

基于原始数据域的星载双通道 SAR-GMTI 研究

高 飞¹, 毛士艺¹, 袁运能¹, 玉振明²

(1. 北京航空航天大学 203 教研室, 北京 100083; 2. 广西大学梧州分校, 广西梧州 543002)

摘 要: 提出了两种原始数据域的双通道 SAR-GMTI 实现方法. DPCA-Radon 方法可以完成无杂波情况下的运动目标检测和估计, DPCA-Frft-ATI 方法可以完成受杂波“污染”运动目标的检测和径向速度估计, 该方法提高了信杂比, 提高了目标检测和估计性能, 优于通常的原始数据域方法, 也优于图像域的方法, 并且可实现运动目标的聚焦以及图像域的重新定位. 仿真结果证明了其正确性和有效性.

关键词: 合成孔径雷达; 地面运动目标指示; 天线相位中心偏移法; 沿航迹向干涉; 分数阶傅立叶变换

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2105-06

Study on Raw Data Based Two Aperture Spaceborne SAR-GMTI

GAO Fei¹, MAO Shi yi¹, YUAN Yun neng¹, YU Zhen ming²

(1. Group 203 Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. Wuzhou Branch Guangxi university, Wuzhou, Guangxi 543002, China)

Abstract: The paper proposes two raw data based approaches for two aperture SAR-GMTI. The method of DPCA-Radon successfully detects and estimates parameters of moving targets in clutter free environment. The method of DPCA-Frft-ATI achieves these purposes in clutter rich environment and performs superiorly than commonly used raw data based method and image based detector via improvement of signal to clutter ratio, also it can focus and relocate moving targets. Simulation results indicate feasibility and effectiveness of the methods.

Key words: synthetic aperture radar; ground moving target indication; displaced phase center antenna; along track interferometry; fractional fourier transform

1 引言

星载雷达相比于机载雷达具有可达数千公里大视场、可以实现全球覆盖、不受国别、地理位置、政治等因素限制的优越特性使得星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)-地面运动目标指示(Ground Moving Target Indication, GMTI)成为近来研究热点,如美国曾计划研究的 Discover II^[1]和加拿大正在研究的 Radarsat II^[2]都包含 SAR-GMTI 模式的星载雷达. 目前适用于研究 SAR-GMTI 的主要技术包括天线相位中心偏移法(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)和沿航迹向干涉法(Along Track Interferometry, ATI)^[2,3].

国内外采用多通道实现 SAR-GMTI 的技术主要有三类,第一类在图像域的 DPCA 和 ATI,其优点是经过方位压缩增强了目标信号,目标信杂比(SNR)增加,提高了检测概率,例如文献[2,4]采用这类方法,这类方法的缺点也是显而易见的,两个通道分别需要经过方位压缩,因而增加了计算负荷;第二类是基于原始数据的方法^[5],可以在经距离压缩的数据域即距离-方位域或者再经方位傅立叶变换的距离-多普勒域实

现,其主要缺点是:方位向未做提高分辨率的处理,信杂比较低,不易检测目标;第三类是 DPCA 和干涉处理相结合的三通道或者更多通道方法^[6]. 双通道着重在对消,当涉及多参数估计时需用三通道,但更多通道会增大系统复杂度和计算量并需要额外高昂的费用,许多目前和将来的 SAR 系统尤其是星载系统如 RadarSat II 和 Terre SAR^[7]仅限于两个平行的天线孔径,因此现阶段研究双通道的对消与参数估计是有意义的.

本文提出两种基于未经方位向压缩的原始数据域的 GMTI 实现方法,基本思路是即使目标能量集中时又不丢失相对幅度或者相位信息而易于检测. 一种方法是将 DPCA 和 Radon 变换相结合,由于运动目标在原始数据距离-方位域经 DPCA 杂波抑制后能量沿直线分布,这样利用 Radon 变换的线性相干积累特性,使运动目标能量集中,此方法在无杂波条件下可实现精确的运动参数估计,但对于同时含杂波的情况下运动参数估计精度有下降,通过分析这种主法更加清晰地揭示出杂波干扰的本质;第二种方法是 DPCA、分数阶傅立叶变换(Fractional Fourier Transform, Frft)和 ATI 相结合的方法,通过 DPCA 获得运动目标的先验知识,再通过 Frft 尽可能滤除干

扰的背景杂波,使目标信号在分数阶 Fourier 域集中,这样增加了信杂比最后通过 ATI 实现参数估计,根据估计的参数进一步可以修正匹配滤波器参数,聚焦运动目标使之恢复到图像域原来的位置.以上两种方法避免了方位压缩过程从而降低了计算量.通过仿真和与图像域 DPCA 检测运动目标方法相比较,结果说明了 DPCA Radon 方法在杂波环境中估计精度有所下降,DPCA-Frft ATI 方法行之有效且在估计运动目标参数时性能比图像域的方法优越,实现了运动目标在图像域的聚焦和重新定位.文中基于两个假设条件:①低分辨率,指运动目标在波束照射时间内不会移出距离分辨率;②完成了对静止目标的距离徙动校正.

