

异构平台双基 SAR 成像的 RD 算法

丁金闪^{1,2}, Otmar Loffeld², Holger Nies², 保 铮¹, 邢孟道¹

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071;
2. 锡根大学传感系统研究所, 德国锡根 57076)

摘 要: LBF 是第一个原理上适用于任意构型双基 SAR 的点目标二维解析频谱. 传统的 LBF 对于速度差异较大的异种平台构型双基 SAR 的精度低, 无法实现有效聚焦成像处理. 本文给出了一种基于加权 LBF 的双基 SAR 的 RD 算法. 仿真成像结果验证了所提方法的有效性.

关键词: 双基 SAR; 加权 LBF; 异构双基; RD 算法

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 06-1170-05

Focusing Bistatic SAR Data from Heterogeneous Platforms Using the Range Doppler Algorithm

DING Jin-shan^{1,2}, Otmar Loffeld², Holger Nies², BAO Zheng¹, XING Meng-dao¹

(1. Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;
2. Center for Sensorsystems (ZESS), University of Siegen, Siegen 57076, Germany)

Abstract: The Loffeld's Bistatic Formula (LBF) is the first solution for general bistatic SAR point target reference spectrum. Unfortunately, the original LBF shows limitation when applied to the bistatic system which consists of different type of platforms. By using a Doppler contribution weight in the phase history division, the weighted LBF can be used to focus the bistatic SAR data collected by heterogeneous platforms. A WLBF-based range Doppler algorithm is presented to focus the whole SAR scene.

Key words: bistatic SAR; weighted LBF; heterogeneous platform; RD algorithm

1 引言

相对单基地 SAR 系统, 双多基地 SAR 可以获得更丰富的目标信息, 电磁隐蔽性好, 抗干扰和抗截获性能更好, 从而得到了广泛关注^[1]. 双基 SAR 的点目标相位历程存在双根号形式, 直接利用驻定相位原理难以得到频域处理所需要的点目标二维频域解析参考频谱. 因此, 点目标二维频谱计算一度是双基 SAR 成像研究的重点^[2,3].

Loffeld 等人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任意构型下的双基 SAR 点目标二维近似频谱 (LBF)^[2], LBF 方法是第一个提出的原理上适用于任意构型双基 SAR 的点目标二维解析频谱. 基于 LBF 的成像算法可有效处理一般构型的双基 SAR 数据^[4,5]. 但是, 由于在使用驻相原理前对双基相位历程进行了人为截断处理, 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

有所下降, 极端情况下甚至无法实现有效聚焦. 考虑到双基 SAR 电磁特征隐蔽性好的优点, 由不同飞行平台构成的双基 SAR 系统得到了研究的重视, 如装载有大功率雷达发射机的飞机和战场侦察无人机构型的双基系统, 以及近期得到广泛关注的星机空天联合双基 SAR 系统^[6]. 异种平台构型的双基 SAR 系统的共同特点是平台的飞行速度差异较大甚至很大, 给双基 SAR 成像算法的设计带来一定的难度, 原始 LBF 方法对此类双基 SAR 不再适用. 设计有效的双基 SAR 成像算法的基础是点目标二维频域表达式的精确度. 本文给出了基于双基相位加权截断处理的加权 LBF (WLBF) 二维频谱. 基于 WLBF, 本文给出了一种适用于任意构型双基 SAR 的 R-D 成像算法.

2 双基 SAR 信号模型

如图 1 所示, 发射机 T 和接收机 R 分别以恒定的速度 V_T 和 V_R 作直线飞行 (V_T V_R), 发射机和接收机天

线波束照射的公共区域为成像区域,点目标为 P . X 坐标轴和接收机的飞行速度矢量方向相同. 发射机和接收机的最近距离分别表示为 R_{BT} 和 R_{BR} . 发射和接收波束中心对应的点目标斜距分别为 R_{T0} 和 R_{R0} . 波束中心线经过点目标时的瞬时斜视角分别为 θ_{T0} 和 θ_{R0} . 双基 SAR 点目标斜距历程 $R(\cdot)$ 为

