

基于 DPCA 技术的星载 SAR/GMTI 处理方法

孙娜*** 周荫清* 李景文*

*(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

** (中国农业大学信息与电气工程学院 北京 100083)

摘要: 星载合成孔径雷达的轨道运动以及地球自转、地球曲率等因素使星载 SAR/GMTI 处理方法与机载不同。该文首先分析了星载 SAR 三孔径天线信号特性, 然后给出并详细分析了基于偏置相位中心天线(DPCA)的机载 SAR/GMTI 处理方法。在此基础上, 给出了一种基于 DPCA 技术的星载 SAR 动目标检测、测速及目标定位的实现方法。最后, 星载 SAR/GMTI 计算机仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 星载合成孔径雷达, GMTI, 杂波抑制, 偏置相位中心天线

中图分类号: TN957.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)10-1564-05

An Algorithm of Spaceborne SAR/GMTI Based on DPCA

Sun Na*** Zhou Yin-qing* Li Jing-wen*

*(School of Electronics and Information Engineering, BUAA, Beijing 100083, China)

** (School of Information and Electrical Eng., Chinese Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract Such factors as complicated spaceborne SAR orbital motion, earth rotation, earth surface curvature etc. make the realization of spaceborne SAR/GMTI different from airborne SAR/GMTI. In this paper, the property of three-antenna spaceborne SAR is analyzed firstly, and then the method of airborne SAR/GMTI processing is given and analyzed. On the basis of airborne SAR/GMTI, an algorithm of spaceborne SAR moving target detection, radial velocity estimation and relocation based on DPCA technique is presented. Finally, spaceborne SAR/GMTI computer simulation results validate its effectiveness.

Key words Spaceborne synthetic aperture radar, Ground Moving Target Indication(GMTI), Clutter suppression, Displaced Phase Center Antenna(DPCA)

1 引言

合成孔径雷达运动目标检测对于目标的监视、侦察、攻击等军事应用有着重要意义。美国联合监视目标攻击雷达系统(JSTARS)^[1]是一典型的机载SAR/MTI系统, 它可以提供全天候大区域战场监视和动目标检测, 在高分辨率雷达图像上能同时显示地面静止目标和场景中的低速运动目标。星载 SAR/GMTI能够从高空实现广域监视, 对世界热点战区的军事活动进行侦察, 及时发现高价值的军事目标。因此, 人们试图将机载警戒控制系统(AWACS)和 JSTARS实现的监视功能移植到星载平台上^[2]。目前关于星载SAR/GMTI的研究主要有美国的Discoverer II计划^[3]以及加拿大的Radarsat 2 卫星^[4], 但均处于试验阶段, 其具体实现无从知道。

偏置相位中心天线(DPCA)技术采用多孔径天线相位补偿原理来抑制地杂波, 实现运动目标检测。在机载 SAR/GMTI 中, 对 DPCA 条件下不同时间的两通道信号直接利用 DPCA

原理来对消杂波, 根据残差图像的幅度对消特性来检测运动目标。但是在星载 SAR/GMTI 中, 卫星复杂的轨道运动以及地球自转和地球曲率的影响, 使星载 SAR 多普勒历程与机载不同, 卫星轨道和地球自转的影响不可忽略。

本文首先分析了星载 SAR 三孔径天线机理, 然后详细分析了基于 DPCA 的机载 SAR/GMTI 处理方法, 在此基础上给出了一种基于 DPCA 技术的星载 SAR 动目标检测、径向速度分量估计以及目标定位的处理方法。最后, 通过星载 SAR/GMTI 计算机仿真结果进行了验证。

2 星载 SAR 三孔径天线信号特性

星载 SAR 三孔径天线空间几何关系如图 1 所示。其中, S_1, S_2, S_3 为卫星雷达传感器上沿航迹向线性排列的三孔径天线, 天线孔径为 D , 间隔为 L ; θ_L 为天线视角, 指波束中心与卫星星下点之间的夹角; 设 R_s, V_s, A_s 分别为卫星雷达传感器的位置、速度及加速度矢量, R_t, V_t, A_t 分别为地面点目标的位置、速度及加速度矢量; 天线 S_2 发射脉冲宽度为