2 星载双通道 SAR-GMTI 原理

DPCA 技术在上个世纪七、八十年代在机载预警雷达中得到广泛应用,近年来该方法成为多通道 SAR 系统检测慢速运动目标的一个典型方法,例如预计 2005 年发射的星载系统 RadarsatII 沿用此技术.

按照图 1 所示的模型构造基本双通道配置方案,卫星的整个天线用于发射,当前发射位置在卫星天线中心 T_1 ,接收时分为沿着卫星飞行方向放置的前向天线和拖尾天线同时接收,接收位置在 b_1 、 a_1 ,二者相距 $d = 2v \cdot T$ (其中 v 是雷达平台速度, T 是脉冲重复周期),等效相

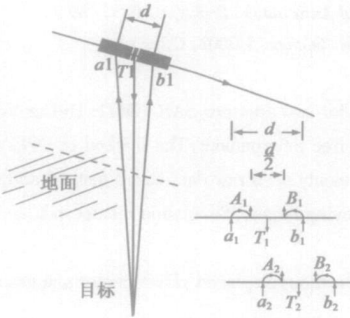


图 1 星载 SAR 双通道配置方案

位中心位置分别在 B_1 、 A_1 ,二者相距 $d/2 = v \cdot T$.图 1 中的插图给出了本次脉冲以及下一个脉冲发射及接收的位置关系,由于限制雷达两次发射位置 T_1 和 T_2 之间的距离为 $v \cdot T$,拖尾天线在接收第二个脉冲时的等效相位中心是 A_2 ,与前向天线在接收第一个脉冲时的等效相位中心 B_1 重合,这样的配置结果使得卫星的观测过程等效于每个相位中心(前向天线和拖尾天线)在不同时间(前后脉冲)在空间同一位置观测地面目标,若地面目标是静止的,两次观测结果完全相同,对消(即相减)以后结果为零;若地面目标是运动的,两次观测结果不尽相同,对消以后有剩余,DPCA 就是利用这个剩余信息来检测运动目标.

可以按照与图 1 的 DPCA 相同的配置方法实现 ATI,ATI 计算干涉相位,固定目标的相位为零,径向速度不为零运动目标的相位不为零,因此利用相位信息差可以检测运动目标.在星载的项目如 SRIM^[8]、TerraSAR^[9] 以及 RadarSat II 中也都沿用此技术.

SAR 体制下利用 DPCA 来实现 GMTI 可用公式统一表示为^[4]

$$I = I_1 - I_2 = |I_1| (e^{j\varphi_1} - e^{j\varphi_2}) \quad (1)$$

式中 I_1 、 I_2 分别表示延时 T 后的前向天线数据和对应拖尾天

线数据, φ_1 、 φ_2 分别表示这些数据的相位, $|I_1|$ 或 $|I_2|$ 表示目标的强度, I 表示二者对消的结果.对于静止目标 $\varphi_1 = \varphi_2$ 使得 $I = 0$,对于运动目标 $\varphi_1 \neq \varphi_2$ 使得 $I \neq 0$.如果对消是在图像域进行, I_1 、 I_2 表示经 SAR 成像后的图像数据;如果对消是在原始数据域进行, I_1 、 I_2 表示经距离压缩的距离-方位维数据或者进一步求方位傅立叶变换的距离-多普勒数据.根据式(1)可推导出经 DPCA 对消后的信号幅度可表示为

$$|I| = 2|I_1| \left| \sin \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) \right| = 2|I_1| \left| \sin \left(\frac{2\pi V_r T}{\lambda} \right) \right| \quad (2)$$

式中 V_r 表示目标沿斜距方向的径向速度, λ 表示波长.若能计算出 $|I|$ 和 $|I_1|$, 就可以根据式(2)计算出 V_r , 进一步计算出目标在地面的速度为

$$V_{ig} = \frac{V_r}{\sin(\theta_{inc})} \quad (3)$$

式中 θ_{inc} 表示波束入射角.