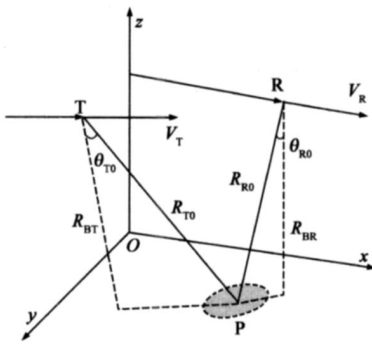


图1 任意构型双基SAR几何模型

$$R(\cdot) = R_T(\cdot) + R_R(\cdot) \quad (1)$$

其中, $R_T(\cdot) = \sqrt{R_{BT}^2 + (V_T \cdot t - V_{T0})^2}$, $R_R(\cdot) = \sqrt{R_{BR}^2 + (V_R \cdot t - V_{R0})^2}$. 我们以零多普勒时刻为方位慢时间参考点, 则发射波束中心线经过点目标的慢时间分别记为 $t_{T0} = R_{BT} \tan \theta_{T0} / V_T$ 和 $t_{R0} = R_{BR} \tan \theta_{R0} / V_R$.

设雷达发射线性调频信号, 则变换到基频后, 点目标回波信号可以表示为

$$s(t, \cdot) = p(t - \frac{R(\cdot)}{c}) w_{az}(\cdot) \exp(j 2\pi f_c (t - \frac{R(\cdot)}{c})) \exp(-j 2\pi \frac{R(\cdot)}{c}) \quad (2)$$

其中, t 为雷达发射脉冲快时间, $p(t)$ 为发射脉冲包络, f_c 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, $w_{az}(\cdot)$ 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立叶变换后, 式(2)变为

$$s(f_r, \cdot) = W_r(f_r) w_{ac}(\cdot) \exp(-j 2\pi (f_c + f_r) \frac{R(\cdot)}{c}) \quad (3)$$

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, 我们对式(3)作方位时间傅立叶变换, 有

$$s(f_r, f) = W_r(f_r) w_{ac}(\cdot) \exp(-j 2\pi (f_c + f_r) \frac{R(\cdot)}{c}) \exp(-j 2\pi f \cdot d) \quad (4)$$

其中, f 为方位多普勒频率.

3 加权 LBF

3.1 加权 LBF

原始 LBF 方法对于式(4)的傅立叶积分相位进行了平均截断处理是其频谱精度有限的主要原因之一. 由于 SAR 实现方位高分辨的本质在于回波信号在方位维有一定的多普勒带宽, 在双基 SAR 中该多普勒调制由发射机和接收机的运动共同产生. 我们对式(4)中的积分相位进行加权处理, 权值分别由双基系统中发射

机运动导致的多普勒和接收机运动导致的多普勒贡献决定^[7,8]. 将归一化权值 W 写成矢量的形式为

$$W = \begin{bmatrix} W_T \\ W_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T}{T+R} \\ \frac{R}{T+R} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, T 和 R 分别为对应于发射和接收的多普勒调频率. 我们有 $T = -V_T^2 \cos^2 \theta_{T0} / R_{T0}$, $R = -V_R^2 \cos^2 \theta_{R0} / R_{R0}$. 收发斜视角使用场景中心线的值, 即忽略其存在的距离维的弱空变性.

式(4)中傅立叶积分的相位记为 ϕ , 表示成收发两个分量有 $\phi = \phi_T(\cdot) + \phi_R(\cdot)$ 其中:

$$\phi_T(\cdot) = 2\pi (f_c + f_r) R_T(\cdot) / c + W_T 2\pi f \quad (7a)$$

$$\phi_R(\cdot) = 2\pi (f_c + f_r) R_R(\cdot) / c + W_R 2\pi f \quad (7b)$$

将收发相位历程 $\phi_T(\cdot)$ 和 $\phi_R(\cdot)$ 在各自的驻相点 \tilde{t}_R 和 \tilde{t}_T 处进行二阶泰勒展开可得

$$\phi_T = \phi_T(\tilde{t}_T) + \dot{\phi}_T(\tilde{t}_T)(t - \tilde{t}_T) + \frac{1}{2} \ddot{\phi}_T(\tilde{t}_T)(t - \tilde{t}_T)^2 \quad (8a)$$

$$\phi_R = \phi_R(\tilde{t}_R) + \dot{\phi}_R(\tilde{t}_R)(t - \tilde{t}_R) + \frac{1}{2} \ddot{\phi}_R(\tilde{t}_R)(t - \tilde{t}_R)^2 \quad (8b)$$