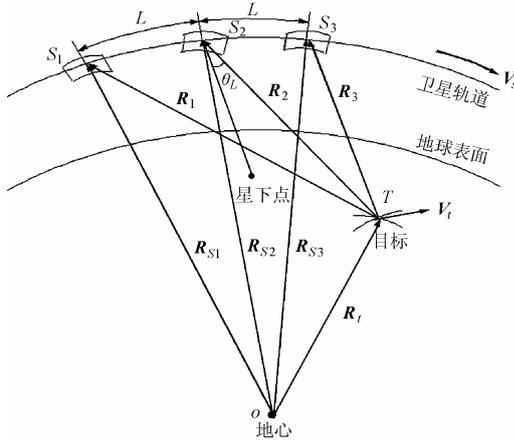


图 1 三孔径天线星载 SAR/GMTI 空间几何关系图

T_p , 调频率为 b 的线性调频信号, 天线 S_1, S_2, S_3 同时接收回波信号; 假设 R_2 为天线 2 波束中心照射地面点目标时的斜距距离, 设此时刻为 $t=0$, 发射天线到目标 T 的初始距离为 R_0 ; R_1, R_3 分别为 $t=0$ 时刻接收天线 1 和天线 3 到目标点的斜距距离; $R_r(t)$ 表示地面点目标位置; 设 t 时刻目标 T 到 3 个天线的距离矢量分别为 $R_1(t), R_2(t)$ 和 $R_3(t)$, 则

$$\begin{aligned} R_1(t) &= R_{s1}(t) - R_r(t), & R_2(t) &= R_{s2}(t) - R_r(t), \\ R_3(t) &= R_{s3}(t) - R_r(t) \end{aligned} \quad (1)$$

卫星到地面目标的相对速度矢量和加速度矢量分别为 V_{st} 和 A_{st} . 在合成孔径时间这一较短的时间内, t 时刻目标与雷达接收天线之间的相对运动可表示为^[5]

$$R(t) = R + Vt + \frac{1}{2}At^2 \quad (2)$$

其中 R, V, A 分别为 $t=0$ 时刻雷达与地面目标点之间的相对距离矢量、速度矢量和加速度矢量, 即

$$\begin{aligned} R_1(t) &= R_1 + V_{st}t + \frac{1}{2}A_{st}t^2, & R_2(t) &= R_2 + V_{st}t + \frac{1}{2}A_{st}t^2, \\ R_3(t) &= R_3 + V_{st}t + \frac{1}{2}A_{st}t^2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $R_2 = R_1 + \overline{S_2S_1}$, $R_3 = R_2 + \overline{S_3S_2}$, $\overline{S_2S_1}, \overline{S_3S_2}$ 为两天线相位中心间隔矢量。在 $t=0$ 处泰勒级数展开, 得

$$\begin{aligned} |R_1(t)| &= \left| R_1 + V_{st}t + \frac{1}{2}A_{st}t^2 \right| \approx \left| R_1 \right| + \frac{R_1 \cdot V_{st}}{|R_1|}t \\ &\quad + \frac{1}{2} \left[\frac{V_{st} \cdot V_{st}}{|R_1|} + \frac{R_1 \cdot A_{st}}{|R_1|} - \frac{(R_1 \cdot V_{st})^2}{|R_1|^3} \right] \cdot t^2 \\ |R_2(t)| &= \left| R_2 + V_{st}t + \frac{1}{2}A_{st}t^2 \right| \approx \left| R_2 \right| + \frac{R_2 \cdot V_{st}}{|R_2|}t \\ &\quad + \frac{1}{2} \left[\frac{V_{st} \cdot V_{st}}{|R_2|} + \frac{R_2 \cdot A_{st}}{|R_2|} - \frac{(R_2 \cdot V_{st})^2}{|R_2|^3} \right] \cdot t^2 \\ |R_3(t)| &= \left| R_3 + V_{st}t + \frac{1}{2}A_{st}t^2 \right| \approx \left| R_3 \right| + \frac{R_3 \cdot V_{st}}{|R_3|}t \\ &\quad + \frac{1}{2} \left[\frac{V_{st} \cdot V_{st}}{|R_3|} + \frac{R_3 \cdot A_{st}}{|R_3|} - \frac{(R_3 \cdot V_{st})^2}{|R_3|^3} \right] \cdot t^2 \end{aligned} \quad (4)$$

