

文章编号: 2095-4980(2018)06-1015-07

基于运动补偿的双通道星载 SAR 动目标检测方法

李林琳, 赵毅寰, 丁庆海, 刘鑫

(中国空间技术研究院 航天恒星科技有限公司, 北京 100086)

摘要: 分析常规的双通道星载合成孔径雷达-偏移相位中心天线(SAR-DPCA)技术检测运动目标的方法, 建立了斜距平面坐标系来描述星载合成孔径雷达回波多普勒特性, 说明了这种常规动目标检测方法在星载情况下的不足。针对这种情况, 提出基于运动平台补偿的双通道星载 SAR-DPCA 动目标检测方法。该方法通过相位补偿, 消除了星地相对径向运动对双通道 DPCA 杂波对消效果的影响, 改善了双通道星载 SAR-DPCA 系统的动目标估计性能。

关键词: 星载合成孔径雷达; 双通道偏移相位中心天线; 动目标检测

中图分类号: TN958

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.1015

An approach of dual-channel spaceborne SAR moving target detection based on motion compensation

LI Linlin, ZHAO Yihuan, DING Qinghai, LIU Xin

(Space Star Technology Co. Ltd, China Academy of Space Technology, Beijing 100086, China)

Abstract: The approach of moving targets detection based on conventional dual-channel spaceborne Synthetic Aperture Radar with Displaced Phase Center Antenna(SAR-DPCA) is analyzed. The characteristic of Doppler frequency has been reanalyzed based on slant range coordinate, and the disadvantages of the former method have been presented. The technique based on the motion compensation of the platform is provided, which can eliminate the effect on clutter cancellation caused by the movement between the platform and the ground. This approach can improve the performance of moving targets detection based on dual-channel spaceborne SAR-DPCA system greatly.

Keywords: spaceborne Synthetic Aperture Radar; dual-channel Displaced Phase Center Antenna; moving targets detection

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨力成像雷达, 它具有分辨力高、透射性强及全天候工作等特点, 将其应用于动目标检测, 在军用和民用领域都具有很高的价值。从已有的星载 SAR 地面运动目标检测(Ground Moving Target Indication with SAR, SAR/GMTI)试验模式来看, 采用单通道接收体制, 低速目标检测性能弱、方位定位精确度差、实现 GMTI 有较大困难^[1-2]。所以很多 SAR 动目标检测系统采用多通道方法抑制地杂波, 常用的多通道杂波抑制技术有沿航迹干涉(Along Track Interferometry, ATI)技术、偏移相位中心天线(DPCA)技术和空时自适应(Space Time Adaptive Processing, STAP)技术。理论上已经证明 STAP 方法有最好的杂波抑制效果, 但是算法复杂, 工程实现困难。DPCA 和 ATI 的算法相对简单, 已成功应用于机载 SAR 系统, 是现今星载 SAR/GMTI 的研究热点^[1-6]。由于卫星平台运行速度快、星地几何关系复杂等因素, 使得星载条件下, 杂波谱更宽、杂波强度更强、地面目标与卫星速度相差更大, 给动目标检测带来更大难度^[1,7-8]。传统星载 SAR-DPCA 方法在杂波抑制上直接沿用机载 DPCA 方法^[1,7], 没有考虑地球自转等因素。本文建立斜距平面坐标系来描述雷达回波的多普勒特性, 分析现有星载 SAR-DPCA 方法, 并针对其不足提出一种基于运动平台补偿的方法。

1 双通道星载 SAR 回波特性

应用 DPCA 和 ATI 技术抑制星载 SAR 地杂波已有文献研究^[7-8], 但大多数把星载地杂波抑制与机载情况等

效，并没有具体分析星地几何关系对 DPCA 方法杂波抑制效果的影响。根据星载 SAR 的空间几何关系，建立斜距平面坐标系，具体分析星载情况与机载动目标检测方法的不同，改善星载 SAR-DPCA 动目标检测性能。

1.1 星载 SAR 地杂波多普勒特性

双通道星载 SAR 系统的星地几何关系如图 1 所示^[7]。卫星速度为 V_s ，沿航迹放置天线 S_1, S_2 ，两天线相位中心间距为 d 。天线 2 发射线性调频信号，双天线同时接收。 T 为地面上一个目标，目标速度为 V_t 。 $R_1(t), R_2(t)$ 分别为 t 时刻双天线与地面目标的斜距矢量。 R_1, R_2 为孔径中心时刻即 $t=0$ 时刻双天线相位中心与地面目标的斜距矢量。 V_{st}, A_{st} 分别为 $t=0$ 时刻卫星与地面目标间的相对速度矢量和加速度矢量。