由于 $\dot{\phi}_T(\tilde{t}_T) = 0$, $\dot{\phi}_R(\tilde{t}_R) = 0$, 则

$$\phi = \phi_R(\tilde{t}_R) + \frac{1}{2} \ddot{\phi}_R(\tilde{t}_R)(t - \tilde{t}_R)^2 + \phi_T(\tilde{t}_T) + \frac{1}{2} \ddot{\phi}_T(\tilde{t}_T)(t - \tilde{t}_T)^2 \quad (9)$$

再次使用驻相原理, 可求得双基的 LBF 驻相点 \tilde{t} 为

$$\tilde{t} = \frac{\ddot{\phi}_T(\tilde{t}_T) \tilde{t}_T + \ddot{\phi}_R(\tilde{t}_R) \tilde{t}_R}{\ddot{\phi}_T(\tilde{t}_T) + \ddot{\phi}_R(\tilde{t}_R)} \quad (10)$$

任意构型双基 SAR 的点目标二维频谱可以表示为

$$s(f_r, f) = W_r(f_r) W_{ac}(f) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\ddot{\phi}_T(\tilde{t}_T) + \ddot{\phi}_R(\tilde{t}_R)}} e^{-j\pi} \exp\left\{-j\left[\phi_R(\tilde{t}_R) + \phi_T(\tilde{t}_T)\right]\right\} \exp\left\{-j\frac{1}{2} \frac{\ddot{\phi}_T(\tilde{t}_T) \ddot{\phi}_R(\tilde{t}_R)}{\ddot{\phi}_T(\tilde{t}_T) + \ddot{\phi}_R(\tilde{t}_R)} (\tilde{t}_T - \tilde{t}_R)^2\right\} \quad (11)$$

为了得到解析的频谱式(11), 我们必须求得各个参数的解析式. 沿用文献[2]中的表示方法, 使用接收方参数为基准, 定义两个变量为

$$a_0 = t_0 - t_{R0} \quad (12)$$

$$a_2 = \frac{R_{BT}}{R_{BR}} \quad (13)$$

分别称为零多普勒时间偏移量和最近距离比. 为表示简洁, 我们定义两个符号

$$F_R(f_r, f) = (f_r + f_c)^2 - \frac{W_R^2 f^2 c^2}{V_R^2}$$

$$F_T(f_r, f) = (f_r + f_c)^2 - \frac{W_T^2 f^2 c^2}{V_T^2} \quad (14)$$

经过较复杂的参数计算^[2], 最终 WLBF 的点目标二维解析频谱为

$$s(f_r, f) = W_r(f_r) W_\alpha(f) \frac{\sqrt{2} e^{-j\pi}}{\sqrt{\ddot{T}(\tilde{T}) + \ddot{R}(\tilde{R})}} \exp\{-j\pi m\} \exp\{-j\pi b\} \quad (15)$$

其中, 等效单基项 m 和双基附加项 b 分别为

$$m = \ddot{T}(\tilde{T}) + \ddot{R}(\tilde{R}) = 2f [W_R R_0 + W_T(R_0 + a_0)] + \frac{2R_{BB}}{c} [F_R^{\frac{1}{2}} + F_T^{\frac{1}{2}} a_2] \quad (16)$$

$$b = \frac{V_T^2 V_R^2}{R_{BB} (f_c + f_r)^2 c} \cdot \frac{F_R^{\frac{3}{2}} F_T^{\frac{3}{2}}}{F_R^{\frac{3}{2}} V_R^2 a_2 + V_T^2 F_T^{\frac{3}{2}}} \cdot \left\{ a_0 - \frac{f_c \cdot R_{BB}}{V_T^2 V_R^2} \left[\frac{W_T V_R^2 F_R^{\frac{1}{2}}(f_r, f) a_2 - W_R V_T^2 F_T^{\frac{1}{2}}(f_r, f)}{F_T^{\frac{1}{2}}(f_r, f) F_R^{\frac{1}{2}}(f_r, f)} \right] \right\}^2 \quad (17)$$

