

双基 SAR 成像的点目标解析频谱研究

丁金闪^{①②} Otmar Loffeld^② Holger Nies^② 邢孟道^① 保铮^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

^②(锡根大学 ZESS 锡根 德国 57076)

摘要: 双基 SAR 距离徙动由于存在两个双曲线形式, 使用传统的驻定相位原理方法难以解析得到双基下的目标二维频谱。该文总结了 LBF 方法, 级数反演方法, 利用双基成像几何的瞬时频率方法以及基于等效单基思想的 DMO 方法, 并给出了必要的分析, 给出了 DMO 方法和 GBF 的等效性, 验证了在任意构型下级数反演方法和 LBF 的关系。通过不同双基构型下的点目标成像仿真结果详细分析了各种方法的聚焦性能。

关键词: 合成孔径雷达; 双基 SAR(BiSAR); 点目标频谱

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0763-05

Study of Point Target Spectrum for Bistatic SAR Imaging

Ding Jin-shan^{①②} Otmar Loffeld^② Holger Nies^② Xing Meng-dao^① Bao Zheng^①

^①(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Center for Sensorsystems (ZESS), University of Siegen, Siegen, 57068, Germany)

Abstract: An exact analytic solution for the 2-dimensional point target reference spectrum is difficult to find for bistatic SAR image formation due to a double hyperbola in the bistatic range migration equation. Four methods of the point target reference spectrum are analyzed, namely Loffeld's Bistatic Formula (LBF), Method of Series Reversion (MSR), Geometry-based Bistatic Formula (GBF) and the Dip Move Out (DMO) approach. The link between GBF and DMO is given in detail in this paper, and also the link between MSR and LBF is validated by simulation results.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Bistatic SAR; Point target spectrum

1 引言

双基地 SAR 相对单基地 SAR 可以获得更多的目标信息, 隐蔽性好, 抗干扰和抗截获性能更好, 从而得到了广泛关注^[1,2]。双基 SAR 点目标斜距历程为收发双根号形式, 直接利用驻定相位原理难以得到频域算法所需要的点目标的二维参考频谱。因此求取点目标二维频谱成为双基 SAR 研究的重点。

双基地 SAR 的回波频域解析表达式主要有 4 种。最早提出的是来自于地震信号处理领域的 DMO 算法, 先用一个 Smile 算子对双基数据进行预处理, 补偿等效单基数据后再进行传统的单基成像^[3-5]。此算法局限于对同航线等速构型双基 SAR 进行成像处理。第 2 种方法是 Loffeld 等人提出的 LBF(Loffeld's Bistatic Formula, LBF), 此方法通过对收发相位历程在各自的驻相点处二阶泰勒展开, 然后利用驻相原理得到双基 SAR 点目标二维近似频谱^[6]。LBF 是第一个提出的原理上适用于任意构型双基构型的点目标二维参考

频谱。近期, Neo 等人提出了一种级数反演方法(Method of Series Reversion, MSR)来直接求取点目标二维频谱^[7], 采用高阶逼近可以达到很高精度。Zhang 等人基于瞬时频率推导出双基 SAR 的点目标二维波数域表达式(Geometry-based Bistatic Formula, GBF)^[8], 并推广到平移不变构型^[9]。此外, 还有基于数值计算得到的双基 SAR 数值传递函数方法^[10]。

基于点目标频谱可以在单基 SAR 成像算法的基础上开发出多种频域成像方法, 如 RD, CS, RMA 等。而在深入研究有效成像算法之前, 有必要对双基 SAR 的各种点目标二维解析频谱进行深入地比较和聚焦性能的仿真分析, 从而有利于在实际算法设计中选择合适的双基频谱。本文在对上述 4 种点目标二维解析频谱分析的基础上给出了相互之间的等效性分析。通过不同双基构型下的点目标成像仿真结果分析了各种方法的聚焦性能。