SAR 体制下利用 ATI 来实现 GMTI 可用公式统一表示为^[3]

$$S = I_1 I_2^* = |I_1| |I_2| e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (4)$$

其中干涉相位

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 4\pi \frac{-R_1 + R_2}{\lambda} = 4\pi \frac{V_r T}{\lambda} \quad (5)$$

式中 S 表示两通道的干涉结果, R_1 、 R_2 分别表示前向通道和拖尾通道与目标点的距离.若目标静止 $R_1 = R_2$ 则 $\Delta\varphi = 0$,若 $R_1 > R_2$ 则 $\Delta\varphi < 0$,目标朝着雷达平台方向运动.这时目标在地面的速度 V_{ig} 表示为

$$V_{ig} = \frac{V_r}{\sin(\theta_{inc})} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi T \sin(\theta_{inc})} \quad (6)$$

从上面的分析可以看出估计目标速度的关键问题,对 DPCA 方法在于求得目标的单天线幅度 $|I_1|$ 和经双通道对消后的幅度 $|I|$,对 ATI 方法在于求得干涉相位 $\Delta\varphi$,图像域 $|I_1|$ 、 $|I|$ 和 $\Delta\varphi$ 的值分别是相应像素的幅度或者相位.但是在数据域则无法直接求得这些值.经距离压

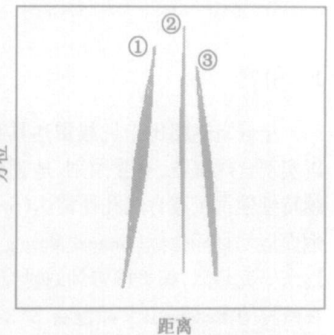


图 2 原始数据域的运动目标和静止目标

缩后的距离-方位维原始数据域中静止目标和运动目标表现形式如图 2 所示.图中关于静止目标经过距离徙动校正,①表示远离卫星平台的运动目标,②表示静止目标,③表示朝卫星方向运动的目标,并且目标①比目标③的速度值大,其距离徙动也大.理论上讲运动目标表现为倾斜的直线,静止目标表现为垂线.若 SAR 成像系统分辨率低或者运动目标速度值小使运动目标的回波数据没有跨越距离门,运动目标也可能表现为垂直的线.经过两通道 DPCA 对消,静止目标②将消失,运动目标①和③则沿着原来的直线保留了部分能量.图上经过针对静止目标的距离徙动校正.由于目标信号能量不集中,必

须寻找新的方法求得需要的幅度和相位。

3 Radon 变换

Radon 变换^[10]是 J Radon 于上世纪初提出的, 很长时间内没有引起人们的兴趣, 后来找到其离散快速计算方法并在医学成像和遥感成像等方面的应用使其受到广泛重视。Radon 变换把二维数据或 (x, y) 中的直线转变为新的参数域 (ρ, θ) 中的峰, 其中 ρ 是坐标原点(取数据域中心为二维数据的坐标原点)到所提取直线的最短距离称为截距, θ 用来定位直线的角度称为倾角。这样将直线检测问题简化为峰检测问题。

为了检测到二维数据域中所有的直线, 必须对每个角度分别进行 Radon 变换, 图 3(a) 示意出 (x, y) 坐标系旋转过角度 α 到 (x', y') 坐标系, 这时沿直线分布的椭圆体在新坐标系的 y' 轴上抽影可以形成峰, 对应图 3(b) 所示的 (ρ, θ) 域中 (ρ_0, θ_0) 位置处的峰, 更进一步截取 Radon 变换在固定 θ_0 不同 ρ 处的值如图 3(c) 所示, 此时我们就可以很容易实现检测。

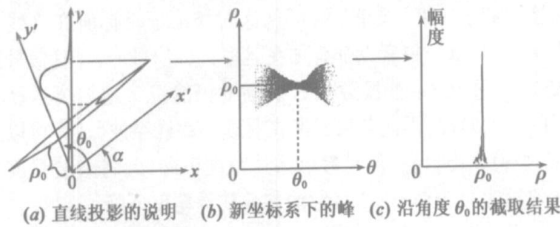


图 3 Radon 变换

坐标系 (x, y) 中的直线可表示为

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (7)$$

Radon 变换定义为

$$R(\rho, \theta) = \iint g(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (8)$$

式中 $g(x, y)$ 表示 (x, y) 坐标系中的二维数据, $\delta(\cdot)$ 表示冲击函数且为偶函数, 这样

$$R(\rho, \theta) = R(-\rho, \theta + \pi) \quad (9)$$

说明 Radon 变换有两个峰值分别在 (ρ, θ) 和 $(-\rho, \theta + \pi)$ 处, 我们只需要计算其中的一个。假设 $x-y$ 平面上某条直线离散化为 N 个点, 每个点 $a(i)$ 对应的幅度和相位分别是 $|a_i|$ 、 φ_i , 则这条直线上所有点求模再作 Radon 变换可表示为叠加形式

$$\sum_{i=1}^N |a_i e^{j\varphi_i}| = \sum_{i=1}^N |a_i| \quad (10)$$

最后在沿直线倾角的截面上表现为类似图 3(c) 上聚集的峰值。

4 分数阶 Fourier 变换

分数阶 Fourier 变换^[11] (Fractional Fourier Transform, 简称 FrFT) 最早由 Namias 于 1980 年

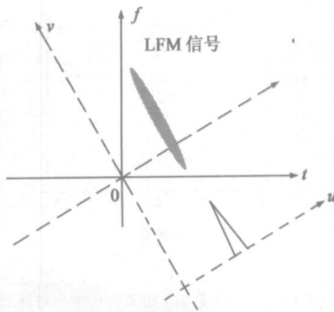


图 4 线性调频信号在分数阶 Fourier 域的投影

给出数学角度的定义, 近年引起信号处理界更多的关注。分数阶 Fourier 变换可看成是信号的时频分布在旋转后的频率轴上的投影, 若旋转角度合适, 就可以得到线性调频信号能量高度聚集的分布, 如图 4 所示。

