

机载双站聚束 SAR 改进 ω K 算法

黄丽佳^{*①②} 仇晓兰^{①②} 胡东辉^{①②} 时信华^③ 丁赤飏^{①②}

^①(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^③(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

摘要: 双站 SAR 能够获取目标不同方向的雷达散射系数, 有助于图像分类和识别。双站聚束 SAR 分辨率高, 目标识别能力更强。针对机载双站聚束 SAR 长合成孔径时间特点, 该文引入改进双曲等效方法, 修正了双曲等效距离模型的三次项精度; 推导了 2 维波数域信号表达式, 给出波数域图像重建方法; 建立了距离-方位波数域的距离空变补偿项, 提高了 ω K 算法的距离空变处理能力。计算机仿真结果验证了机载双站聚束 SAR 改进 ω K 算法的精确性和有效性。

关键词: 双站 SAR; 聚束模式; 改进双曲等效; ω K 算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)09-2154-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01111

A Modified ω K Algorithm for Air-borne Spotlight Bistatic SAR

Huang Li-jia^{①②} Qiu Xiao-lan^{①②} Hu Dong-hui^{①②} Shi Xin-hua^③ Ding Chi-biao^{①②}

^①(Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The Bistatic SAR (BiSAR) acquires the radar cross section of target area from different directions, which is helpful for SAR image classification and target recognition. The spotlight mode has higher resolution and thus has advantages in target recognition. This paper introduces an advanced hyperbolic approximation method to fit accurately the cubic term of range history. Besides, the wavenumber domain signal is derived and the image formation process is given. Then, the residual phase term induced by range variance property is shown, and the compensation step is accommodated in the modified ω K algorithm, which enhance the imaging performance at the edges of scene. The simulation results verify the accuracy and validity of the proposed method.

Key words: Bistatic SAR; Spotlight mode; Advanced hyperbolic approximation; ω K algorithm

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种全天时、全天候主动式微波成像雷达, 能够获取反映地物目标雷达后向散射系数的 2 维高分辨率图像, 在国民经济和国防建设中发挥着重要作用。双站 SAR 发射机和接收机分置于不同平台, 具有很多独特的优势: 隐蔽性好, 具有抗侦察能力; 地物分类和目标识别能力突出^[1]; 具有 3 维分辨能力^[2]。双站聚束 SAR 分辨率更高, 目标识别能力也更强。

相比于单站体制, 双站 SAR 成像难度更大。单

站距离历程可表示为单根式双曲线, 回波具有解析 2 维频域表达式, 已发展出一批高效的单站算法^[3]。双站距离历程表现为双根式平顶双曲线^[4,5], 难以得到解析 2 维频域表达式, 不能直接沿用单站算法。利用预处理方法, 可建立与单站算法类似的双站算法^[6,7]。文献[4]利用距离空变短时滤波器将双站回波转化为单站回波, 进而利用单站算法进行成像, 文献[8,9]改用 2 维频域相位相乘实现单站转化, 这类方法只适用于顺飞模式。基线中点单站等效方法^[10]通过补偿固定采样延迟, 采用基线中点距离历程代替双站距离历程, 发展了适用于中/短基线的双站算法。双曲等效方法^[11,12]通过计算等效的斜距、速度和斜视角, 构建双根式距离历程的单根式近似表达式, 该方法只提供 3 个可调参数, 其误差主要为三

2012-08-31 收到, 2013-05-21 改回

国家自然科学基金(60972149, 61101200)资助课题

*通信作者: 黄丽佳 iccasShuanglijia@163.com

次项。随着机载双站聚束 SAR 合成孔径时间的增加，双曲等效误差呈三次方快速增长，基于双曲等效的成像算法性能迅速恶化。

本文引入改进双曲等效方法^[13]，修正了双曲等效方法的三次项误差。基于改进双曲等效距离历程(简称 AHRE)，推导出机载双站聚束 SAR 的 2 维波数域回波表达式，据此构建了波数域图像重建方法。在距离-方位波数域建立了距离空变补偿项，提出机载双站聚束 SAR 改进 ω K 算法，增强了其距离空变处理能力。计算机仿真结果验证了算法的精确性和有效性。