结合文献[4-7]描述的 SAR 空间几何关系，距离向处理后，对于地面上某个目标，根据星载 SAR 回波多普勒历程的描述，通道 1 和通道 2 的回波可近似写成

$$\begin{cases} S_1(t) = G \cdot \sigma_t \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_1 + R_2)\right) \exp\left(-j2\pi\left(f_{d1}t + \frac{f_{r1}}{2}t^2\right)\right) \\ S_2(t) = G \cdot \sigma_t \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_2 + R_2)\right) \exp\left(-j2\pi\left(f_{d2}t + \frac{f_{r2}}{2}t^2\right)\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中： t 为方位向时间； R_1, R_2 分别为 $t=0$ 时双通道相位中心与地面目标的斜距； G 为距离脉压对目标的增益； σ_t 为雷达散射系数； λ 为雷达波长。双通道回波的多普勒中心频率 f_{d1}, f_{d2} 和多普勒调频率 f_{r1}, f_{r2} 分别为：

$$\begin{cases} f_{d1} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{V_{st} \cdot R_1}{R_1} + \frac{V_{st} \cdot R_2}{R_2} \right) \\ f_{d2} = \frac{2V_{st} \cdot R_2}{\lambda R_2} \\ f_{r1} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{V_{st} \cdot V_{st}}{R_1} + \frac{A_{st} \cdot R_1}{R_1} - \frac{(V_{st} \cdot R_1)^2}{R_1^3} \right) + \left(\frac{V_{st} \cdot V_{st}}{R_2} + \frac{A_{st} \cdot R_2}{R_2} - \frac{(V_{st} \cdot R_2)^2}{R_2^3} \right) \\ f_{r2} = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{V_{st} \cdot V_{st}}{R_2} + \frac{A_{st} \cdot R_2}{R_2} - \frac{(V_{st} \cdot R_2)^2}{R_2^3} \right) \end{cases} \quad (2)$$

双通道回波的多普勒调频率近似相等，即 $f_{r1} \approx f_{r2}$ 。

对于通道间多普勒中心频率之差， $f_{d2} - f_{d1} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{V_{st} \cdot R_2}{R_2} - \frac{V_{st} \cdot R_1}{R_1} \right)$ ，由于双通道之间距离远小于场景中心斜距，所以分母上可近似为 $R_1 = R_2$ ，此时

$$\Delta f_d = f_{d2} - f_{d1} = \frac{V_{st} \cdot d}{\lambda R_2} \quad (3)$$

式中 d 为两斜距矢量之差， $d = R_2 - R_1$ 。

1.2 建立斜距平面坐标系描述三通道回波的关系

经典的星载 SAR-DPCA 方法直接对应机载情况，在等效的斜距平面上分析双通道回波，并没有明确斜距平面与其他坐标系的关系。本节建立星载斜距平面坐标系 E_R 来描述两孔径回波之间的关系，分析星载斜距平面上的目标与机载情况的差异，便于后续算法研究。斜距平面坐标系如图 2 所示。用到的其他坐标系的描述参照文献[9]。