2 同航线等速双基 SAR 频谱

2.1 同航线双基 SAR 信号模型

如图 1 所示为同航线双基 SAR 几何关系示意图。 T 和 R 分别为发射机和接收机, 其沿同一个直线航线等速飞行, 速度为 V 。在斜距平面内, 发射机和接收机雷达波束中心对应

2007-12-25 收到, 2008-06-30 改回

“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-06-0861)和国家留学基金委资助课题

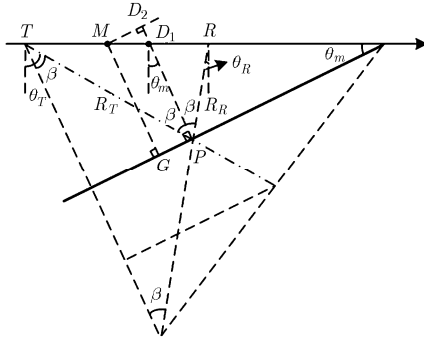


图1 同航线等速双基 SAR 几何模型

的斜视角分别表示为 θ_T 和 θ_R 。 R_T 和 R_R 为收发瞬时斜距，并定义收发斜距和的一半为 R_b ，即 $R_b = (R_T + R_R)/2$ 。基线长度为 h_x ，双基的基线中点为 M 点。点目标为 P 。本文采用文献[3]中的地震信号处理的几何定义法，即定义 θ_m 为倾斜角，从几何关系有 $\theta_m = (\theta_T + \theta_R)/2$ 。 MG 为基线中点至倾斜面的垂线段。 PD_2 为双基角分线，半双基角表示为 β ， $\beta = (\theta_T - \theta_R)/2$ 。

2.2 DMO 方法与 GBF 的等效性

DMO 方法来自于地震信号处理，其首先将同航线双基 SAR 的回波数据通过一定的补偿成为某个等效单基 SAR 的回波，而后执行单基 SAR 成像处理^[3]，其优点是可以利用现有的单基处理平台进行双基 SAR 处理。而瞬时频率法有效利用了双基成像几何关系避免了求解双根号的傅里叶积分问题，得到了解析的波数域点目标二维参考频谱。 DMO 方法的本质在于基于双基角分线的 Smile 补偿算子，利用 DMO 的原理，从等效单基变换的角度可以重新推导得到同航线双基 SAR 的波数域表达式，但是需要注意的是等效单基的位置是随倾斜角 θ_m 变化的，即随多普勒变化，不同于 DMO 方法将等效单基的位置固定于基线中点 M ，但两者本质上是一致的。

首先讨论 DMO 方法。设双基回波的延迟时间为 $t_b(\theta_m)$ ，而当等效单基位置在 M 点时，等效单基的双程回波延迟时间设为 $t_m(\theta_m)$ ，需要注意的是 $t_m(\theta_m)$ 对应的即为图 1 中电波传播 $2MG$ 距离的时间，在地震信号处理中称为发射信号至地层倾斜面的双程时间，而不是 $2MP$ 。此正是来自于地震信号处理的 DMO 方法的特点，也正是这个特点导致了 DMO 方法理解的困难。本文将分析得到此特点正是 DMO 方法和 GBF 方法的联系所在。从图 1 所示的几何关系，不难证明 $t_m(\theta_m)$ 和 $t_b(\theta_m)$ 有如下关系式成立^[3]，

$$t_b^2(\theta_m) = t_m^2(\theta_m) + \frac{h_x^2}{c^2} \cos^2 \theta_m \quad (1)$$

其中 c 为光速。因此，双基 SAR 等效单基变换的补偿延迟时间，即 DMO 时间为

$$t'_{\text{DMO}}(\theta_m) = t_b(\theta_m) - t_m(\theta_m) = t_b(\theta_m) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{h_x^2 \cos^2 \theta_m}{c^2 t_b^2(\theta_m)}} \right) \quad (2)$$