2 改进双曲等效方法

图 1 为平飞模式机载双站聚束 SAR 成像几何。以场景中心点 O 为原点建立坐标系， y 轴为平台运动方向， z 轴垂直场景平面。发射机和接收机速度矢量为 $(0, V, 0)$ 。方位零时刻， $\eta = 0$ ，发射和接收天线相位中心位于 (x_T, y_T, z_T) 和 (x_R, y_R, z_R) ，与点 $P(x, y)$ 相距 R_{Tc} 和 R_{Rc} ，斜视角为 θ_T 和 θ_R 。设双站 SAR 合成波束照射时间为 T ，则点 P 距离历程为

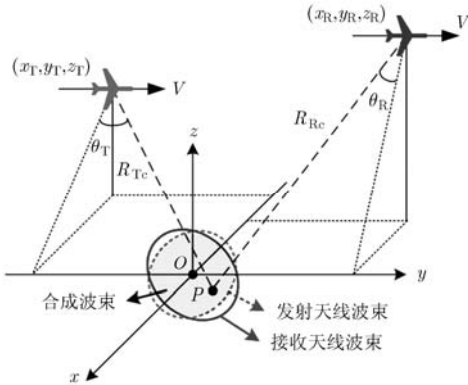


图 1 平飞模式下机载双站聚束 SAR 成像几何

$$R_{bi}(\eta) = \sqrt{R_{Tc}^2 + V^2\eta^2 - 2R_{Tc} \sin\theta_T V\eta} + \sqrt{R_{Rc}^2 + V^2\eta^2 - 2R_{Rc} \sin\theta_R V\eta} \quad (1)$$

建立双站距离历程的双曲等效表达式：

$$R_{bi}(\eta) \approx 2\sqrt{R_{mc}^2 + V_m^2\eta^2 - 2R_{mc} \sin\theta_m V_m\eta} \quad (2)$$

双曲等效方法提供 3 个可调参数，计算公式为

$$\left. \begin{aligned} R_{mc} &= (R_{Tc} + R_{Rc})/2 \\ V_m &= \sqrt{V_{\parallel m}^2 + V_{\perp m}^2} \\ \theta_m &= \tan^{-1}(V_{\parallel m}/V_{\perp m}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 $V_{\perp m} = \sqrt{a_m R_{mc}}$ ， $a_m = (a_T + a_R)/2$ ， $V_{\parallel m} = (V_{\parallel T} + V_{\parallel R})/2$ 。 V_{\parallel} 为斜距方向的速度投影大小， $V_{\parallel T} = V \sin\theta_T$ ， $V_{\parallel R} = V \sin\theta_R$ 。 a 为斜距方向的向心加速度， $a_T = V^2 \cos^2\theta_T/R_{Tc}$ ， $a_R = V^2 \cos^2\theta_R/R_{Rc}$ 。双曲

等效误差主要为三次项：

$$R_{err}(\eta) = \frac{V^3 (R_{Tc} \sin\theta_T - R_{Rc} \sin\theta_R)}{2(R_{Tc} + R_{Rc})} \times \left(\frac{\cos^2\theta_T}{R_{Tc}^2} - \frac{\cos^2\theta_R}{R_{Rc}^2} \right) \eta^3 \quad (4)$$

只有在顺飞模式中，当 $|\theta_T + \theta_R| = \pi/2$ 或 $|\theta_T| = |\theta_R|$ 时，三次项误差等于零。在一般的平飞模式中，双曲等效误差随合成孔径时间的增加呈三次方增长。

引入改进双曲等效距离历程(简称 AHRE)进一步消除三次项误差^[13]：

$$R_{bi}(\eta) \approx 2\left(\sqrt{R_{mc}^2 + V_m^2\eta^2 - 2R_{mc} \sin\theta_m V_m\eta} + l_m\eta\right) \quad (5)$$

改进双曲等效方法提供 4 个可调参数， R_{mc} 、 V_m 、 θ_m 计算公式同式(3)， l_m 计算公式为

$$l_m = V_{\parallel m} - (V_{\parallel T} + V_{\parallel R})/2 \quad (6)$$

$V_{\parallel m}$ 变为 $V_{\parallel T}$ 和 $V_{\parallel R}$ 非均匀加权和 $V_{\parallel m} = W_T V_{\parallel T} + W_R V_{\parallel R}$ ，权系数 $W_T = a_T R_{mc}/(a_T + a_R)/R_{Tc}$ ， $W_R = a_R R_{mc}/(a_T + a_R)/R_{Rc}$ ，其它符号定义不变。改进双曲等效方法通过增加参数 l_m 和修正参数计算方法，精确补偿了双曲等效方法的残余三次项误差，剩余误差主要为四次项。