信号 $f(t)$ 的旋转角度为 α 的 Fourier 定义为

$$F_\alpha(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) K_\alpha(t, u) dt \quad (11)$$

其中核函数 $K_\alpha(t, u)$ 定义为

$$K_\alpha(t, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j \cot \alpha}{2\pi}} e^{j(t^2+u^2/2) \cot \alpha - ju \csc \alpha}, & \alpha \neq n\pi \\ \delta(t-u), & \alpha = 2n\pi \\ \delta(t+u), & \alpha = (2n \pm 1)\pi \end{cases} \quad (12)$$

参数为 α 的 FrFT 可认为是传统 Fourier 变换的推广, $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 和 $\alpha = -\frac{\pi}{2}$ 的 Frft 分别对应传统的 Fourier 变换和逆 Fourier 变

换。令 $p = \frac{2}{\pi} \alpha$ 称为 FrFT 的阶数, 由于选择角度的周期性, p 取 $[-2, 2]$ 即可。FrFT 有诸如保持时移和频移特性、尺度特性、线性、不存在交叉项等许多优越的性质, 尤其是它聚焦线性调频信号能量且保留相位信息的特点, 使其可以用在下面的双通道 SAR-GMTI 中。

5 DPCA-Radon 法和 DPCA-Frft ATI 法原理

根据上文的分析提出两种运动目标检测和参数估计的新方法。DPCA-Radon 方法如图 5 所示, 两个通道的数据经距离压缩后首先用 DPCA 对消, 取模后再进行 Radon 变换, 根据峰的个数可以完成目标检测, 参考式(10), 此时的幅度可以表示为

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^N |I_1(i) - I_2(i)| = |I_1| \sum_{i=1}^N |e^{j\varphi_1(i)} - e^{j\varphi_2(i)}| \\ &= 2|I_1| \left| \sin \frac{2\pi v_r T}{\lambda} \right| \sum_{i=1}^N |e^{j((\pi\varphi_1(i) + \varphi_2(i))/2)}| \\ &= 2N|I_1| \left| \sin \frac{2\pi v_r T}{\lambda} \right| \end{aligned} \quad (13)$$

式中 N 表示目标所在直线的离散点数, A 表示叠加后的幅度, $\varphi_1(i)$ 、 $\varphi_2(i)$ 分别表示前向通道和拖尾通道第 i 个点的相位。类似地, 单通道数据经距离压缩并取模后进行 Radon 变换, 其叠加幅度表示为

$$A_1 = \sum_{i=1}^N |I_1(i)| = |I_1| \sum_{i=1}^N |e^{j\varphi_1(i)}| = N|I_1| \quad (14)$$

此时得到一系列既有运动目标又有静止目标的峰值, 对比式(13)、(14)和(2), 可以看到经过这种方法使目标能量集中且保留了对消信号幅度和单通道信号幅度的比值关系, 因此类似式(2), 可用式(13)和(14)完成运动目标地面径向速度的估计。

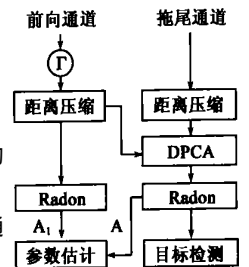


图 5 DPCA-Radon 法原理图

DPCA-FrFT-ATI 方法如图 6 所示, 两通道的数据经距离压缩后首先用 DPCA 对消, 可以根据距离门的数据幅度超过一定的门限得到各个运动目标所处的距离门位置信息 K , 提取这些信号分别用“扫描”的方法求 FrFT 找到使各个运动目标信号能量集中的最优分数阶次 P 。有了这两个先验知识, 接下来提取前向通道和拖尾通道距离门 K 的信号分别完成 P 阶 FrFT, 用公式分别表示为