3.2 WLBF 的精度

点目标二维频谱精确度是双基 SAR 频域成像的基础. 通过单点目标聚焦仿真结果验证原始 LBF 和加权 LBF 的精度. 基于后置发射机和前方战场无人机构型双

基 SAR 系统的仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

参数	发射机	接收机
飞行速度	100m/s	50 m/s
高度	4 km	2 km
中心频率	10GHz	
带宽	50MHz	
脉冲宽度	1μs	
速度矢量夹角	5°	
发射机最近距离	8.94km	
最近距离比 a_2	2.48	
零多普勒时刻差 a_0	28s	
双基等效斜视角	10°	
基线 (接收机最近距离时刻)	3km	
天线方位孔径	3m	0.5m

分别使用原始 LBF 和本文提出的加权 LBF 进行二维不加窗的匹配滤波成像, 结果如图 2 所示.

点目标聚焦结果证明, WLBF 的精度远高于原始 LBF. 方位剖面图给出了聚焦性能参数. 仿真中的权值 $W = [W_T, W_R] = [0.6967, 0.3033]$. 实际上, 若平台特性(如运动速度)差异加大, 如空天联合双基 SAR 构型, 则原始 LBF 方法的性能急剧下降, 而 WLBF 性能稳健. 此时收发权值间的差异也显著加大. 对于较大斜视的情况还要考虑其收发多普勒中心的差别对于加权方法的影响. 原始 LBF 是 WLBF 的简化形式, 仅适用于同构双基 SAR 系统.

4 基于 WLBF 的 RD 算法

简单地使用二维频谱进行频域匹配滤波无法处理场景内目标的空变特性, 必须寻求有效成像算法, 如单基 SAR 处理中得到广泛应用的 R-D 算法^[8]. 任意构型双基 SAR 处理的主要难点在于其方位空变特性, 具体体现于点目标二维频谱式(15)中参数 a_0 和 a_2 的方位空变, 其中 a_0 是平台速度差异的度量, a_2 是收发航线平行程度的度量, 并且两者存在一定程度的耦合. 为了推导频域快速成像算法, 必须对部分参数进行合理近似. 一般认为, 任意构型双基 SAR 适合于进行小区域侦测成像, 大区域连续观测应该考虑同航线或者平行航线的双基构型. 文献[4]给出了基于 LBF 的逆变标 FFT 算法.