3 波数域图像重建

基于 AHRE 建立点 P 的解析相位谱^[13](省略了雷达发射信号相位谱，不影响后续推导)：

$$\begin{aligned} \Phi(f_r, f_\eta; x, y) &= -R_{mc} \cos\theta_m \sqrt{[4\pi/\lambda']^2 - [2\pi f_\eta/V_m + 4\pi l_m/(\lambda' V_m)]^2} \\ &\quad - R_{mc} \sin\theta_m [2\pi f_\eta/V_m + 4\pi l_m/(\lambda' V_m)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中 f_r 和 f_η 为距离和方位频率轴， f_c 为雷达载频，瞬时波长 $\lambda' = c/(f_c + f_r)$ 。

设点 O 为参考点(以下标 ref 标识)，令

$$\left. \begin{aligned} k &= 2\pi/\lambda' \\ k_u &= 2\pi f_\eta/V_{m,ref} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

建立点 O 的波数域相位表达式：

$$\begin{aligned} \Phi_{ref}(k, k_u) &= -R_{mc,ref} \cos\theta_{m,ref} \sqrt{(2k)^2 - \left(k_u + 2k \frac{l_{m,ref}}{V_{m,ref}}\right)^2} \\ &\quad - R_{mc,ref} \sin\theta_{m,ref} \left(k_u + 2k \frac{l_{m,ref}}{V_{m,ref}}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

为消除 k 和 k_u 之间的耦合，将 $k - k_u$ 平面映射到新的 $k_x - k_y$ 平面，映射关系为

$$\left. \begin{aligned} k_y &= k_u + 2k \frac{l_{m,ref}}{V_{m,ref}} \\ k_x &= \sqrt{(2k)^2 - k_y^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$k_x - k_y$ 平面内, 点 O 的相位表达式变为

$$\Phi_{\text{ref}}(k_x, k_y) = -R_{\text{mc,ref}} \cos \theta_{\text{m,ref}} k_x - R_{\text{mc,ref}} \sin \theta_{\text{m,ref}} k_y \quad (11)$$

此时, 进行 2 维逆傅里叶变换就可以重建点 O 的雷达散射系数和位置。

4 距离空变补偿

$k - k_u$ 平面内, 点 P 的波数域相位表达式为

$$\begin{aligned} \Phi(V_m, l_m) &\approx \Phi(V_{\text{m,ref}}, l_{\text{m,ref}}) + \frac{\partial \Phi(V_m, l_{\text{m,ref}})}{\partial V_m} \times (V_m - V_{\text{m,ref}}) + \frac{\partial \Phi(V_{\text{m,ref}}, l_m)}{\partial l_m} \times (l_m - l_{\text{m,ref}}) \\ &= -R_{\text{mc}} \cos \theta_m \sqrt{(2k)^2 - \left(k_u + 2k \frac{l_{\text{m,ref}}}{V_{\text{m,ref}}}\right)^2} - \frac{R_{\text{mc}} \sin \theta_m}{V_m} \left[\left(k_u + 2k \frac{l_{\text{m,ref}}}{V_{\text{m,ref}}}\right) V_{\text{m,ref}} + 2k(l_m - l_{\text{m,ref}}) \right] \\ &\quad + \frac{R_{\text{mc}} \cos \theta_m \left(k_u + 2k \frac{l_{\text{m,ref}}}{V_{\text{m,ref}}}\right)}{V_{\text{m,ref}} \sqrt{(2k)^2 - \left(k_u + 2k \frac{l_{\text{m,ref}}}{V_{\text{m,ref}}}\right)^2}} \left[\left(k_u + 2k \frac{l_{\text{m,ref}}}{V_{\text{m,ref}}}\right) (V_m - V_{\text{m,ref}}) + 2k(l_m - l_{\text{m,ref}}) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