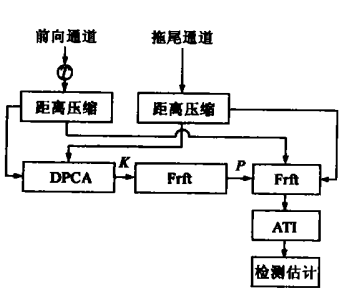


图 6 DPCA-FrFT-ATI 法原理图

$$F_{1\alpha} = \int_{-\infty}^{\infty} |I_1| e^{j\varphi_1(t)} K_{\alpha}(t, u) dt \quad (15)$$

$$F_{2\alpha}(u) = \int_{-\infty}^{\infty} |I_2| e^{j\varphi_2(t)} K_{\alpha}(t, u) dt \\ = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j(\varphi_2(t) - \varphi_1(t))} |I_2| e^{j\varphi_1(t)} K_{\alpha}(t, u) dt \quad (16)$$

其中对 $\varphi_2(t) - \varphi_1(t)$ 固定目标而言为 0, 对运动目标而言是与径向速度有关的一个常数, 可提到积分号外, 对式(9)和式(10)共轭相乘并化简得到

$$F_{1\alpha}(u) F_{2\alpha}^* = e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \left| \int_{-\infty}^{\infty} |I_1| e^{j\varphi_1(t)} K_{\alpha}(t, u) dt \right|^2 \\ = e^{j(4\pi v_r T / \lambda)} \left| \int_{-\infty}^{\infty} |I_1| e^{j\varphi_1(t)} K_{\alpha}(t, u) dt \right|^2 \quad (17)$$

因此通过这样的运算过程得到峰值且保留了 ATI 的相位, 可以用式(11)结合式(6)计算出运动目标的速度。

6 仿真结果及分析

6.1 DPCA Radon 法和 DPCA FrFT ATI 法的仿真结果

为了研究和对比两种方法的运动目标的检测和参数估计性能, 我们选取系统仿真参数如下: 卫星轨道高度 750km、纬度幅角 85°、天线视角 20°、轨道倾角 40°、天线尺寸(方位 × 距离) 15m × 3m、发射信号中心频率 10G、带宽 20M、脉冲宽度 66.67μs、脉冲重复频率 2000Hz, 地面距离分辨率为 19.62m, 地面方位分辨率为 6.72m, 采用双通道接收模式, 两个通道之间的距离为 7.5m。仿真的地面场景大小为 400m × 400m, 场景的杂波采用 K 分布模型。

DPCA Radon 方法的仿真结果如图 7 所示, 地面场景中有两个静止目标和三个运动目标, 运动目标的地面径向速度值参见表 1 的第一行。图中 (a) 和 (b) 分别是距离向压缩后单通道信号幅度和距离向压缩后双通道对消信号

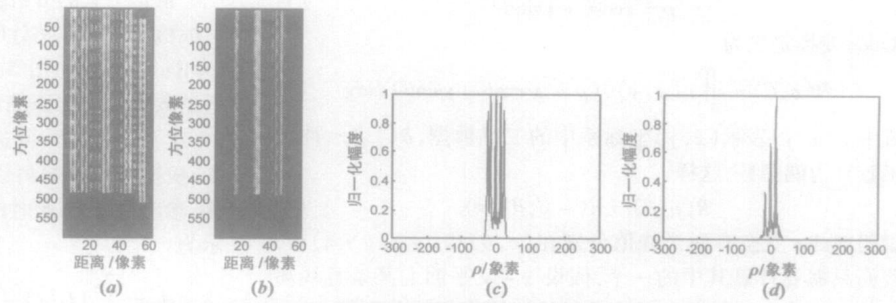
幅度, 其中横轴为距离方向纵轴为方位方向, 由于系统分辨率较粗以及运动目标速度较慢, 运动目标在对消前后都为垂线。(c) 和 (d) 分别是距离向压缩后单通道信号以及距离向压缩后双通道对消信号在的 Radon 变换。从 (d) 上我们可以很容易检测到三个运动目标, 之后可以得到 (d) 上三个运动目标对消后的幅度以及 (c) 上相应位置处对消前的幅度, 根据式(13)和式(14)估计出三个运动目标的速度值的见表 1 的第二行。从上看出, 运动参数估计误差小于 1.5%。

表 1 各种方法的估计结果比较(单位: m/s)

地面运动目标径向速度	- 1	- 2	- 3
DPCA-Radon 法估计结果(无杂波)	- 1.01	- 2.03	- 3.03
DPCA-Radon 法估计结果(有杂波)	- 0.9	- 1.75	- 2.51
DPCA-FrFT-ATI 法估计结果(有杂波)	- 1.02	- 2.15	- 2.8
图像域 DPCA 估计结果	- 1.03	- 2.08	- 2.73