图 2 中，垂线为卫星质心与地心的连线。不同的距离门对应不同的斜距平面坐标系：

- 1) 参考斜距处的斜距平面坐标系 E_R 。原点：卫星质心； X 轴：卫星航向； Y 轴：参考斜距所在方向； Z

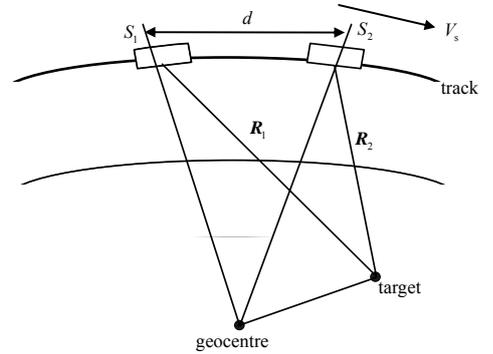


Fig.1 Sketch map of dual-channel spaceborne SAR
图 1 双通道星载 SAR 空间几何关系

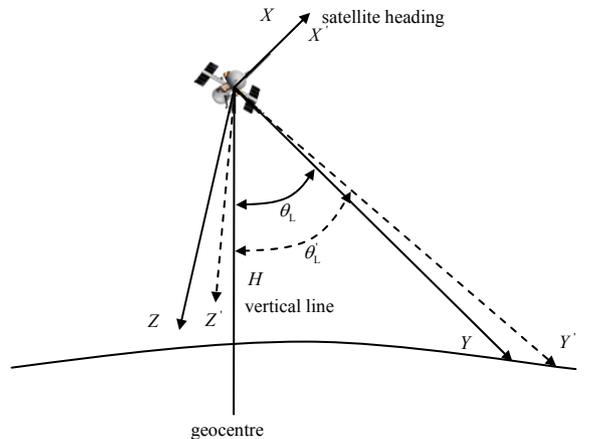


Fig.2 Reference frame of range plane
图 2 斜距平面坐标系

轴：符合右手螺旋守则。

θ_L 为 Y 轴与垂线之间的夹角，设方位向采样中心时刻天线波束中心照射到地面的点为参考点，对应的斜距为参考斜距 R_{ref} 。则参考斜距处的斜距平面坐标系 E_R 与该时刻的天线坐标系 E_a (天线正侧视) 重合。参考斜距处，卫星星体坐标系 E_e 与斜距平面坐标系 E_R 的转换矩阵 A_{eR} 为：

$$A_{eR} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_L & \sin \theta_L \\ 0 & -\sin \theta_L & \cos \theta_L \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中 $\theta_L = \arccos\left(\frac{(H + R_e)^2 + R_{\text{ref}}^2 - R_e^2}{2(H + R_e)R_{\text{ref}}}\right)$ ， H 为轨道高度， R_e 为地球等效半径。

2) 其他距离门的斜距平面坐标系 E'_R 。原点：与参考斜距处 E_R 的原点重合； X' 轴：与参考斜距处 E_R 的 X 轴指向相同； Y' 轴：在垂线与 E_R 的 Y 轴构成的平面上，与垂线的夹角为 θ'_L ； Z' 轴：符合右手螺旋守则。

卫星星体坐标系 E_e 与斜距平面坐标系 E'_R 的转换矩阵为：

$$A_{eR} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta'_L) & \sin(\theta'_L) \\ 0 & -\sin(\theta'_L) & \cos(\theta'_L) \end{pmatrix} \quad (5)$$

设该距离门的斜距为 R ，则 $\theta'_L = \arccos\left(\frac{(H + R_e)^2 + R^2 - R_e^2}{2(H + R_e)R}\right)$ 。

设目标 T 的斜距平面与某个斜距平面坐标系 E'_R 的 XY 平面重合。 T 与天线 2 相位中心的相对斜距矢量为 \mathbf{R}_2 ， $\mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_s - \mathbf{R}_1$ 。 R 为目标 T 到卫星航迹的最短距离，由于 \mathbf{R}_2 的方向由目标指向卫星，目标 T 与天线 2 在 E'_R 下相对位置的坐标为 $(X_0, -R, 0)$ ， X_0 为目标 T 与天线 2 的相对斜距 \mathbf{R}_2 在 E'_R 坐标系中 X 轴方向的分量。根据天线 1,2 的相对位置，目标 T 与天线 1 在 E'_R 下相对位置的坐标为 $(X_0 - d, -R, 0)$ 。所以 $t=0$ 时刻，目标与双通道相位中心的斜距 R_1, R_2 满足如下关系：

$$\Delta R_{12} = R_1 - R_2 \approx \frac{d(d - 2X_0)}{2R} \approx \frac{d(d - 2X_0)}{2R_2} \quad (6)$$

根据式(3)，双通道回波多普勒中心频率之差可写为：

$$\Delta f_d = f_{d2} - f_{d1} = \frac{v_{st,x}d}{\lambda R_2} \quad (7)$$

式中 $v_{st,x}$ 为卫星与目标 T 的相对速度 \mathbf{V}_{st} 在 E_R 坐标系中 X 轴方向的分量。

忽略非斜距平面上的速度和加速度的影响，根据式(2)，孔径 2 的多普勒中心频率和多普勒调频率可表示为：

$$\begin{cases} f_{d2} = -\frac{2v_{st,y}}{\lambda} + \frac{2v_{st,x}X_0}{\lambda R_2} \\ f_{t2} = \frac{2v_{st,x}^2}{\lambda R_2} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $v_{st,y}$ 为卫星与目标 T 的相对速度 \mathbf{V}_{st} 在 E_R 坐标系中 Y 轴方向的分量。