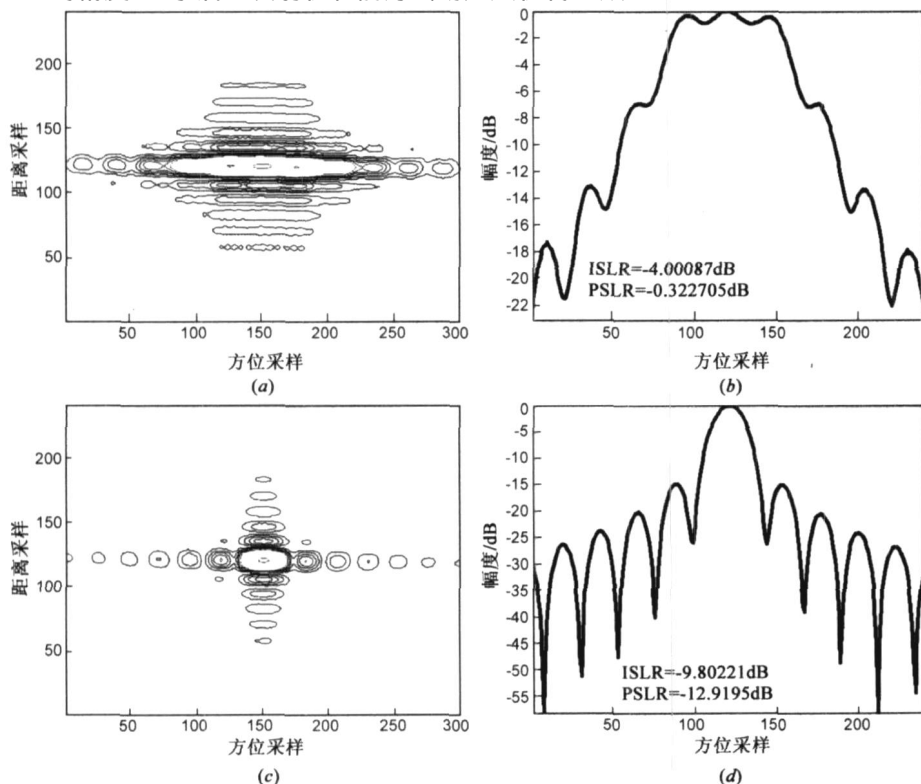


图2 点目标成像 (a)、(b)为原始LBF方法成像结果; (c)、(d)为加权LBF方法成像结果

基于 WLBFB, 给出一种简易的距离多普勒成像算法.

注意到 WLBFB 由等效单基项 m 和双基附加项 b 组成, 基于这种构成可以先对分块数据进行双基附加项的补偿, 再进行剩余的聚焦处理. 双基项补偿时对每个数据块近似使用相同的参数, 而分块数需要根据成像参数选择, 这样可以达到良好的效果^[4]. 权值的弱空变性补偿可以在双基项补偿的距离分块中使用各个子块对应的中心线的权值, 但是事实上其影响很小. 双基附加项二维频域补偿相位函数为

$$H_1 = - \quad b \Big|_{a_0, \text{ref}; a_2, \text{ref}} \quad (18)$$

经过距离压缩和双基相位补偿且忽略幅度因子后, 回波可表示为

$$s_1(f_r, f) = \exp\left\{-j2 f (W_R \quad R_0 + W_T \quad T_0)\right\} \exp\left\{-j \frac{2 R_{BR}}{c} F_R^{\frac{1}{2}}\right\} \exp\left\{-j \frac{2 R_{BT}}{c} F_T^{\frac{1}{2}}\right\} \quad (19)$$

对双基的收发参数进行双线性回归拟合, 即

$$\begin{aligned} T_0 &= c_{11} + c_{12} R_{BR} + c_{13} \quad R_0 \\ R_{BT} &= c_{21} + c_{22} R_{BR} + c_{23} \quad R_0 \end{aligned} \quad (20)$$

上式中的拟和系数 c_{ij} 可由成像几何关系计算得到^[4]. 将式(20)代入到式(19), 整理得

$$s_2(f_r, f) = \exp\left\{-j2 \quad R_0 [(W_R + W_T c_{13}) f + \frac{c_{23}}{c} F_T^{\frac{1}{2}}]\right\} \exp\left\{-j2 R_{BR} (W_T c_{12} f + \frac{F_R^{\frac{1}{2}}}{c} + \frac{c_{22}}{c} F_T^{\frac{1}{2}})\right\} \exp\left\{-j2 W_T c_{11} f\right\} \exp\left\{-j \frac{2 c_{21}}{c} F_T^{\frac{1}{2}}\right\} \quad (21)$$

上式中, 最后两个指数项分别为常数方位偏移项和距离无关频域相位项, 因此可以先对这两项进行统一补偿, 即在二维频域分别乘以其共轭. 二维频域补偿函数为

$$H_2 = \exp\left\{j2 W_T c_{11} f\right\} \exp\left\{j \frac{2 c_{21}}{c} F_T^{\frac{1}{2}}\right\} \quad (22)$$

上述处理后的回波为

$$s_3(f_r, f) = \exp\left\{-j2 \quad R_0 [(W_R + W_T c_{13}) f + \frac{c_{23}}{c} F_T^{\frac{1}{2}}]\right\} \exp\left\{-j2 R_{BR} (W_T c_{12} f + \frac{F_R^{\frac{1}{2}}}{c} + \frac{c_{22}}{c} F_T^{\frac{1}{2}})\right\} \quad (23)$$

我们对上式中的两个相位项进行类似于单基成像的近似处理. 对 $F_T^{1/2}$ 和 $F_R^{1/2}$ 进行关于距离频率 f_r 的二阶泰勒近似, 即

$$F_{T,R}^{1/2}(f_r, f; f_r) = f_c \cdot A_{T,R} + f_r \cdot A_{T,R}^{-1} + \frac{f_r^2}{2f_c} (A_{T,R}^{-1} - A_{T,R}^{-3}) \quad (24)$$

其中, $A_{T,R} = \sqrt{1 - \frac{W_{T,R}^2 c^2 f^2}{V_{T,R}^2 f_c^2}}$. 对于一般构型, 二阶近似可满足精度要求, 否则可引入更高阶项.