根据点 O 相位表达式(9)完成参考函数相乘(Reference Function Multiply, RFM), 得到 $\Phi_{\text{RFM}}(k, k_u; x, y) = \Phi(k, k_u; x, y) - \Phi_{\text{ref}}(k, k_u)$ 。再根据式(10)建立点 P 在 $k_x - k_y$ 平面内的相位:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{RFM}}(k_x, k_y; x, y) &= - \left[R_{\text{mc}} \cos \theta_m - R_{\text{mc,ref}} \cos \theta_{\text{m,ref}} + \frac{R_{\text{mc}} \sin \theta_m}{V_m} (l_m - l_{\text{m,ref}}) \right] k_x \\ &\quad - \left[\frac{R_{\text{mc}} \sin \theta_m}{V_m} - \frac{R_{\text{mc,ref}} \sin \theta_{\text{m,ref}}}{V_{\text{m,ref}}} - \frac{R_{\text{mc}} \cos \theta_m}{V_{\text{m,ref}}^2} (l_m - l_{\text{m,ref}}) \right] V_{\text{m,ref}} k_y \\ &\quad - \left[\frac{R_{\text{mc}} \cos \theta_m}{V_{\text{m,ref}}} (V_m - V_{\text{m,ref}}) + \frac{R_{\text{mc}} \sin \theta_m}{2V_m} (l_m - l_{\text{m,ref}}) \right] \frac{k_y^2}{k_x} + \left[\frac{R_{\text{mc}} \cos \theta_m}{2V_{\text{m,ref}}} (l_m - l_{\text{m,ref}}) \right] \frac{k_y^3}{k_x^2} \end{aligned} \quad (14)$$

推导中假设 $2k = k_x \sqrt{1 + k_y^2/k_x^2} \approx k_x [1 + (k_y^2/k_x^2)/2]$ 。式(14)后两项是由 V_m 和 l_m 的距离空变性引起的残余耦合相位, 导致: (1)方位散焦, 这是因为 $1/k_x$ 含有常数展开项 $1/k_{x0}$, k_{x0} 为 k_x 的中值; (2)距离徙动, 这是因为 $1/k_x$ 含有 $(k_x - k_{x0})$ 的线性展开项; (3)距离散焦, 由 $1/k_x$ 的高阶展开项引起。相对而言, 方位散焦影响最大, 需在距离-方位波数域进行补偿。补偿函数为

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{res}}(k_y; x) &= \left[\frac{R_{\text{mc}} \cos \theta_m}{V_{\text{m,ref}}} (V_m - V_{\text{m,ref}}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_{\text{mc}} \sin \theta_m}{2V_m} (l_m - l_{\text{m,ref}}) \right] \frac{k_y^2}{k_{x0}} \\ &\quad - \left[\frac{R_{\text{mc}} \cos \theta_m}{2V_{\text{m,ref}}} (l_m - l_{\text{m,ref}}) \right] \frac{k_y^3}{k_{x0}^2} \end{aligned} \quad (15)$$

最后, 进行方位逆傅里叶变换就可以重建点 P 的雷达散射系数和位置 (x_p, y_p) 。

$\Phi(k, k_u; x, y)$

$$\begin{aligned} &= -R_{\text{mc}} \cos \theta_m \sqrt{(2k)^2 - \left(k_u \frac{V_{\text{m,ref}}}{V_m} + 2k \frac{l_m}{V_m}\right)^2} \\ &\quad - R_{\text{mc}} \sin \theta_m \left[k_u \frac{V_{\text{m,ref}}}{V_m} + 2k \frac{l_m}{V_m} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

对于双站聚束 SAR 构型, V_m 和 l_m 随目标距离位置 x 变化。将 Φ 视为 V_m 和 l_m 的二元函数, 并进行线性化近似得到

$$\left. \begin{aligned} x_p &= R_{\text{mc}} \cos \theta_m - R_{\text{mc,ref}} \cos \theta_{\text{m,ref}} \\ &\quad + \frac{R_{\text{mc}} \sin \theta_m}{V_m} (l_m - l_{\text{m,ref}}) \\ y_p &= R_{\text{mc}} \sin \theta_m \left(\frac{V_{\text{m,ref}}}{V_m} \right) - R_{\text{mc,ref}} \sin \theta_{\text{m,ref}} \\ &\quad - \frac{R_{\text{mc}} \cos \theta_m}{V_{\text{m,ref}}} (l_m - l_{\text{m,ref}}) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

综上, 改进 ωK 算法的处理流程为: (1) 2 维快速傅里叶变换; (2)参考函数相乘, 式(9); (3)Stolt 映射, 式(10); (4)距离向逆快速傅里叶变换; (5)补偿函数相乘, 式(15); (6)方位向逆快速傅里叶变换。