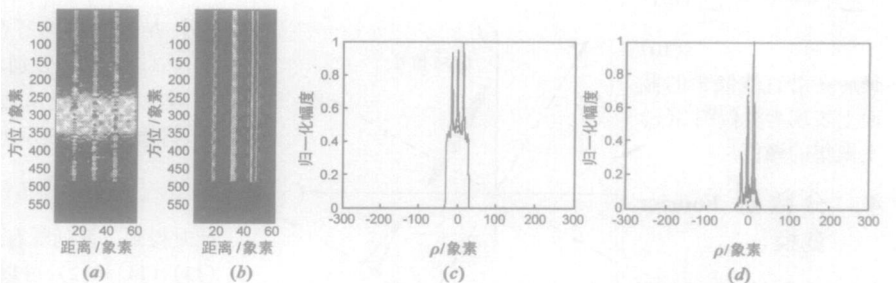
若仿真场景中布满杂波, 运动目标不变, 用 DPCA-Radon 方法的仿真结果如图 8 所示, 重复同样的计算过程, 可求出运动目标速度如表 1 第三行所示, 可见这时候由于目标所在直线上有杂波, 其每个象素点都叠加在运动目标信号上, 尽管信号比较强, 经过 Radon 变换叠加后的幅度仍然较大地偏离运动目标的叠加幅度, 因此若目标所在直线上存在杂波, 最终可以从 (d) 上检测出目标, 但是参数估计精度下降, 此时杂波强度增加到目标的 21%, 三个目标的参数估计精度下降约 13%。

图 9 给出 DPCA-FrFT-ATI 方法的仿真结果, 同样在上面的杂波环境中, 通过图 8(b) 的 DPCA 结果我们可以得到运动目



(a) 距离向压缩后单通道信号幅度 (b) 距离向压缩后双通道对消信号幅度
(c) 距离向压缩后单通道信号的 Radon 变换 (d) 距离向压缩后双通道对消信号的 Radon 变换

图 7 DPCA-Radon 方法的仿真结果(目标所在直线上无杂波)



(a) 距离向压缩后单通道信号幅度 (b) 距离向压缩后双通道对消信号幅度
(c) 距离向压缩后单通道信号的 Radon 变换 (d) 距离向压缩后双通道对消信号的 Radon 变换

图 8 DPCA-Radon 方法的仿真结果(目标所在直线上有杂波)

标所在距离门分别是 $k_1=15$ 、 $k_2=30$ 和 $k_3=45$, 以提取出 $k_1=15$ 的对消数据为例, (a) 是提取的目标信号实部, 利用“扫描”的方法, 得到分数阶次 $p=0.6478$ 时目标在分数阶 Fourier 域能量集中的采样信号如图 (b) 所示, 图 (c) 给出了单通道信号的实部, 可见运动目标信号被杂波污染, 直接提取目标信号是困难的, 分别抽取前向通道和拖尾通道距离门 $k_1=15$ 的数据, 也做 p 阶 Fourier 变换, 结果如图 (d) 和图 (e) 所示, 由于分数阶次 p 是匹配运动目标的, 在图 (d) 和图 (e) 上得到的峰值信号对应目标信号, 幅度较小的信号对应杂波, 通过 DPCA FrFT 实质上增加了信杂比因而增加了动目标的检测能力. 对图 (d) 或图 (e) 设置一幅度门限作 FrFT 反变换得到图 (f), 对比图 (a) 可观察到滤除杂波后大致恢复出了运动目标信号.

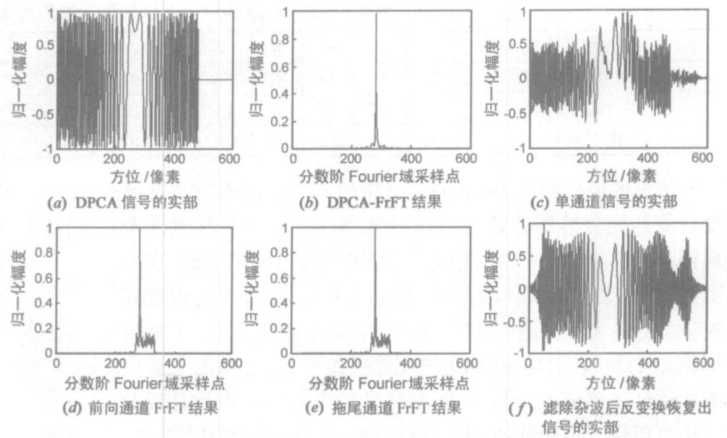


图 9 DPCA-FrFT-ATI 方法的结果 ($k_1=15$ 为例)

最后, 对图 (d) 和图 (e) 的数据按照式 (17) 求 ATI 并结合目标的峰值位置即可得到对应的相位, 求得此时干涉相位为 $\Delta\varphi = -0.0806$, 代入式 (6) 计算出目标的速度值为 -1.02m/s , 或者采用“两步滤波法”^[12] 分析干涉幅相特性可以得到同样的结果, 重复上面的分析可以估计出其它两个目标的速度, 结果可参见表 1 第二行. 运动参数估计误差约 7%. 限于篇幅, 本文未给出基于图像域检测方法的详细过程但给检测结果, 三个目标的速度值可参见表 1 的第三行, 可见 DPCA-FrFT-ATI 法与基于图像域的方法对速度值较小的目标在运动参数估计上的性能是相当的.

