 8-11, 65.  
Zheng Yi-ming. Large squint SAR data processing using frequency scaling algorithm[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(6): 8-11, 65.
- [33] 王建, 宋千, 周智敏. 适用于低频超宽带合成孔径雷达的改进[J]. *信号处理*, 2005, 21(6): 605-610.  
Wang Jian, Song Qian, and Zhou Zhi-min. Modified frequency scaling imaging algorithm of ultra-wideband SAR[J]. *Signal Processing*, 2005, 21(6): 605-610.
- [34] Hellsten H and Anderson L E. An inverse method for the processing of synthetic aperture radar data[J]. *Inverse Problem*, 1987, 3(1): 111-124.
- [35] Ulander L M H and Hellsten H. System analysis of Ultra-Wideband VHF SAR[C]. IEEE International Radar Conference, USA, IEEE Press, 1997: 104-108.
- [36] Bamler R. A comparison of Range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 706-713.
- [37] Bamler R. A systematic comparison of SAR focusing algorithm[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Finland, IEEE Press, 1991: 1005-1009.
- [38] Vandewal M, Speck R, and Stüb H. Efficient and precise processing for squinted Spotlight SAR through a modified stolt mapping[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007, 2007(1): 33-39.
- [39] Reigber A, Alivizatos E, and Potsis A, *et al.* Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with Integrated motion compensation[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 301-310.
- [40] Franceschetti G and Lanari R. New two-dimensional squint mode SAR processor[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(2): 854-863.
- [41] 叶晓东, 朱兆达. 一种分块处理斜视 SAR 成像算法[J]. *现代雷达*, 1997, 19(5): 23-29.  
Ye Xiao-dong and Zhu Zhao-da. An approach for squint SAR imaging based on block processing[J]. *Modern Radar*, 1997, 19(5): 23-29.
- [42] Tang Yu and Xing Meng-dao. Two dimension Chirp-Z transform for polar format imaging algorithm[C]. Conference on Synthetic Aperture Radar, APSAR 2007, 1st Asian and Pacific, 2007: 743-746.
- [43] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar signal processing algorithms[M]. Norwood, MA, Artech House, 1995, Chapter 1-4.
- [44] Lawton W. A new polar fourier transform for computer-aided tomography and spotlight synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1988, 36(6): 931-933.
- [45] Zhu D Y and Zhu Z D. Range resampling in the polar format algorithm for spotlight SAR image formation using the chirp z-transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(3): 1011-1023.
- [46] 李超, 刘畅, 高鑫. 基于距离向 Scaling 原理的聚束 SAR 极坐标格式成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(6): 1434-1439.  
Li Chao, Liu Chang, and Gao Xin. Polar format imaging algorithm based on range scaling for spotlight SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1434-1439.
- [47] 曾海彬, 曾涛, 何佩琨. 星载聚束 SAR 频域极坐标算法研究[J]. *现代雷达*, 2006, 28(1): 28-30.  
Zeng Hai-bin, Zeng Tao, and He Pei-kun. A study on frequency domain polar format algorithm of spaceborne spotlight SAR[J]. *Modern Radar*, 2006, 28(1): 28-30.
- [48] 洪文. 圆迹 SAR 成像技术研究进展[J]. *雷达学报*, 2012, 1(2): 124-135.

- Hong Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 124–135.
- [49] Donoho D. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306.
- [50] Joachim H G Ender. On compressive sensing applied to radar[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(5): 1402–1414.
- [51] Huang L J, Han B, Hu D H, *et al.* Focusing of medium-earth-orbit SAR with advanced nonlinear chirp scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 500–508.
- [52] Huang L J, Han B, Hu D H, *et al.* Medium-earth-orbit SAR imaging based on keystone transform and azimuth perturbation[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, German, Munich Press, 2012: 3608–3610.
- [53] 汪丙南, 向茂生. 地球同步轨道圆迹 SAR 三维分辨特性分析[J]. *雷达学报*, 2012, 1(3): 314–322.  
Wang Bing-nan and Xiang Mao-sheng. Three-dimensional resolution analysis for geosynchronous circular SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(3): 314–322.
- [54] Gerbert N and Krieger G. Ultra-wide swath SAR imaging with continuous PRF variation[C]. Proceedings of EUSAR'10, Germany, VDE, 2010: 966–969.
- [55] Krieger G, Gerbert N, and Moreira A. Multidimensional waveform encoding: a new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 31–46.
- [56] 梁维斌, 李春升, 周荫清. 基于多通道天线高分辨率星载 SAR 实现方法研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, 30(9): 826–830.  
Liang Wei-bin, Li Chun-sheng, and Zhou Yin-qing. High resolution spaceborne SAR implementation method based on multiple phase centres antenna[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(9): 826–830.
- [57] Gebert N, Krieger G, and Moreira A. Digital beamforming on receive: techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2009, 45(2): 564–592.
- [58] Janoth J, Gantert S, Koppe W, *et al.* TERRASAR-X2 mission overview[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, German, Munich Press, 2012: 217–220.

### 作者简介



李春升(1963–), 男, 天津人, 北京航空航天大学, 教授, 博士生导师, 主要从事星载 SAR 系统总体与仿真、多源遥感图像信息融合、信息获取与处理等方面的研究工作。

E-mail: lichunsheng@buaa.edu.cn



王鹏波(1979–), 男, 江西宜春人, 博士, 讲师, 信号与信息处理专业, 北京航空航天大学, 主要从事新体制成像雷达系统技术、高分辨率雷达成像处理以及数字图像处理等方面的研究工作。

E-mail: wangpb7966@163.com



杨威(1983–), 男, 湖北宜昌人, 博士, 信号与信息处理专业, 北京航空航天大学, 主要从事星载 SAR 高分辨率雷达信号仿真与成像技术、新体制雷达技术的研究。

E-mail: yangweigigi@ee.buaa.edu.cn