根据式(6)~式(8)，双通道的多普勒回波历程式(1)可以写为：

$$\begin{cases} S_1(t) = G\sigma_t \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R_2\right) \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\frac{d(d-2X_0)}{2R_2}\right) \exp\left(-j2\pi\left(f_{d2}t + \frac{f_{t2}}{2}t^2\right)\right) \exp\left(j2\pi\frac{v_{st,x}d}{\lambda R_2}t\right) \\ S_2(t) = G\sigma_t \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R_2\right) \exp\left(-j2\pi\left(f_{d2}t + \frac{f_{t2}}{2}t^2\right)\right) \end{cases} \quad (9)$$

2 基于运动平台补偿的星载 SAR-DPCA 动目标估计方法

2.1 经典的星载 SAR-DPCA 动目标检测方法

DPCA 技术通过移位相位中心，补偿由平台与目标的相对运动引起的多普勒展宽^[1,7-8]。由于目标的速度未知，只能应用参考点处静止目标的参数来确定满足 DPCA 条件的天线间距并构造补偿因子。当检测被主瓣杂波

掩盖的运动目标时，满足运动目标的运动平台和方位向速度远小于星速的条件，可认为参考点的参数与实际目标的参数近似相等。

设 $v_{ref,x}$ 和 $v_{ref,y}$ 分别为参考斜距处斜距平面坐标系 E_R 下天线 2 相位中心与参考点相对速度的 X 轴分量与 Y 轴分量，则 DPCA 条件可以描述为：

$$d = 2mv_{ref,x}/f_{pr} \quad (10)$$

式中： f_{pr} 为雷达系统脉冲重复频率； m 为正整数。

图 3 给出了经典的双通道星载 SAR-DPCA 动目标检测方法的流程^[7](去掉虚线框中的步骤)，图 3

中 $\Delta t = m / f_{pr} = \frac{d}{2v_{ref,x}}$ 为方位向延迟时间。

具体步骤如下：

1) 对双通道回波进行距离向处理，实现距离向脉压和距离徙动校正，得到双路回波信号 $S_1(t), S_2(t)$ 。

2) 对 $S_2(t)$ 进行相位补偿，去除由于天线水平排列产生的相位偏差，补偿因子选取为 $C = \exp\left(-j2\pi \frac{d^2}{4\lambda R_{ref}}\right)$ 。

3) 把第 1 路信号向前时移 m 个脉冲得到 $S_1(t + \Delta t)$ ，然后与相位补偿后的第 2 路信号相减，获得杂波对消后的信号 $S_{21}(t)$ 。经过上述处理得到两路对消后的杂波 $S_{21}(t)$ 为：

$$S_{21}(t) = S_2(t)C - S_1(t + \Delta t) = G\sigma_t \exp\left(-j\frac{4\pi R_2}{\lambda}\right) \exp\left(-j2\pi \frac{d^2}{4\lambda R_2}\right) \exp\left(-j2\pi \left(f_{d2}t + \frac{1}{2}f_{r2}t^2\right)\right) \left(1 - \exp\left(j2\pi \frac{v_{st,y}d}{\lambda v_{st,x}}\right)\right) \quad (11)$$

经典的星载 SAR-DPCA 方法认为地面静止目标的径向速度为零，即 $v_{st,y} = 0$ 。根据式(11)， $S_{21}(t)$ 等于零，静止目标被消除，杂波被有效抑制。而实际情况是，由于地球自转的影响，地面静止目标在斜距平面内 Y 轴的速度(对应经典 DPCA 方法中目标的径向速度)一般不为零，即 $v_{st,y} \neq 0$ ，这与机载静止目标的径向为零不同。精确的偏航控制可以使参考点与卫星的径向速度为 0，而实际上星载平台的航向控制误差一般在十几分之一度，那么参考点与卫星的径向速度，即 $v_{st,y}$ 就不等于 0。根据式(11)，这个速度会增大对消后的杂波强度，把检测门限整体抬高，不利于后续动目标的检测。

2.2 基于运动平台补偿的星载 SAR-DPCA 方法

从上述结果可知，卫星与地面静止目标的相对径向速度影响杂波对消效果，所以本文考虑星载与机载情况的区别，在处理过程中补偿静止目标的径向速度。处理流程如图 3 所示，加上虚框中的径向速度补偿处理。