文献[3]由此得到的 DMO 补偿时间存在近似，即认为 Smile 操作引入的时间伸展效应可以忽略，这在双基的基线斜距比较小的情况下是可行的，但是对于一般情况则不够精确，精确的 DMO 延迟补偿时间应为

$$t_{\text{DMO}}(\theta_m) = t_b(\theta_m) - t_m(\theta_m) \cos \beta \quad (3)$$

因此，波数域补偿算子的表达式为

$$H_{\text{DMO}}(K_X, K_R) = \exp \left[jK_R c t_b \left(1 - \cos \beta \sqrt{1 - \frac{h_x^2 \cos^2 \theta_m}{c^2 t_b^2(\theta_m)}} \right) \right] \quad (4)$$

其中，径向波数 $K_R = 2\pi/\lambda$ ，方位波数为 $K_X = K_R \sin \theta_m$ ， λ 为波长。本文称式(4)为精确 DMO 方法。

在分析 GBF 方法时，先定义新的二维波数为 $K'_R = K_R \cos \beta$ ， $K'_X = 2K'_R \sin \theta_m$ 。下面分析必须如此定义双基等效单基变换中二维波数的原因。

双基 SAR 的瞬时多普勒表达式为

$$f_d = -\frac{V}{\lambda} (\sin \theta_T + \sin \theta_R) = -\frac{2V}{\lambda} \cos \beta \sin \theta_m \quad (5)$$

其中 $\beta = (\theta_T - \theta_R)/2$ ， $\theta_m = (\theta_T + \theta_R)/2$ 。则在 BORN 一阶散射模型近似下，为了在等效单基变换中不改变回波的多普勒特性(干涉特性)，必须改变变换后的等效单基 SAR 的等效波长，并且将等效单基 SAR 的位置设定于双基角分线上，也就是径向波数改为 $K'_R = K_R \cos \beta = 2\pi \cos \beta / \lambda$ 。实际中由于雷达发射信号具有一定的带宽，则此变换可以简单地通过对距离频谱平移一个很小的量来实现。而这个径向波数的改变正对应于 DMO 的时域伸展效应。

将基线中点 M 作为参考坐标点，将等效单基 SAR 的位置设定在 D_1 点，则由瞬时多普勒频率方法可得到此时等效单基的二维波数域表达式为

$$\phi(K'_X, K'_R) = 2K'_R \overline{PD_1} + K'_X \overline{D_1 M} \quad (6)$$

由几何关系，易得 $\overline{D_1 D_2} = \overline{D_1 M} \sin \theta_m$ ， $K'_X \overline{D_1 M} = 2K'_R \overline{D_1 M} \cdot \sin \theta_m = 2K'_R \overline{D_1 D_2}$ 。则式(7)成为

$$\phi(K'_X, K'_R) = 2K'_R \overline{PD_2} \quad (7)$$

由此可以得出基于双基角分线设定的等效单基的精确位置即在 D_2 ，其与多普勒频率相关。从图 1 有关系式， $MG = PD_2$ 。这从等效单基位置方面说明了 DMO 和 GBF 的等效性。下面分析两者的点目标二维频谱。

基于瞬时频率方法，利用双基几何关系得到点目标二维波数域表达式为^[8]

$$\phi_b(K'_X, K'_R) = \left(R_B + \frac{h_x}{2} \tan \beta \right) \sqrt{4K_R'^2 - K_X'^2} + X_P K'_X \quad (8)$$

其中 R_B 为点目标和航线的最近距离， X_P 为点目标的横向位置。

我们有关系式 $c t_b = 2R_b$ ， $\cos \theta_m = \sqrt{4K_R'^2 - K_X'^2} / 2K'_R$ ，对式(4)进行参数变化，得

$$H_{\text{DMO}}(K'_X, K'_R) = \exp \left(jK'_R \tan \beta h_x \cos \theta_m \right) = \exp \left(j \frac{h_x}{2} \tan \beta \sqrt{4K_R'^2 - K_X'^2} \right) \quad (9)$$