得瞬时频率为

$$\begin{aligned} f_1(t) &= -(fd_1 + fr_1 \cdot t), & f_2(t) &= -(fd_2 + fr_2 \cdot t), \\ f_3(t) &= -(fd_3 + fr_3 \cdot t) \end{aligned} \quad (5)$$

即回波信号在方位向频率具有线性调频特性。

经推导, 距离脉冲压缩后收发分置三孔径天线接收信号的表达式为

$$\begin{aligned} S_1(t) &= G \cdot \exp \left\{ -j2\pi \cdot \frac{L^2 - 2X_0L}{2\lambda R} \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j2\pi \left[fd_2 \cdot t + \frac{1}{2}fr_1 \cdot t^2 \right] \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi \frac{VL}{\lambda R} \cdot t \right\} \\ S_2(t) &= G \cdot \exp \left\{ -j2\pi \left[fd_2 \cdot t + \frac{1}{2}fr_2 \cdot t^2 \right] \right\} \\ S_3(t) &= G \cdot \exp \left\{ -j2\pi \cdot \frac{L^2 + 2X_0L}{2\lambda R} \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j2\pi \left[fd_2 \cdot t + \frac{1}{2}fr_3 \cdot t^2 \right] \right\} \cdot \exp \left\{ j2\pi \frac{VL}{\lambda R} \cdot t \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 V 为卫星等效速度, R 为不同距离上 $t=0$ 方位波束中心照射时的斜距, X_0 为地面点目标方位向的位置。

3 基于 DPCA 的机载 SAR/GMTI 处理方法

3.1 机载 SAR/GMTI 处理方法

对于机载正侧视 SAR 系统, 运动目标的多普勒参数可表示为

$$fr_1 \approx fr_2 \approx fr_3 = \frac{2 \left[(V_a - V_x)^2 + V_y^2 \right]}{\lambda R} \cdot fd_2 = \frac{2V_y}{\lambda} - \frac{2(V_a - V_x)X_0}{\lambda R} \quad (7)$$

其中 V_a 为载机飞行速度, V_x, V_y 表示运动目标的切向速度和径向速度, 满足 $V_a \gg V_x, V_a \gg V_y$ 条件。

当满足 DPCA 的条件 $\Delta t = L/(2V_a)$ 时, 其中 Δt 为方位向延迟时间。由式(6)可得

$$\begin{aligned} S_1(t - \Delta t) &= G \exp \left\{ -j2\pi \frac{L^2}{2\lambda R} \right\} \exp \left\{ -j2\pi fd_2 \cdot t \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j\pi fr_2 (t - \Delta t)^2 \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{L}{V_a} V_y \right\} \exp \left\{ -j2\pi \frac{V_a L}{\lambda R} (t - \Delta t) \right\} \\ S_2(t) &= G \exp \left\{ -j2\pi \left[fd_2 t + \frac{1}{2}fr_2 t^2 \right] \right\} \\ S_3(t + \Delta t) &= G \exp \left\{ -j2\pi \frac{L^2}{2\lambda R} \right\} \exp \left\{ -j2\pi fd_2 \cdot t \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j\pi fr_2 (t + \Delta t)^2 \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{L}{V_a} V_y \right\} \exp \left\{ j2\pi \frac{V_a L}{\lambda R} (t + \Delta t) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