5 仿真结果

以平飞模式的机载双站聚束 SAR 为例, 对改进 ωK 算法进行仿真验证。双站 SAR 成像几何见图 1, 仿真参数见表 1(参见文献[1]第 5 章)。根据天线尺寸和位置, 发射和接收天线波束地面投影分别为 $431 \text{ m(A)} \times 1125 \text{ m(R)}$, $670 \text{ m(A)} \times 1048 \text{ m(R)}$ 。因此,

表 1 平飞模式的机载双站聚束 SAR 仿真参数

发射天线位置	(-4040.0, 625.0, 6997.7) m	飞行速度(T&R)	(0,200,0) m/s
接收天线位置	(-6446.5, -625.0, 3873.5) m	合成孔径时间	4 s
发射信号载频	9.6 GHz	方位处理带宽	1260 Hz
发射信号带宽	1000 MHz	脉冲重复频率	2400 Hz
发射信号时宽	1 μ s	天线尺寸(T&R)	0.6 m(A) \times 0.2 m(R)
采样率	1200 MHz	场景范围	0.4 km(A) \times 1 km(R)

注：A 代表方位向，R 代表距离向

合成波束地面投影设为 $0.4 \text{ km(A)} \times 1.0 \text{ km(R)}$ ，点目标阵的分布如图 2 所示，距离间隔(x 轴)100 m，方位间隔(y 轴)40 m。参考点 O 的斜距分辨率约为 0.13 m，方位分辨率约为 0.18 m。

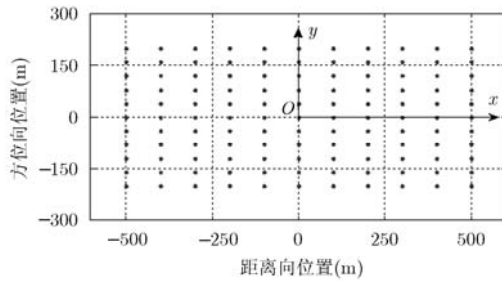
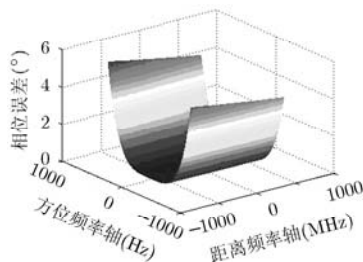


图 2 点目标阵分布位置示意图

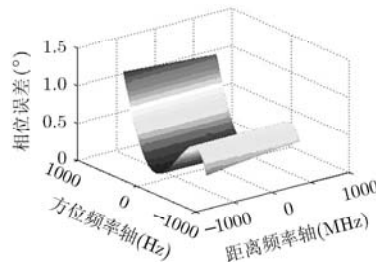
5.1 频谱精度

目前，LBF 双站谱^[14]和 MSR 双站谱^[15]都具有较好的适用性。MSR 谱精度最高，但表达式较复杂、算法推导较困难。下面，对 LBF 谱和本文提出的基于 AHRE 的双站谱(简称 AHRE 谱)进行仿真比较。

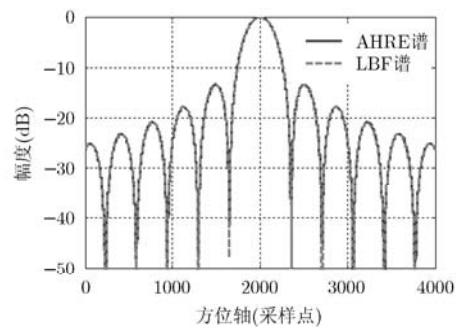
以参考点为例，图 3(a)和图 3(b)分别给出 AHRE 谱和 LBF 谱的高阶相位误差。此时，双站 SAR 基线/距离比值为 0.53，LBF 谱精度略优于 AHRE 谱，二者的方位压缩结果均接近理想波形，见图 3(c)。值得注意的是，LBF 谱还存在一个距离向线性相位误差，导致距离压缩位置偏移约 0.15 个像素。



(a) AHRE谱相位误差



(b) LBF谱相位误差



(c)方位压缩波形

图 3 基线/距离=0.53 时双基谱精度比较

将表 1 中发射和接收天线位置沿方位向拉伸 4 倍，即双站 SAR 基线/距离比值增大到 0.68，此时 AHRE 谱精度明显优于 LBF 谱，基于 LBF 谱的方位像严重散焦，如图 4 所示，并且 LBF 谱线性相位误差导致的距离偏移达 11.6 个像素。仿真表明：随着基线长度增加，AHRE 谱和 LBF 谱的精度逐渐下降，相比而言，LBF 谱精度下降更为严重，并且引起明显的距离偏移。