将式(9)写作为

$$\phi_b(K'_R, K'_X) = R_B \sqrt{4K'^2_R - K'^2_X} + \frac{h_x}{2} \tan \beta \sqrt{4K'^2_R - K'^2_X} + X_P K'_X \quad (10)$$

其中, 第 1 项为等效单基项, 第 2 项为双基附加项, 第 3 项为点目标方位位置项。容易看出, 精确 DMO 方法的频域补偿算子实际上就是 GBF 的双基附加项。因此, 两者是完全等效的。然而 GBF 方法可以推广到平行构型双基 SAR^[9]。

3 任意构型双基 SAR 频谱

3.1 任意构型双基 SAR 信号模型

如图 2 所示, 发射机和接收机分别以恒定的速度 V_T 和 V_R 飞行 ($V_T \neq V_R$), 点目标为 P 。在方位慢时间 $\eta = 0$ 时刻, 发射机和接收机和点目标 P 的瞬时斜距分别记为 R_{T0} 和 R_{R0} , 此时对应的瞬时斜视角分别为 θ_{T0} 和 θ_{R0} 。双基 SAR 的点目标斜距历程 $R(\eta)$ 为

$$\begin{aligned} R(\eta) &= R_T(\eta) + R_R(\eta) \\ &= \sqrt{R_{T0}^2 - 2R_{T0}V_T\eta \sin \theta_{T0} + V_T^2\eta^2} \\ &\quad + \sqrt{R_{R0}^2 - 2R_{R0}V_R\eta \sin \theta_{R0} + V_R^2\eta^2} \end{aligned} \quad (11)$$

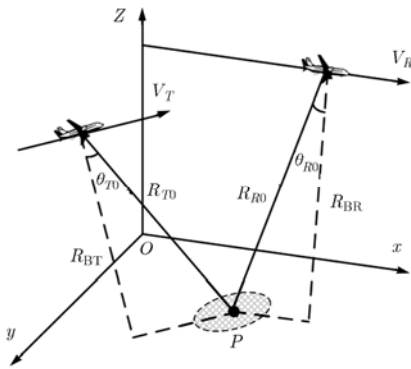


图 2 任意构型双基 SAR 几何关系

基频回波可以表示为

$$\begin{aligned} s(t, \eta) &= p\left(t - \frac{R(\eta)}{c}\right) w_{az}(\eta) \exp\left\{j\pi\gamma\left(t - \frac{R(\eta)}{c}\right)^2\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{R(\eta)}{\lambda}\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

其中 t 为雷达发射脉冲快时间, $p(t)$ 为发射脉冲包络, γ 为发射信号的调频率, λ 为雷达中心频率对应的波长, c 为光速, $w_{az}(\eta)$ 是双基收发天线决定的方向图函数。经过距离压缩处理和距离傅里叶变换后, 式(13)变为

$$s_1(f_r, \eta) = W_r(f_r) w_{az}(\eta) \exp\left\{-j2\pi(f_c + f_r)\frac{R(\eta)}{c}\right\} \quad (13)$$

其中 $W_r(f_r)$ 表示发射脉冲的频谱包络。 f_c 为雷达中心频率, f_r 为距离频率。为了获得双基 SAR 的点目标二维频谱, 如同在单基中, 对式(14)作方位时间傅里叶变换, 有

$$\begin{aligned} s_2(f_r, f_\eta) &= W_r(f_r) \int w_{az}(\eta) \exp\left\{-j2\pi(f_c + f_r)\frac{R(\eta)}{c}\right\} \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi f_\eta \eta) d\eta \end{aligned} \quad (14)$$

其中 f_η 为方位频率。双基 SAR 的瞬时多普勒频率

$$f_\eta = -\frac{f_c + f_r}{c} R'(\eta) = -\frac{f_c + f_r}{c} (R'_T(\eta) + R'_R(\eta)) \quad (15)$$