当 $V_y = 0$ 时, 相当于地面静止目标的回波。

机载 SAR/GMTI 处理时, 需要对前后两孔径天线的回波

信号补偿天线间隔引起的固定相位，同时补偿由载机运动产生的线性调频项，即构造参考函数：

$$\left. \begin{aligned} C_{1a}(t) &= \exp\left\{j\frac{\pi L^2}{\lambda R}\right\} \exp\left\{j\pi\frac{2V_a^2}{\lambda R}(t-\Delta t)^2\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{j2\pi\frac{V_a L}{\lambda R}(t-\Delta t)\right\} \\ C_{2a}(t) &= \exp\left\{j\pi\frac{2V_a^2}{\lambda R}t^2\right\} \\ C_{3a}(t) &= \exp\left\{j\frac{\pi L^2}{\lambda R}\right\} \exp\left\{j\pi\frac{2V_a^2}{\lambda R}(t+\Delta t)^2\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{V_a L}{\lambda R}(t+\Delta t)\right\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

忽略系统噪声，将三天线回波信号与参考函数相乘后，经傅里叶变换得到频域图像：

$$\left. \begin{aligned} S_1(f) &= \sum_{n=0}^{N-1} S_1(t-\Delta t) \cdot C_{1a}(t) \exp\{-j2\pi ft\} \\ &= G \cdot \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{L}{V_a} \cdot V_y\right\} S(f) \\ S_2(f) &= \sum_{n=0}^{N-1} S_2(t) \cdot C_{2a}(t) \exp\{-j2\pi ft\} = G \cdot S(f) \\ S_3(f) &= \sum_{n=0}^{N-1} S_3(t+\Delta t) \cdot C_{3a}(t) \exp\{-j2\pi ft\} \\ &= G \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{L}{V_a} \cdot V_y\right\} S(f) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} S(f) &= \sum_{n=0}^{N-1} \exp\{-j2\pi \cdot fd_2 \cdot nT\} \\ &\quad \cdot \exp\{-j\phi'(n)\} \cdot \exp\{-j2\pi fnT\} \\ \phi'(n) &= \pi \cdot \left[ft_2 - \frac{2V_a^2}{\lambda R}\right] (nT)^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

当检测慢速运动目标时，满足 $V_a \gg V_x$ ， $V_a \gg V_y$ 条件，所以式(11)近似为

$$\left. \begin{aligned} S(f) &= \sum_{n=0}^{N-1} \exp\{-j2\pi fd_2(nT)\} \exp\{-j2\pi fnT\} \\ &= -\exp\left\{j2\pi\left(\frac{N-1}{2}\right)\beta\right\} \frac{\sin[N\pi\beta]}{\sin[\pi\beta]} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中 $\beta = (-fd_2 - f) \cdot T$ ，当 $f = -fd_2$ 时， $|S(f)|_{\max}^2 = N^2$ 。

对3幅图像进行杂波抑制处理，得到残差图像：

$$\left. \begin{aligned} S_{12}(f) &= S_1(f) - S_2(f) \\ &= G \cdot 2j \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{L}{V_a} V_y\right) \exp\left\{j\frac{\pi}{\lambda} \frac{L}{V_a} V_y\right\} S(f) \\ S_{23}(f) &= S_2(f) - S_3(f) \\ &= G \cdot 2j \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{L}{V_a} V_y\right) \exp\left\{-j\frac{\pi}{\lambda} \frac{L}{V_a} V_y\right\} S(f) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

即对消特性为

$$|S_{12}(f)|^2 = |S_{23}(f)|^2 = 4 \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{L}{V_a} \cdot V_y\right) G^2 N^2 \quad (14)$$