径向速度的补偿因子为：

$$C_r = \exp\left(-j2\pi \frac{v_{ref,y}d}{\lambda v_{ref,x}}\right) \quad (12)$$

第 1 路信号时移后与径向速度补偿因子 C_r 相乘，则式(11)变为：

$$S_{21}(t) = S_2(t)C - S_1(t + \Delta t)C_r = G\sigma_t \exp\left(-j\frac{4\pi R_2}{\lambda}\right) \exp\left(-j2\pi \frac{d^2}{4\lambda R_2}\right) \exp\left(-j2\pi \left(f_{d2}t + \frac{1}{2}f_{r2}t^2\right)\right) \left(1 - \exp\left(j2\pi \frac{d}{\lambda} \left(\frac{v_{st,y}}{v_{st,x}} - \frac{v_{ref,y}}{v_{ref,x}}\right)\right)\right) \quad (13)$$

由式(13)可知，在补偿了由地球自转引起的径向速度后，参考点处静止目标的杂波经 DPCA 处理后为零，实现了杂波对消。由于同一个距离门内的点近似有相同的多普勒历程，所以处在参考斜距处其他方位位置散射点的杂波对消结果与参考点近似相同。获得了杂波对消后的信号 $S_{21}(t)$ 后，乘以参考函数 $C_2(t)$ ，去除回波信号中由于卫星平台与目标相对运动产生的多普勒调频率，参考函数选取为：

$$C_2(t) = \exp\left(j\pi \frac{2v_{ref,x}^2}{\lambda R_{ref}} t^2\right) \quad (14)$$

与参考函数 $C_2(t)$ 相乘后，信号变为：

$$S'_{21}(t) = G\sigma_t \exp\left(-j\frac{4\pi R_2}{\lambda}\right) \exp\left(-j2\pi \frac{d^2}{4\lambda R_2}\right) \exp(-j2\pi f_{d2}t) \left(1 - \exp\left(j2\pi \frac{d}{\lambda} \left(\frac{v_{st,y}}{v_{st,x}} - \frac{v_{ref,y}}{v_{ref,x}}\right)\right)\right) \quad (15)$$

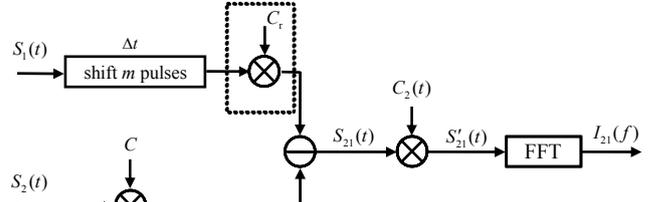


Fig.3 Spaceborne SAR moving target detection flow based on DPCA
图 3 基于 DPCA 的星载 SAR 动目标检测流程

变换到距离-多普勒域，得到频域内杂波对消后的信号为：

$$I_{21}(f) = G\sigma_t \exp\left(-j\frac{4\pi R_2}{\lambda}\right) \exp\left(-j2\pi\frac{d^2}{4\lambda R_2}\right) \left(1 - \exp\left(j2\pi\frac{d}{\lambda}\left(\frac{v_{st,y}}{v_{st,x}} - \frac{v_{ref,y}}{v_{ref,x}}\right)\right)\right) I_{21}(f') \quad (16)$$

式中： $I_{21}(f') = T_s Sa(\pi f' T_s)$ ； $f' = f_{d2} - f$ ； T_s 为合成孔径时间。

当 $f' = 0$ ，即 $f = f_{d2}$ 时， $I_{21}(f')$ 取得最大值，代入式(16)，得到对消特性为：

$$|I_{21}(f)|^2 = 4G^2\sigma_t^2 T_s^2 \sin^2\left(\pi\frac{d}{\lambda}\left(\frac{v_{st,y}}{v_{st,x}} - \frac{v_{ref,y}}{v_{ref,x}}\right)\right) \quad (17)$$

而没有经过运动平台补偿的经典星载 SAR-DPCA 方法经过上述处理后，得到的对消特性为：

$$|I_{21}(f)|^2 = 4G^2\sigma_t^2 T_s^2 \sin^2\left(\pi\frac{v_{st,y}d}{v_{st,x}\lambda}\right) \quad (18)$$

对比式(17)和式(18)可知，星载 SAR/GMTI 经过基于运动平台补偿的 SAR-DPCA 处理后，动目标回波强度随目标径向速度按正弦规律变化，静止目标被完全对消。而没有经过运动平台补偿的经典 SAR-DPCA 方法使静止目标仍有杂波残留。