5.2 聚焦性能

目前，已有一些改进算法适用于本文所述的双站聚束 SAR 构型。下面，对基于 MSR 谱的 ω K 算法^[16](简称算法 1)和本文提出的基于 AHRE 谱的改进 ω K 算法(简称算法 2)进行仿真比较，2 维压缩结果见图 5，成像指标见表 2。算法 1 仅在参考距离 $x = 0$ 处得到理想指标，随着目标在距离方向移动，成像指标逐渐恶化。这是因为，算法 1 是在一定的距离空不变条件下建立的，对距离空变较强的回波信号需分块处理。算法 2 得到的成像指标基本一致且接近理想指标，方位主瓣展宽不超过 1.004。这是因为，算法 2 增加了距离空变补偿操作，具有更好的距离空变处理能力。

以近距点 $(-500, 0)$ 为例，进一步说明距离空变补偿操作的意义。与参考点相比，近距点 V_m 变化 0.064 m/s， l_m 变化 0.518 m/s，二次和三次残余耦合相位分别为 0.5π 和 0.08π 。如不进行距离空变补

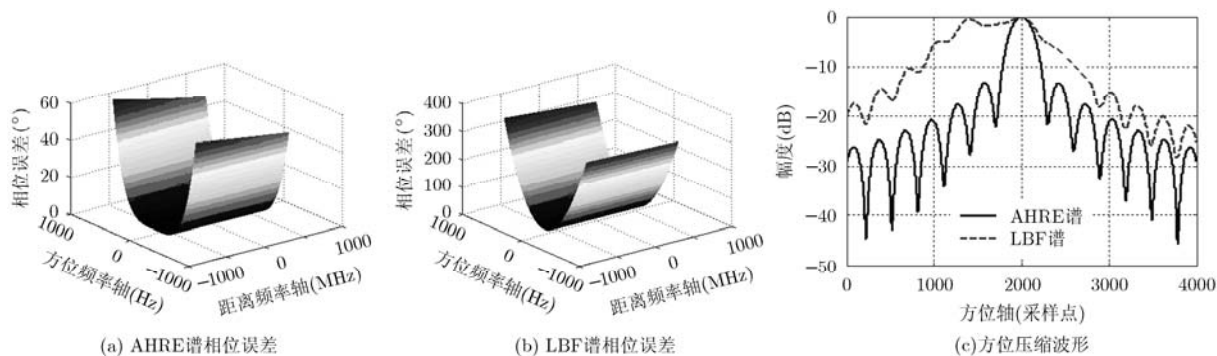


图4 基线/距离=0.68时双基谱精度比较

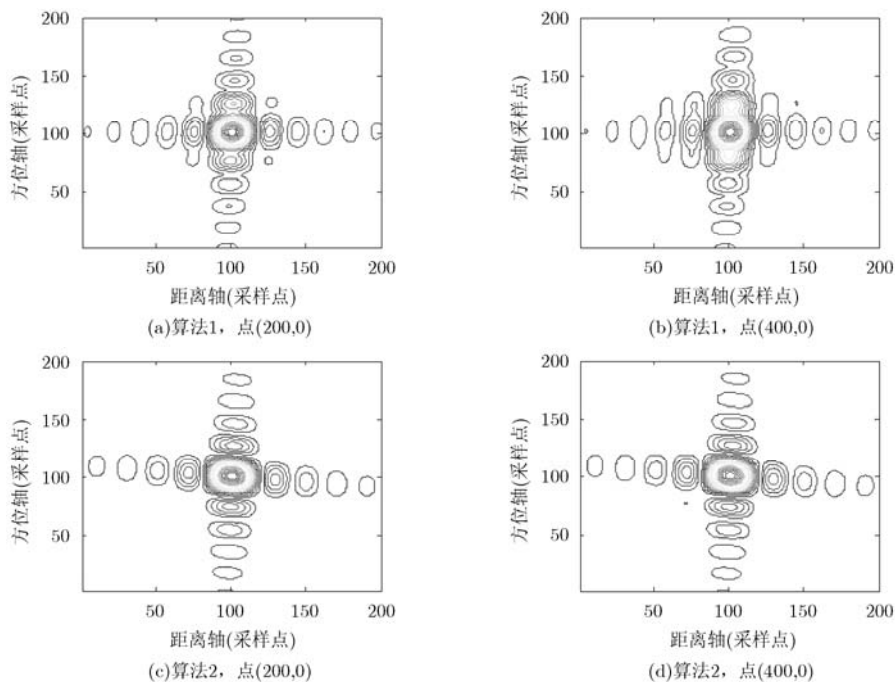


图5 两种算法的点目标压缩结果

表2 两种算法的成像指标

目标坐标 (x,y)		基于MSR的 ωK 算法				基于AHRE的改进 ωK 算法			
		距离向指标		方位向指标		距离向指标		方位向指标	
x	y	展宽(%)	PSLR(dB)	展宽(%)	PSLR(dB)	展宽(%)	PSLR(dB)	展宽(%)	PSLR(dB)
0	0	0.2	-13.24	0.6	-13.22	0.2	-13.60	0.1	-13.19
100	0	0.2	-13.24	1.4	-12.30	0.2	-13.60	0.4	-13.19
200	0	0.6	-13.09	3.0	-10.77	0.2	-13.61	0.1	-13.20
300	0	0.2	-13.10	5.3	-9.30	0.2	-13.53	0.2	-13.26
400	0	0.6	-13.01	9.5	-7.76	0.2	-13.50	0.3	-13.23
500	0	0.2	-12.85	14.8	-6.36	0.2	-13.58	0.3	-13.27

偿,方位压缩波形如图6实线所示:主瓣展宽1.06、第1旁瓣升高约4dB,使图像信噪比显著恶化,严重影响图像应用效能。距离空变补偿后,方位压缩