将式(24)代入式(23)中, 并进行适当整理, 得

$$s_4(f_r, f) = \exp\left\{-j \quad a_z(f)\right\} \exp\left\{-j \quad r_{cm}(f_r, f)\right\} \exp\left\{-j \quad s_{rc}(f_r, f)\right\} \exp\left\{-j \quad a_{zp}\right\} \quad (25)$$

其中, a_z 为方位压缩项, r_{cm} 为距离徙动项, s_{rc} 为二次距离压缩项, a_{zp} 为多普勒线性相位项, 其在方位 IFFT 处理后标志目标的方位位置. 我们有

$$a_z = 2 \left\{ \frac{c_{23} \quad R_0 f_c}{c} A_T + \frac{R_{BR} f_c}{c} (A_R + c_{22} A_T) \right\} \quad (26)$$

$$r_{cm} = 2 \left\{ \frac{R_0 c_{23}}{c} A_T^{-1} + \frac{R_{BR}}{c} (A_R^{-1} + c_{22} A_T^{-1}) \right\} \cdot f_r \quad (27)$$

$$s_{rc} = - \frac{f}{f_c} [(R_0 c_{23} + R_{BR} c_{22}) (A_T^{-1} - A_T^{-3}) + R_{BR} (A_R^{-1} - A_R^{-3})] \cdot f_r^2 \quad (28)$$

$$a_{zp} = 2 \left[R_0 (W_R + W_T c_{13}) + R_{BR} W_T c_{12} \right] \cdot f \quad (29)$$

a_z 表示信号在方位维的调制, 其以多普勒频率 f 为变量, 同时具有距离空变, 所以处理时方位压缩应该在距离多普勒域进行动态聚焦处理. r_{cm} 是距离频率 f_r 的一次线性函数, 代表距离徙动项, 如同单基 SAR, 该徙动项存在距离空变, 我们在距离多普勒域进行插值校正, 这也是称之为 RD 算法的原因. s_{rc} 为距离和方位的耦合项, 且与 f 和 f_r 相关, 其距离的弱空变性一般可以忽略, 我们可以在二维频域进行 SRC 补偿, 同时使用成像场景中心处的最近距离 R_{ref} 近似. 算法流程图如图 3 所示.



图4 仿真数据R-D算法成像结果

5 仿真

仿真参数如表 1 所示. 在场景中设置 3 个点目标, 呈 3 × 1 (距离 × 方位) 排列, 点目标的间隔为 300m. 在此

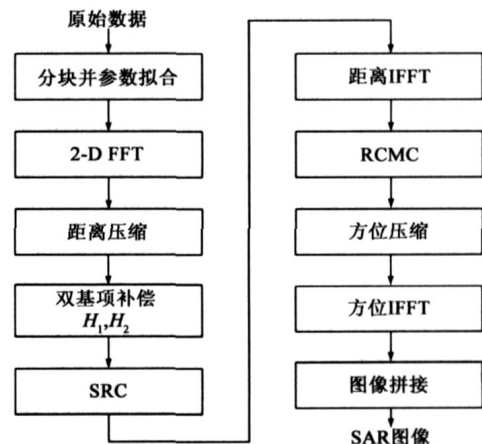


图3 R-D算法流程图

直接使用场景中心参数进行了双基项的近似补偿处理. 经过本文给出的 RD 算法成像处理后, 截取部分如图 4 所示. 在成像处理中二维数据均未加窗.