3.2 LBF 点目标二维频谱

Loffeld 等人通过对收发相位历程分别采用驻定相位原理并使用二阶泰勒展开近似得出了原理上适用于任意构型的双基地 SAR 点目标二维近似频谱。式(14)中傅里叶积分的相位记为 ϕ , 表示成收发两个分量有

$$\phi = \phi_T(\eta) + \phi_R(\eta) \quad (16)$$

其中

$$\phi_{T/R}(\eta) = 2\pi \frac{f_c + f_r}{c} R_{T/R}(\eta) + \pi f_\eta \eta \quad (17)$$

最终得到任意构型双基 SAR 的点目标二维频谱为^[6]

$$s_2(f_r, f_\eta) = W_r(f_r) W_{az}(f_\eta) \exp[-j\psi_m] \exp[-j\psi_b] \quad (18)$$

其中

$$\psi_m(f_r, f_\eta) = \phi_T(\tilde{\eta}_T) + \phi_R(\tilde{\eta}_R) \quad (19)$$

$$\psi_b(f_r, f_\eta) = \frac{1}{2} \frac{\phi''_T(\tilde{\eta}_T) \phi''_R(\tilde{\eta}_R)}{\phi''_T(\tilde{\eta}_T) + \phi''_R(\tilde{\eta}_R)} (\tilde{\eta}_T - \tilde{\eta}_R)^2 \quad (20)$$

$\psi_m(f_r, f_\eta)$ 称为等效单基项, $\psi_b(f_r, f_\eta)$ 称为双基附加项。

3.3 MSR 点目标二维频谱

Neo 等人利用级数反演方法得到了任意构型下双基 SAR 的二维频谱, 其精度仅受斜距历程的展开项数决定, 可以达到极高的精度。双基斜距历程 $R(\eta)$ 展开为幂级数

$$R(\eta) = R_0 + k_1\eta + k_2\eta^2 + k_3\eta^3 + k_4\eta^4 + \dots \quad (21)$$

整理得多普勒频率和方位时间的关系式为

$$-\frac{c}{f_c + f_r} f_\eta - k_1 = 2k_2\eta + 3k_3\eta^2 + 4k_4\eta^3 + \dots \quad (22)$$

由级数反演方法得到双基 SAR 的驻定相位点 $\tilde{\eta}_b$ 为

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}_b &= C_1 \left(\frac{-cf_\eta}{f_c + f_r} - k_1 \right) + C_2 \left(\frac{-cf_\eta}{f_c + f_r} - k_1 \right)^2 \\ &\quad + C_3 \left(\frac{-cf_\eta}{f_c + f_r} - k_1 \right)^3 + \dots \end{aligned} \quad (23)$$

以上, 各个系数 k_i 和 C_i 可由双基系统参数解析表示, 具体见文献[7]。

双基 SAR 的 MSR 二维频谱为^[7]

$$s'_2(f_r, f_\eta) = W_r(f_r) W_{az}(f_\eta) \exp\{-j[\phi_T(\tilde{\eta}_b) + \phi_R(\tilde{\eta}_b)]\} \quad (24)$$

3.4 MSR 和 LBF 的关系

LBF 点目标频谱由于在使用驻相原理前对双基相位历程进行了人为二分之一截断处理, 使得该方法对基线斜距之比较大及较大双基斜视角情况的处理性能下降严重, 甚至无法实现有效聚焦。LBF 的局限本质在于收发各自驻点和双基公共驻点存在一定的偏离误差, 从而使得对于较大斜视双基 SAR 的性能下降。为了分析 LBF 和 MSR 二维频谱的关系, 由 MSR 二维频谱式(24)出发, 分别对 $\phi_T(\tilde{\eta}_b)$ 和 $\phi_R(\tilde{\eta}_b)$ 在发