式中 L 表示合成孔径长度, θ 表示雷达平台运动方向与波束指向之间的夹角, v_x 表示目标在地面的切向速度分量, v_y 表示目标在地面的径向速度分量, 通常在 $v_x \ll v$ 、 $v_y \ll v$ 条件下从式 (18) 看出方位向散焦主要由目标切向速度决定, 若只考虑径向速度式 (12) 可简化为:

$$L' = \frac{L}{\sin\theta} \frac{v_y^2}{v^2} \quad (19)$$

可见随目标径向速度值的增大目标散焦也越大, 目标在图像域的散焦使得信杂比降低, 最终估计性能下降, 而原始数据域的 DPCA-FrFT-ATI 不受此限制, 这就解释了 DPCA-FrFT-ATI 法比图像域方法优越的原因.

6.2 DPCA Frft ATI 法与基于图像域的方法比较

这里通过对比图像域的估计结果来分析 DPCA-FrFT-ATI 法的性能. 系统仿真参数同上, 地面场景取为方位 (2000m) \times 距离 (540m), 其中包含速度值分布为 $-1\text{m/s} \sim -19\text{m/s}$ 的 19 个运动目标, 本来位置均在场景的正上方. 从图 10(a) 图像域的 DPCA 结果中可以检测到 19 个运动目标, 图上横轴为距离方向纵轴为方位方向, 由上往下依次为 $-1\text{m/s} \sim -19\text{m/s}$ 的目标, 图上可以观察到运动目标的方位偏移随速度值增大而增大, 目标模糊随运动目标速度值的增大逐渐明显, 在图 (b) 的单通道成像结果上目标能量散开后会被淹没在杂波中, 比如图 (b) 上几乎看不到速度值为 $-14\text{m/s} \sim -19\text{m/s}$ 的目标, 表现在式 (2) 中就是提取目标所在位置的 $|I|$ 和 $|I_1|$ 不够准确, 最终估计出的速度值也不准确, 图 7(c) 中的点划线示出图像域的估计结果, 速度值越大, 估计误差也越大, 而虚线所示的 DPCA-FrFT-ATI 结果沿着标准速度值的直线分布, 即使对速度值较大的目标, 其估计误差也比图像域的方法要小. 因此对速度值较小模糊不明显的目标而言图像域方法和 DPCA-FrFT-ATI 法的检测精度相当, 但对散焦大的目标, DPCA-FrFT-ATI 法的性能要远远优于图像域的性能.

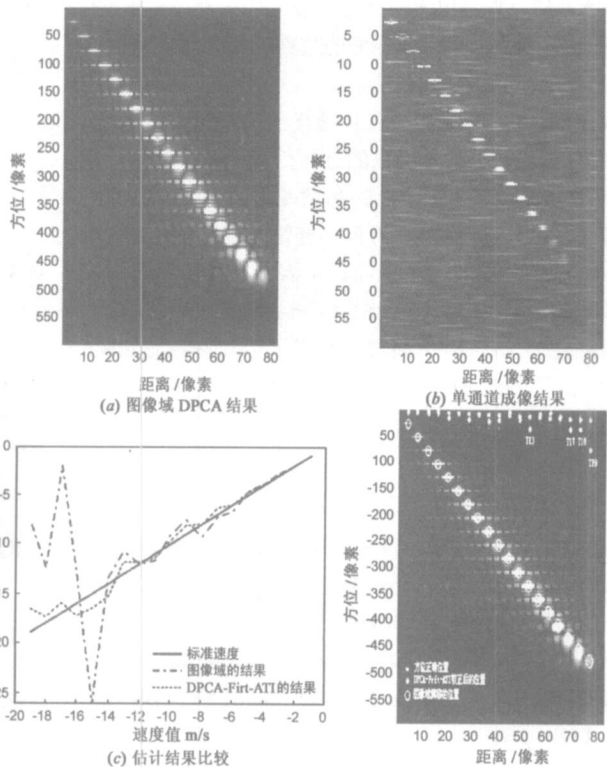


图 10 图像域与 DPCA-FrFT-ATI 的估计结果比较

可以推导运动目标的散焦长度为

$$L' = \frac{L}{\sin\theta} \frac{v_x^2 + v_y^2 - 2v_x v_y \cos\theta}{v^2} \quad (18)$$

表 2 采用 DPCA-FrFF-ATI 法的目标位置校正前后比较(单位:象素)

方位正确位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
图像域偏移位置	27	52	78	103	129	155	180	206	231	257	283	308	334	359	385	410	436	458	474
校正后	1	1	7	5	13	6	24	9	32	21	3	17	44	8	6	12	44	44	80
相对误差	0	2%	5%	1%	6%	0	10%	1%	10%	4%	3%	2%	10%	2%	2%	1%	6%	6%	13%