由于满足 DPCA 条件的天线间距 d 和构造参考函数所用的参数都是根据参考点与卫星的相对位置和相对运动计算出的，所以对其他距离门内的杂波抑制效果没有对参考斜距处杂波的抑制效果好。

3 仿真结果及分析

根据表 1 的参数仿真双通道地杂波，一个分辨单元包含 2.5 个散射点，杂波后向散射系数幅度服从瑞利分布^[8]。同时仿真不同速度动目标的双通道的回波。与杂波数据叠加，即可得到仿真验证所需的原始回波数据。

3.1 点目标场景的仿真结果

设场景中心点为参考点，偏航控制误差为 0.1° 。由于存在偏航控制误差，参考点的多普勒中心频率不为零，得到参考点与卫星在斜距平面坐标系 E_R 下的相对速度 X 轴分量 $v_{ref,x} = 7.4987 \times 10^3$ m/s， Y 轴分量为 $v_{ref,y} = -6.7133$ m/s。满足 DPCA 条件的天线间距 $d = 5.7682$ m。

表 1 回波仿真参数
Table1 Parameter of echo simulation

| parameter | value | parameter | value |
|---------------------------------------|---------------|------------------------|-------|
| orbit inclination/(°) | 98.578 498 | angle of incidence/(°) | 35 |
| right ascension of ascending node/(°) | 73.562 8 | pulse width/ μ s | 42 |
| perigee argument/(°) | 120 | band width/MHz | 30.44 |
| eccentricity | 0.000 093 3 | sample rate/MHz | 32.34 |
| semimajor axis/m | 7 169 934.682 | f_{pr} /Hz | 2 600 |
| wave length/m | 0.056 | number of pulses | 2 048 |

设动目标方位向采样中心时刻位于参考点处。当动目标在场景坐标系 E_s 下的速度为 (5 m/s, 5 m/s) 时，根据式(4)经过坐标转换，可以得到目标在斜距平面坐标系 E_R 下与卫星相对速度的 Y 轴分量 $v_{st,y} = -4.4911$ m/s。动目标所在距离门输入信杂比为 $SCR_{in} = -6.0221$ dB。

应用经典星载 SAR-DPCA 方法抑制杂波，杂波对消后输出杂波的平均幅度为 $C_{out} = 1.5091 \times 10^5$ ，动目标的最大值为 $S_{out} = 5.7697 \times 10^5$ ，输出信杂比为 $SCR_{out} = S_{out} / C_{out} = 11.6487$ dB。而应用本文提出的基于运动平台补偿的星载 SAR-DPCA 动目标检测方法得到杂波对消后输出杂波的平均幅度为 $C_{out} = 3.3100 \times 10^3$ ，动目标的最大值为 $S_{out} = 2.9355 \times 10^5$ ，得到输出信杂比为 $SCR_{out} = S_{out} / C_{out} = 38.9571$ dB。2 种动目标检测方法的效果如图 4 所示。可以看出，当多普勒中心频率不为零时，基于运动平台补偿的星载 SAR-DPCA 动目标检测方法可显著提高系统的动目标检测性能。

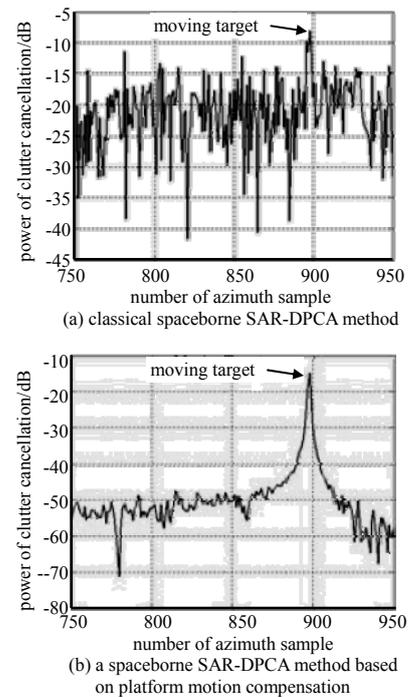


Fig.4 Contrast of clutter cancellation
图 4 两种 DPCA 方法的对消效果对比

表 2 为不同速度的运动目标的检测结果。从表 2 中可看出,同经典的星载 SAR-DPCA 方法相比,基于运动平台补偿的星载 SAR-DPCA 动目标检测方法并没有增加动目标的输出幅度。但是该方法显著降低了输出杂波幅度,所以显著提高了系统的动目标检测性能。 $V_{st,y}$