收各自的 LBF 驻相点 $\tilde{\eta}_T$ 和 $\tilde{\eta}_R$ 附近展开成泰勒级数^[1], 得

$$\begin{aligned} \psi &= \phi_T(\tilde{\eta}_b) + \phi_R(\tilde{\eta}_b) \\ &= \phi_T(\tilde{\eta}_T + \Delta\tilde{\eta}_T) + \phi_R(\tilde{\eta}_R + \Delta\tilde{\eta}_R) \\ &= \phi_T(\tilde{\eta}_T) + \phi_R(\tilde{\eta}_R) + \frac{1}{2}[\phi_T''(\tilde{\eta}_T)\Delta\tilde{\eta}_T^2 + \phi_R''(\tilde{\eta}_R)\Delta\tilde{\eta}_R^2] + \dots \quad (25) \end{aligned}$$

其中 $\Delta\tilde{\eta}_T = \tilde{\eta}_b - \tilde{\eta}_T$, $\Delta\tilde{\eta}_R = \tilde{\eta}_b - \tilde{\eta}_R$ 。由此得到另一种双基 SAR 点目标二维频谱

$$s_2(f_r, f_\eta) = W_r(f_r)W_{az}(f_\eta)\exp\{-j\psi\} \quad (26)$$

对比式(25)和式(18)两个频谱表达式不难发现, 两者具有相同的等效单基相位 $\psi_m(f_r, f_\eta) = \phi_T(\tilde{\eta}_T) + \phi_R(\tilde{\eta}_R)$ 。但两者的二阶相位不同, 现在对两者进行适当分析。

取两者的二阶相位表达式进行分析。利用代数方法有

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2}[\phi_T''(\tilde{\eta}_T)(\tilde{\eta}_b - \tilde{\eta}_T)^2 + \phi_R''(\tilde{\eta}_R)(\tilde{\eta}_b - \tilde{\eta}_R)^2] \\ &= \frac{1}{2}\left\{[\phi_T''(\tilde{\eta}_b - \tilde{\eta}_T) + \phi_R''(\tilde{\eta}_b - \tilde{\eta}_R)]^2 + \left[\frac{\phi_T''\phi_R''}{\phi_T'' + \phi_R''}(\tilde{\eta}_T - \tilde{\eta}_R)^2\right]\right\} \\ &= \frac{1}{2}\left\{(\phi_T'' + \phi_R'')\left[\tilde{\eta}_b - \frac{\phi_T''\tilde{\eta}_T + \phi_R''\tilde{\eta}_R}{\phi_T'' + \phi_R''}\right]^2 + \left[\frac{\phi_T''\phi_R''}{\phi_T'' + \phi_R''}(\tilde{\eta}_T - \tilde{\eta}_R)^2\right]\right\} \quad (27) \end{aligned}$$

假设有 $\tilde{\eta}_b = \frac{\phi_T''\tilde{\eta}_T + \phi_R''\tilde{\eta}_R}{\phi_T'' + \phi_R''}$ 成立, 则式(28)等于 $\frac{1}{2}\frac{\phi_T''\phi_R''}{\phi_T'' + \phi_R''}(\tilde{\eta}_T - \tilde{\eta}_R)^2$, 恰好就是 LBF 频谱的双基附加项, 此时, 式(27)与 LBF 方法相同。

注意到上述推导成立的前提是 $\tilde{\eta}_b = \frac{\phi_T''\tilde{\eta}_T + \phi_R''\tilde{\eta}_R}{\phi_T'' + \phi_R''}$, 而

等式右边即为 LBF 的公共驻定相位点 $\tilde{\eta}_{LBF}$ 。因此, 如果假设 LBF 的公共驻点 $\tilde{\eta}_{LBF}$ 等于 MSR 方法的双基驻点, 则新方法退化成为了 LBF 方法, 但由于 LBF 方法在求取 $\tilde{\eta}_{LBF}$ 驻点时对双基相位历程人为地进行了平均截断处理, 引入了误差, 本质上不等于精确驻点, 且在部分双基构型下误差较大。而 MSR 驻点 $\tilde{\eta}_b$ 在理论上可以达到无限精度, 因此, 式(25)是 LBF 方法的更普遍和更精确的表达形式。