仿真的最后根据 DPCA-FrFF-ATI 的方法检测出的目标速度计算匹配滤波器参数,并对 DPCA 得出的每个目标重新聚焦得到图 7(d) 上 19 个目标补偿后的位置,对应图上的“实心圆点”,对比“圆圈”表示的方位校正之前的位置,可以观察到校正后目标位置接近“实心矩形点”表示的真实位置,个别目标例如 T13、T17、T18 和 T19 的位置误差较大,这是由于速度参数估计误差较大。图上平均相对误差约为 5%,也就是说此方法可以将方位偏移的 95% 补偿回去。具体结果可参见表 2。

7 结论

深入研究了在原始数据域实现双通道星载 SAR GMTI 的技术,提出两种解决办法 DPCA-Radon 和 DPCA-FrFF-ATI,仿真结果得出以下结论:

(1) 在不含杂波(具体来讲目标能量分布的直线上不含杂波)的理想情况下可以用 DPCA-Radon 方法实现运动目标检测和参数估计;

(2) 含杂波的情况下 DPCA-Radon 可以检测目标,但是估计精度下降,杂波幅度增加到目标的 21% 时,精度下降了 13%,DPCA-Radon 的另一个缺点是速度的正负无法确定,不也适用于目标所在距离门存在多个目标的情况;

(3) DPCA-FrFF-ATI 可以实现杂波背景下的运动目标检测和参数估计,相比通常未经方位压缩的数据域,它提高了信杂比,因此提高了检测和估计性能;

(4) DPCA-FrFF-ATI 的参数估计性能优于图像域方法的性能,尤其是对速度值较大散焦明显的目标;

(5) 采用 DPCA-FrFF-ATI 估计的参数易于修正图像域的散焦和方位偏移,可将方位偏移的 95% 补偿回去;

(6) DPCA-Radon 和 DPCA-FrFF-ATI 不需要方位压缩过程,但是有能量积累的能力,特别是 DPCA-FrFF-ATI 大大增强了运动目标的检测能力,该方法中间过程获得了运动目标的先验知识,虽然增加了 FrFF 的计算量,但是相比通常方位压缩变换到图像域的计算量还是要少很多。

参考文献:

- [1] Nohara T J, Weber P, Premji A, et al. SAR GMTI processing with Canada's Radarsat 2 Satellite[A]. IEEE AS-SPCC[C]. Honolulu: IEEE Press, 2000. 379- 384.
- [2] Alan A Thompson, Charles E Livingstone. Moving Target Performance for RADARSAT 2[J]. IEEE Trans, 2000, GRS 48 (6): 2599- 2601.
- [3] C E Livingstone, I Sikaneta, C H Gierull, et al. An airborne synthetic aperture radar experiment to support RADARSAT 2 ground moving target indication [J]. Canadian Journal of

Remote Sensing, 2002, 28(6): 794- 813.

- [4] C H Gierull, I C Sikaneta. Raw data based two aperture SAR ground moving target indication[J]. IEEE Trans, 2003, GRS 41(2): 1032- 1034.
- [5] Zheng Mingjie, Yang Ruliang. A novel multi channel SAR moving target detection and image method[J]. IEEE Trans, 2003, GRS 41(6): 4095- 4097.
- [6] C H Gierull, Azimuth positioning of moving targets in two-channel SAR by direction of arrival estimation[J]. Electronics Letters, 2004, 40(21): 1380- 1381.
- [7] Breit H, Eineder M, Holzner J, et al. Traffic monitoring using SRIM along track interferometry[J]. IEEE Trans, 2003, GRS 41(2): 1187- 1189.
- [8] J Mittermayer, H Runge, Conceptual studies for exploiting the TerraSAR X dual receive antenna[A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2003[C]. Toulouse: IEEE Press, 2003, 3: 2140- 2142.
- [9] Almeida L B. The fractional fourier transforms and time frequency representations [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1994, 42(11): 3084- 3091.
- [10] 高飞, 毛士艺, 玉振明, 袁运能. 一种全自动的检测方法用于 SAR-ATI 的 GMTI[J]. 航空学报, 2005, 26(1): 84- 89.
GAO Fei, MAO Shiyi, et al. Fully automatic detector in SAR-ATI of GMTI[J]. ACTA AERONAUTICA ET ASTRONAUTICA SINICA, 2005, 26(1): 84- 89.

作者简介:



高飞 男, 1975 年生于陕西省绥德县, 北京航空航天大学博士后, 主要从事信号处理、雷达成像、图像处理、运动目标指示等方面的研究工作。E-mail: feigao2000@163.com.



毛士艺 男, 1935 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要研究领域: 高分辨率雷达成像、信号建模与谱分析、信号检测与分类、多目标跟踪与数据融合等。