表 2 两种 DPCA 方法的杂波抑制效果对比

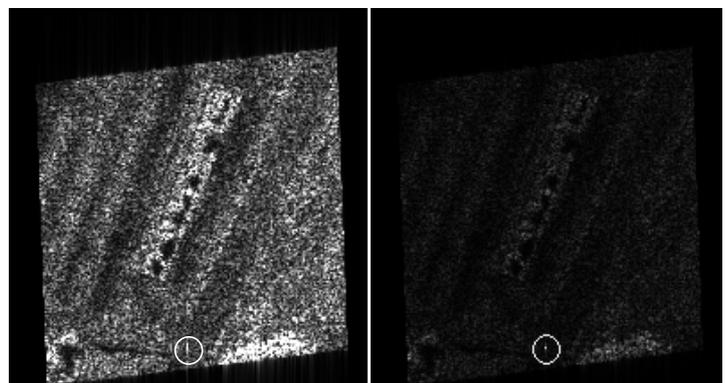
Table 2 Contrast of clutter cancellation of different DPCA method

| velocity of target in E_s /(m/s) | radial velocity $v_{st,y}$ /(m/s) | classical DPCA | | DPCA based on motion compensation | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------|---|------------------------------------|---------------|
| | | amplitude peak of moving target | output SCR/(dB) | compensated radial velocity $v_{st,y}-v_{st,y}^0$ /(m/s) | amplitude peak of moving target | output SCR/dB |
| (2,2) | -5.842 2 | $9.638 9 \times 10^5$ | 16.106 2 | 0.888 9 | $1.488 4 \times 10^5$ | 33.057 8 |
| (5,5) | -4.491 1 | $5.769 7 \times 10^5$ | 11.648 7 | 2.240 0 | $2.935 5 \times 10^5$ | 38.957 1 |
| (8,8) | -3.157 8 | $3.913 8 \times 10^5$ | 8.277 6 | 3.573 3 | $4.377 3 \times 10^5$ | 42.427 6 |
| (10,10) | -2.269 0 | $2.357 9 \times 10^5$ | 3.876 1 | 4.462 1 | $4.536 7 \times 10^5$ | 42.738 2 |
| (20,20) | 2.175 3 | $1.643 1 \times 10^5$ | 0.738 9 | 8.906 4 | $6.325 4 \times 10^5$ | 45.625 4 |

3.2 面目标场景的仿真结果

3.1 节中,用幅度服从瑞利分布,相位在 $[0,2\pi]$ 之间均匀分布的随机数来模拟地杂波,分析基于运动平台补偿的星载 SAR-DPCA 方法的动目标检测性能,本节用一幅真实机载 SAR 场景(复图像)作为地杂波的后向散射系数,仿真双通道星载 SAR 回波作为地杂波,仿真参数与表 1 相同,每个分辨力内布一个点,天线间距符合 DPCA 条件,偏航控制误差 0.1° ,同时仿真一个速度为 $(5\text{ m/s}, 5\text{ m/s})$ 的动目标回波,两回波叠加得到含有动目标的地杂波。

分别应用经典的星载 SAR-DPCA 方法和本文提出的基于运动平台补偿的 SAR-DPCA 方法对双通道回波进行处理。杂波对消后的成像结果如图 5(a)和 5(b)所示。可以看出,图 5(b)的对消效果明显好于图 5(a)。因此,应用基于运动平台补偿的 DPCA 方法对杂波的抑制效果较好,可以很容易检测到运动目标。



(a) classical spaceborne SAR-DPCA method (b) a spaceborne SAR-DPCA method based on platform motion compensation

Fig.5 Imaging contrast of clutter cancellation

图 5 杂波对消后的成像结果

4 结论

本文建立了斜距平面坐标系来描述双通道星载 SAR 回波的多普勒特性。介绍了经典的星载 SAR-DPCA 动目标检测方法。说明了星载条件下,由于地球自转等因素会引起参考点处静止目标径向速度不为零,从而导致经典星载 SAR-DPCA 方法杂波抑制性能下降。提出一种基于运动平台补偿的星载 SAR-DPCA 动目标检测方法,理论推导并仿真验证了这种方法可以显著提高系统的运动目标检测性能。

参考文献:

- [1] 吴明宇,杨桃丽,吴顺君,等. 星载多通道高分辨率宽测绘带 SAR 系统运动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2):441-444. (WU Mingyu, YANG Taoli, WU Shunjun, et al. Ground moving target indication for spaceborne multi-channel high resolution wide swath SAR system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(2):441-444.)
- [2] 王肖洋,高贵,周石琳,等. 一种基于双通道 DPCA 的 SAR-GMTI 杂波抑制方法[J]. 雷达学报, 2014, 3(2):241-248. (WANG Xiaoyang, GAO Gui, ZHOU Shilin, et al. A clutter suppression approach for SAR-GMTI based on dual-channel DPCA[J]. Journal of Radars, 2014, 3(2):241-248.)
- [3] 李学仕,孙光才,邵鹏,等. 一种基于 Deramp 处理的空时自适应处理方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11):2659-2665. (LI Xueshi, SUN Guangcai, SHAO Peng, et al. A space-time adaptive processing method based on Deramp processing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(11):2659-2665.)
- [4] 杨志伟,张蕊,许华健,等. 多特征辅助的 SAR-GMTI 雷达扩展动目标检测方法[J]. 电子学报, 2016, 44(12):2916-2923. (YANG Zhiwei, ZHANG Rui, XU Huajian, et al. A multi-features-aided method for extended target detection of SAR-GMTI[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(12):2916-2923.)
- [5] CERUTTI-MAORI D, SIKANETA I. A generalization of DPCA processing for multichannel SAR/GMTI radars[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1):560-572.

- [6] LIU Baochang, YIN Kuiying, LI Yongkang, et al. An improvement in multichannel SAR-GMTI detection in heterogeneous environments[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 52(2):810–827.
- [7] 夏猛, 杨小牛. 卫星基线斜置的星载三通道 SAR-DPCA 运动目标检测方法研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2012, 39(3):14–26. (XIA Meng, YANG Xiaoniu. Study of three-channel spaceborne SAR-DPCA moving target detection with the slant-placed baseline[J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2012, 39(3):14–26.)
- [8] 孙娜, 周荫清, 李景文. 一种新的双孔径天线干涉 SAR 动目标检测方法[J]. 电子学报, 2003, 31(12):1820–1823. (SUN Na, ZHOU Yinqing, LI Jingwen. A new moving target detection method based on dual-aperture antenna interferometric SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12):1820–1823.)
- [9] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京:科学出版社, 2002:174–185. (WEI Zhongquan. Synthetic aperture radar satellite[M]. Beijing:Science Press, 2002:174–185.)

作者简介:



李林琳(1983–), 女, 黑龙江省齐齐哈尔市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为星载合成孔径雷达成像、运动目标检测与参数估计等. email:lilinlin_qwe@163.com.

赵毅寰(1983–), 男, 河南省南阳市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达信号处理、雷达导引技术.

丁庆海(1968–), 男, 山东省淄博市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达信号处理、红外视景分析等技术.

刘鑫(1983–), 男, 山东省东营市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为遥控遥测信号处理技术.

(上接第 988 页)

- [9] 刁鸣, 王越. 基于多普勒频率变化率的无源定位算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(5):696–698. (DIAO Ming, WANG Yue. Research of passive location based on the Doppler changing rate[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(5):696–698.)
- [10] 万方, 丁建江, 郁春来. 利用空频域信息的固定单站无源探测定位方法[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(3):91–95. (WAN Fang, DING Jianjiang, YU Chunlai. Method of fixed single observer passive location based on spatial frequency domain information[J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(3):91–95.)
- [11] 沈文亮, 李艳斌, 陈卫东, 等. 基于无源测距的快速定位方法研究[J]. 电子学报, 2009, 37(13):1343–1347. (SHEN Wenliang, LI Yanbin, CHEN Weidong, et al. The study of a technology of passive measuring distance single observer fast passive location[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(13):1343–1347.)
- [12] 万方, 丁建江. 对运动目标的单站无源定位技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(1):8–12. (WAN Fang, DING Jianjiang. Research on single observer passive location technology for moving targets[J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(1):8–12.)

作者简介:



田明辉(1981–), 男, 黑龙江省大庆市人, 博士, 主要从事无源探测系统设计研究工作. email:mhtian@mail.ustc.edu.cn.

马敏(1979–), 男, 江西省景德镇市人, 硕士, 主要从事系统软件架构等研究工作.

张文祎(1987–), 男, 安徽省庐江县人, 硕士, 工程师, 主要从事无源定位算法及信息对抗方面研究.