4 点目标仿真

本文分别给出在同航线等速构型下的 4 种方法点目标成像仿真和任意构型下的 LBF 方法, 式(25)所表示的二阶频谱和 MSR 方法的成像结果。仿真参数如表 1 所示。括号中的参数为任意构型下的系统参数。同航线等速构型的双基斜视角为 8.2° , 任意构型下双基斜视角为 20.3° 。

同航线等速构型的 DMO, GBF, LBF 和 MSR 方法的点目标仿真等高线图如图 3 所示。

方位聚焦性能参数, 即峰值旁瓣比(PSLR), 积分旁瓣比(ISLR)和脉冲宽度(IRW), 如表 2 所示。

可见, 在一定的双基斜视角下(8.2°), LBF 方法的聚焦性能有所下降, 这是由于在此构型下的式(17)偏离真实值, 但其在双基正侧视下精度很高。MSR 方法对双基斜距历程

表 1 点目标仿真参数

仿真参数	发射机	接收机
载机速度	100m/s	100(120)m/s
载机高度	2000(2500)m	2000m
航线夹角		$0^\circ(10^\circ)$
中心频率		10GHz
脉冲宽度		2 μ s
信号带宽		150 MHz
方位孔径		2m
零时刻基线		2000m
最近距离	5000m	4000m
零时刻斜视角	$11.329^\circ(9.1^\circ)$	$-3.132^\circ(11.2^\circ)$

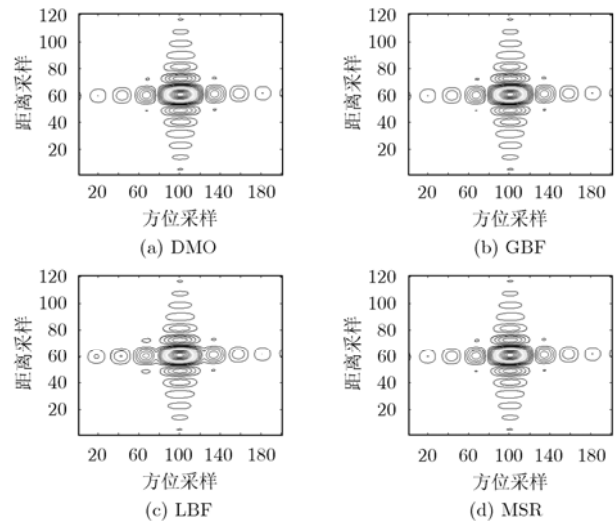


图 3 同航线等速构型点目标仿真成像结果

表 2 同航线仿真聚焦性能

	DMO	GBF	LBF	MSR
PSLR(dB)	-13.2970	-13.2906	-12.1834	-13.2259
ISLR(dB)	-10.1925	-10.1919	-9.5445	-10.1804
IRW(m)	1.052	1.059	1.154	1.087

进行了泰勒展开, 保留到四阶项后的聚焦性能接近理论值。而因为 DMO 和 GBF 的点目标匹配函数是完全精确的, 因此可以实现理想聚焦。

任意构型下双基 SAR 使用 LBF, 式(25)二阶频谱和 MSR 成像结果如图 4 所示。方位聚焦性能参数如表 3 所示。

在双基存在一定速度差异且斜视角较大的情况下(20.3°), LBF 方法的聚焦性能下降较大。而由于此时仅使用了斜距的四阶项, MSR 聚焦的性能也有所下降, 当然可以使用更高阶达到很高的精度。而式(25)所给出的二阶谱的聚焦性能优于 LBF, 但仍差于 MSR 方法。