可见，动目标回波强度随目标径向速度按正弦规律对消，而静止目标因径向速度 $V_y = 0$ 被完全对消。

3.2 机载 SAR/GMTI 实现方法框图

图2给出了基于DPCA的机载SAR动目标检测、径向速度估计和运动目标定位的实现方法框图。

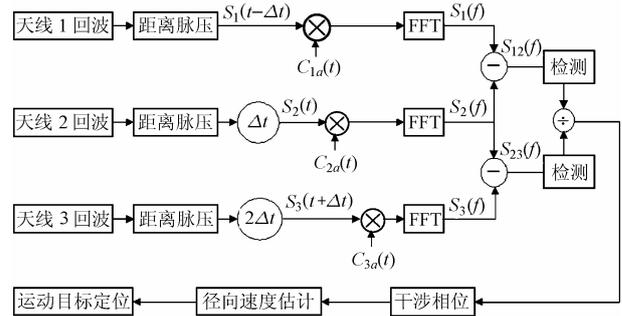


图2 基于DPCA的机载SAR/GMTI实现方法框图

3.3 动目标检测

若对消后的图像能量式(14)超过给定的检测门限，则认为有运动目标存在，所在的多普勒频率为 \hat{f} 。

3.4 径向速度估计

在检测出运动目标后，取杂波对消后的两路图像的干涉相位，可得出运动目标的径向速度，即

$$\Delta\Phi = \arg(S_{12}(\hat{f}) \cdot S_{23}^*(\hat{f})) = (2\pi/\lambda) \cdot (L/V_a) \cdot V_y \quad (15)$$

其中上标*表示取共轭操作。所以

$$\hat{V}_y = \lambda V_a \cdot \Delta\Phi / (2\pi L) \quad (16)$$

3.5 运动目标定位

由检测到的目标位置与方位向偏移量以及目标真实位置之间的关系，可得到目标的定位位置：

$$\hat{X}_0 = [(\lambda R)/(2V_a)] \hat{f} + R \cdot (\hat{V}_y/V_a) \quad (17)$$

4 基于DPCA的星载SAR/GMTI处理方法

4.1 星载SAR/GMTI处理方法

由于星载SAR中卫星复杂的轨道运动以及地球自转、地球曲率的影响，星载SAR多普勒历程与机载SAR不同，因此在星载SAR/GMTI处理中可采用与机载SAR/GMTI相类似的处理方法。

在满足DPCA的条件 $\Delta t = L/2V' = 1/PRF$ 时，其中， Δt 为方位向延迟时间， V' 为满足DPCA条件的卫星速度。由式(6)

有

$$\left. \begin{aligned} S_1(t-\Delta t) &= G \exp\left\{-j2\pi \frac{L^2}{2\lambda R}\right\} \exp\{-j2\pi f d_2 \cdot t\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j\pi f r_2(t-\Delta t)^2\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{j \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{V_y}{V'}\right\} \exp\left\{-j2\pi \frac{VL}{\lambda R}(t-\Delta t)\right\} \\ S_2(t) &= G \exp\left\{-j2\pi \left[fd_2 t + \frac{1}{2}fr_2 t^2\right]\right\} \\ S_3(t+\Delta t) &= G \exp\left\{-j2\pi \frac{L^2}{2\lambda R}\right\} \exp\{-j2\pi f d_2 \cdot t\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j\pi f r_2(t+\Delta t)^2\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{V_y}{V'}\right\} \exp\left\{j2\pi \frac{VL}{\lambda R}(t+\Delta t)\right\} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

其中 V_y 表示运动目标的径向速度。当 $V_y = 0$ 时, 相当于地面静止目标的回波。

星载 SAR/GMTI 处理时构造参考函数:

$$\left. \begin{aligned} C_{1s}(t) &= \exp\left\{j2\pi \frac{L^2}{2\lambda R}\right\} \exp\left\{j\pi f r_2(t-\Delta t)^2\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{j2\pi \frac{VL}{\lambda R}(t-\Delta t)\right\} \\ C_{2s}(t) &= \exp\left\{j\pi \frac{2V^2}{\lambda R} \cdot t^2\right\} \\ C_{3s}(t) &= \exp\left\{j2\pi \frac{L^2}{2\lambda R}\right\} \exp\left\{j\pi f r_2(t+\Delta t)^2\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j2\pi \frac{VL}{\lambda R}(t+\Delta t)\right\} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