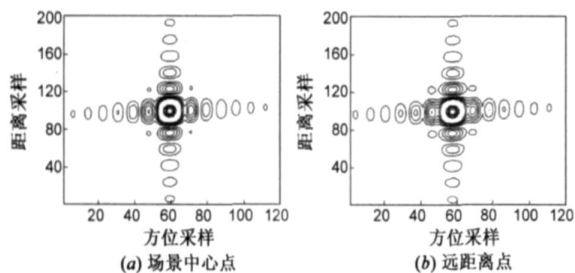


图 5 点目标等高线图

由成像结果可见本文给出的基于 WLBF 的 RD 算法可有效地对异构双基 SAR 进行成像处理. 由于在双基项的补偿中使用了近似补偿处理, 并且在 RD 算法中对于场景内参数的空变性进行了一定程度的近似, 不可避免会使得边缘处点目标的聚焦性能有所下降. 下面给出场景中心点和远离场景中心点的等高线图, 如图 5 所示. 对于较小的场景, 近似用场景中心线的双基项补偿也能得到较好的聚焦性能. 但对于高分辨宽幅成像, 须分块处理.

场景内点目标成像的方位维脉冲响应性能如表 2 所示. 理论方位分辨率为 1.5m.

表 2 点目标方位维脉冲响应性能

	场景中心点	远距点	近距离点
PSLR (dB)	- 13.0221	- 12.1455	- 11.8005
ISLR (dB)	- 9.2511	- 8.5012	- 8.0275
IRW (m)	1.56	1.64	1.69

6 结论

由不同飞行平台构成的异构双基 SAR 系统具有广阔的应用前景. 传统的 LBF 不再适用于速度差异较大的异构型双基 SAR. 加权 LBF 方法提高了点目标二维频谱的精度. 基于加权 LBF 的简易 RD 算法可用于较小场景的异构型双基 SAR 的成像处理.

致谢: 感谢课题组王宇, Amaya Ortiz 和戴震的有益讨论.

参考文献:

- [1] G Krieger, A Moreira. Spaceborne bi- and multistatic SAR: potential and challenges [J]. IEE Proc on Radar Sonar Navig, 2006, 153(3): 184 - 198.
- [2] Otmar Loffeld, Holger Nies, et al. Models and useful relations for bistatic SAR [J]. IEEE Trans on Geosci Remote Sensing, 2004, 42(10): 2031 - 2038.
- [3] Y L Neo, F H Wong, et al. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion [J]. IEEE Trans on Geosci Remote Sensing Lett, 2007, 4(1): 93 - 96.

- [4] Koba Natroshvili, Otmar Loffeld, et al. Focusing of general bistatic SAR configuration data with 2-D inverse scaled FFT [J]. IEEE Trans on Geosci Remote Sensing, 2006, 44(10): 2718 - 2727.
- [5] Holger Nies, Otmar Loffeld, et al. Analysis and focusing of bistatic airborne SAR data [J]. IEEE Trans on Geosci Remote Sensing, 2007, 45(11): 3324 - 3349.
- [6] Ingo Walterscheid, J Klare, A Brenner, et al. Challenges of a bistatic spaceborne/airborne SAR experiment [A]. Proceedings of EUSAR2006 [C]. Dresden, Germany: VDE, 2006. 102 - 105.
- [7] R Wang, Otmar Loffeld, et al. Analysis and extension of loffeld's bistatic formula for the spaceborne airborne configuration [A]. Proceedings of EUSAR2008 [C]. Friedrichshafen, Germany: VDE, 2008. 221 - 224.
- [8] Jinshan Ding, Otmar Loffeld, et al. Weighted LBF for spaceborne general bistatic SAR processing [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(10): 1271 - 1277.
- [9] I G Cumming, F H Wong. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. Norwood, MA: Artech House, 2005.

作者简介:



丁金闪 男, 1980 年 1 月生于江苏. 2002 年 7 月在大连理工大学电子与信息工程学院获工学学士学位, 2004 年起为西安电子科技大学信号与信息处理专业硕博连读研究生. 2007 年 10 月至 2008 年 10 月由国家留学基金委联合培养博士生项目资助在德国学习. 感兴趣的研究方向为双基 SAR 及星载 SAR 成像.
Email: ding @ipp. zess. uni-siegen. de



Otmar Loffeld 男, 博士, 教授. 1982 年在亚琛工业大学电子工程系获硕士学位, 1986 年在锡根大学电子工程系获工学博士学位, 并于 1991 年晋升为终身教授. 研究领域为信号估计, SAR 成像及干涉 SAR 技术.



保 铮 男, 1927 年 12 月生于江苏. 现为西安电子科技大学教授, 中国科学院院士. 研究领域为雷达信号处理.