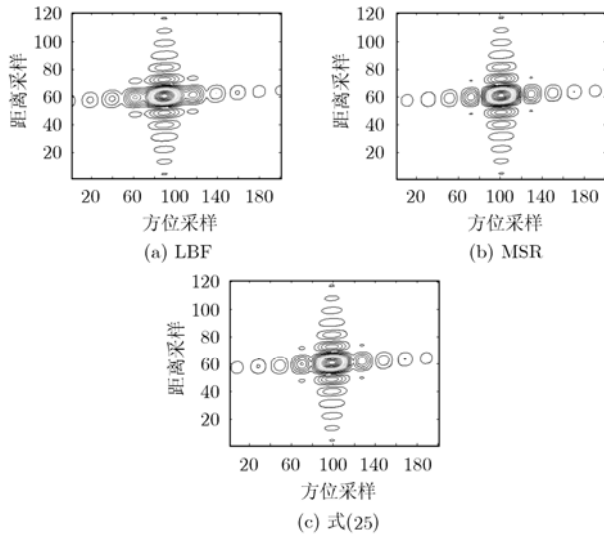


图4 任意构型双基 SAR 点目标仿真成像结果

表3 任意构型仿真聚焦性能

	LBF	MSR	式(25)
PSLR(dB)	-8.4421	-13.0551	-9.0012
ISLR(dB)	-7.1512	-10.0024	-8.1454
IRW(m)	1.710	1.1921	1.443

5 结束语

本文分析了同航线等速情况下 DMO 和 GBF 等效性, 并指出基于同轨双基角分线的等效单基的径向波数必须乘以因子 $\cos \beta$ 才能实现多普勒意义上的等效变换。原始 DMO 方法忽略由于 Smile 操作引入的等效单基时间伸展效应即是忽略了此径向波数因子, 这在较大基线斜距比的构型下误差较大。本文也分析了在任意构型下 MSR 和 LBF 的关系。通过不同双基构型下的点目标成像仿真结果给出各种方法的聚焦性能, 结果表明 DMO 和 GBF 方法在同轨构型下是完全精确的点目标参考频谱, 而 LBF 和 MSR 的性能有所下降, 尤其是 LBF 对于较大斜视情况性能较差; 对于任意构型双基 SAR, MSR 方法优于 LBF 方法, 分析结果对于双基 SAR 成像算法研究具有参考意义。

致谢 感谢 Dr. Stefan Knedlik 的帮助。感谢 Dr. Neo Yewlam 在 ZESS 期间对于本文的有益帮助。

参考文献

[1] Krieger G and Moreira A. Spaceborne bi- and multistatic SAR: potential and challenges. *IEE Proc.-Radar Sonar*

Navig., 2006, 153(6): 184-198.

[2] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506-520.

[3] Aria D D, Guarnieri A M, and Rocca F. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1362-1376.

[4] Notfors C D and Godfrey R J. Dip move out in the frequency-wavenumber domain. *Geophysics*, 1987, 52(6): 1718-1721.

[5] Hale D. Dip-move out by Fourier transform. *Geophysics*, 1984, 49(5): 741-757.

[6] Loffeld O, Nies H, and Peters V, et al. Models and useful relations for bistatic SAR. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2031-2038.

[7] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion. *IEEE Geosci. Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 93-96.

[8] 张振华, 保铮, 邢孟道, 井伟. 同航线双基合成孔径雷达成像的频域分析. *自然科学进展*, 2007, 17(6): 809-816.

Zhang Z H, Bao Z, and Xing M D, et al. Frequency domain analysis of tandem bistatic SAR imaging. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(6): 809-816.

[9] Zhang Zhenhua, Xing Mengdao, and Ding Jinshan, et al. Focusing parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in wavenumber domain. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3633-3645.

[10] Bamler R, Meyer F, and Liebhart W. Processing of bistatic SAR data from quasi-stationary configurations. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3350-3358.

[11] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I. A review of point target spectra for bistatic SAR processing. Proc. European Conference on SAR, EUSAR08, Friedrichshafen, Germany, June, 2008: 233-237.

丁金闪: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为双基SAR成像及干涉处理方法。

Otmar Loffeld: 男, 博士, 教授, 研究方向为信号估计理论、SAR成像和干涉SAR等。

Holger Nies: 男, 博士, 讲师, 研究方向为双基SAR成像及干涉处理方法。

邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像。

保铮: 男, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为雷达成像、动目标检测、雷达目标识别等。