忽略系统噪声, 类似机载 SAR/GMTI 的处理方法, 将与参考函数相乘后的三天线回波信号经傅里叶变换至频域图像:

$$\left. \begin{aligned} S_1(f) &= \sum_{n=0}^{N-1} S_1(t-\Delta t) \cdot C_{1s}(t) \exp\{-j2\pi f t\} \\ S_2(f) &= \sum_{n=0}^{N-1} S_2(t) \cdot C_{2s}(t) \exp\{-j2\pi f t\} \\ S_3(f) &= \sum_{n=0}^{N-1} S_3(t+\Delta t) \cdot C_{3s}(t) \exp\{-j2\pi f t\} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

即

$$\left. \begin{aligned} S_1(f) &= G \exp\left\{j \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{V_y}{V'}\right\} S(f) \\ S_2(f) &= GS(f) \\ S_3(f) &= G \exp\left\{-j \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{V_y}{V'}\right\} S(f) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

经杂波对消得到前后两副残差图像:

$$\left. \begin{aligned} S_{12}(f) &= S_1(f) - S_2(f) \\ &= G \cdot 2j \sin\left(\frac{\pi L}{\lambda} \frac{V_y}{V'}\right) \exp\left\{j \frac{\pi L}{\lambda} \frac{V_y}{V'}\right\} S(f) \\ S_{23}(f) &= S_2(f) - S_3(f) \\ &= G \cdot 2j \sin\left(\frac{\pi L}{\lambda} \frac{V_y}{V'}\right) \exp\left\{-j \frac{\pi L}{\lambda} \frac{V_y}{V'}\right\} S(f) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

得到对消特性为

$$|S_{12}(f)|^2 = |S_{23}(f)|^2 = 4 \sin^2\left(\frac{\pi L}{\lambda} \frac{V_y}{V'}\right) G^2 N^2 \quad (23)$$

可见, 星载 SAR/GMTI 经上述 DPCA 处理后, 动目标回波强度随目标径向速度按正弦规律对消, 而静止目标因径向速度 $V_y = 0$ 被完全对消。

4.2 星载 SAR/GMTI 实现方法框图

图 3 给出了基于 DPCA 的星载 SAR 动目标检测、径向速度估计和运动目标定位的实现方法框图。

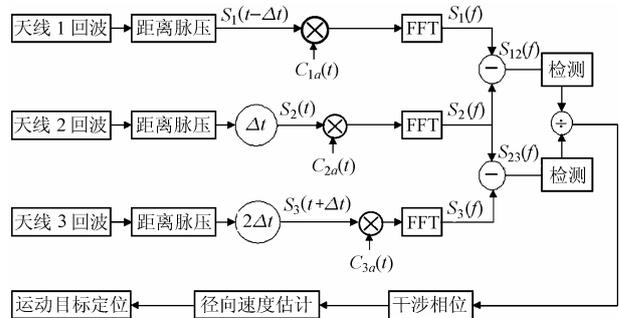


图 3 基于 DPCA 的星载 SAR/GMTI 实现方法框图

4.3 动目标检测

若对消后的图像能量式(23)超过给定的检测门限, 则认为有运动目标存在, 所在的多普勒频率为 \hat{f} 。

4.4 径向速度估计

在检测出运动目标后, 取杂波对消后的两路图像的干涉相位, 可得出运动目标的径向速度, 即

$$\Delta\Phi = \arg(S_{12}(f) S_{23}^*(f)) = (2\pi/\lambda) \cdot (L/V') \cdot V_y \quad (24)$$

其中上标 * 表示取共轭操作。所以

$$\hat{V}_y = \lambda V' \cdot \Delta\Phi / (2\pi L) \quad (25)$$

4.5 运动目标定位

由检测到的目标位置与方位向偏移量以及目标真实位置之间的关系, 可得到目标的定位位置:

$$\hat{X}_0 = [(\lambda R) / (2V')] \hat{f} + R \cdot (\hat{V}_y / V') \quad (26)$$

5 计算机仿真

对上述基于 DPCA 的星载 SAR/GMTI 处理方法进行计算机仿真。地面静止目标(即地杂波) $\sigma_c^0 = -10\text{dB}$, 频谱近似为高斯形状, 幅度服从瑞利分布。一个运动目标置于场景中

心, 地面速度 $V_{y\text{-ground}} = 6.0\text{m/s}$ 。动目标雷达截面积为 $\sigma_T = 20\text{m}^2$ 。雷达波长 $\lambda = 0.03\text{m}$, 发射信号带宽 $B = 80.0 \times 10^6\text{Hz}$, 采样率 $F_s = 100.0 \times 10^6\text{Hz}$, 卫星高度 $H = 632\text{km}$, 脉冲重复频率 $\text{PRF} = 5100.313\text{Hz}$ 。图 4(a)和图 4(b)分别为杂波对消前、后动目标所在距离线的图像。动目标的径向速度估计为 $\hat{V}_y = -5.08\text{m/s}$, 定位位置为 $\hat{X}_0 = 0.29\text{m}$ 。

从图中可以看出, 地杂波被显著对消。通过计算对消前杂波复图像和对消后剩余杂波复图像的均值和方差, 可以得到地杂波的对消比大约为 36.2 dB。

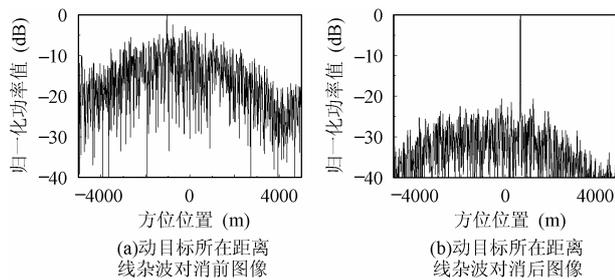


图 4

6 结束语

本文首先分析了星载 SAR 三孔径天线信号特性, 然后详细推导并分析了基于 DPCA 的机载 SAR/GMTI 处理方法, 在此基础上, 给出了一种基于 DPCA 技术的星载 SAR 动目标检测、径向速度分量估计以及目标定位的处理方法。该方法能够对地杂波淹没的慢速运动目标进行检测、测速与定位。最后, 通过星载 SAR/GMTI 计算机仿真结果进行了验证。

参 考 文 献

- [1] Stockburger E F, Held D N. Interferometric moving ground target imaging [J]. IEEE International Radar Conference, Washington DC, May 8-11, 1995: 438 – 443.
- [2] Kim Corcoran. Higher eyes in the sky: the feasibility of moving AWACS and JSTARS functions into space. ADA391375, Jun 1998.
- [3] Whelan D A. Discoverer II program summary [J]. Radar Conference, 2000. The Record of the IEEE 2000 International, Alexandria, VA, USA, May 7-12, 2000: 7 – 8.
- [4] Nohara T J, Weber P, *et al.*. SAR-GMTI processing with Canada's radarsat 2 satellite [J]. Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium, Lake Louise, AB, Canada, October 1-4, 2000: 379 – 384.
- [5] Wu Chialin, Liu K Y, Jin Michael. Modeling and a correlation algorithm for spaceborne SAR signals [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1982, 18(5): 563 – 574.
- [6] 李景文. 合成孔径雷达动目标检测与成像[D]. [博士学位论文], 北京: 北京航空航天大学, 1999.9.

孙 娜: 女, 1975 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 动目标检测与成像、数字信号处理、高分辨率 SAR 成像。

周荫清: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事通信与信息系统、信息获取与处理、高分辨率成像雷达和时变谱估计等方面的科研工作。

李景文: 男, 1964 年生, 教授, 博士, 中国电子学会高级会员, 主要从事动目标检测与成像处理、信号与信息处理、机载及星载高分辨率 SAR 成像、杂波谱估计等方面的研究工作。