波形接近理想情况,如图6虚线所示。可见,距离空变补偿操作是提高改进 ωK 算法距离空变处理能力的关键。

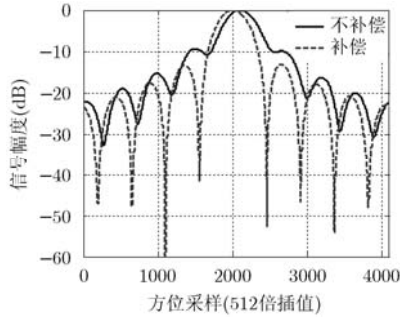


图6 近距点方位压缩波形

5.3 限制条件

实际上，双站聚束 SAR 构型中成像参数 R_{mc} , V_m , θ_m 和 l_m 既依赖于目标距离位置 x , 也依赖于目标方位位置 y 。改进 ωK 算法在距离-多普勒域补偿残余耦合相位，能够保证成像参数沿距离向更新，但无法兼顾成像参数沿方位向更新，场景方位边缘点无法得到精确补偿，方位向一次成像范围受限。

图 7(a) 仿真得到式(14)中 k_y^2/k_x 系数的梯度大小和方向，其方位空变性在近距离最为显著。进一步考察近距离 11 个点目标的方位指标：主瓣展宽见图 7(b)，最大值约 1.005；PSLR 见图 7(c)，最大值约 0.66 dB。可见，在本文仿真条件下，整幅场景成像结果基本满足指标要求。

5.4 几何特性

下面对改进 ωK 算法的几何保持特性进行说明。以参考点压缩位置为坐标原点，在成像平面内建立直角坐标系， X 轴代表距离向， Y 轴代表方位向。图 8 所示为 $y = -200$ m, $y = 0$ m 和 $y = 200$ m 处的点目标压缩位置。仿真表明：方位分布相同的

点目标，压缩后也位于相同的方位位置，并且不产生尺度变化。即 $Y(x, y) = Y(0, y)$, $Y(x, y) - Y(x, 0) = y$ 。

图 9(a) 为 $x = -500$ m, $x = 0$ m 和 $x = 500$ m 处的点目标压缩位置。仿真表明：距离分布相同的点目标，压缩后的距离位置并不相同。这是因为式(16)中 $\partial x_p / \partial y \neq 0$ 。数值计算得到： $X(x, y) - X(x, 0) = -5.68 \times 10^{-3} y$ ，因此可以通过频域线性相位相乘实现几何校正。图 9(b) 为几何校正后的点目标压缩位置，校正后： $X(x, y) = X(x, 0)$ 。数值计算得到地距图像和斜距图像之间的尺度变换关系： $X(x, y) - X(0, y) = 6.76 \times 10^{-1} x + 3.22 \times 10^{-5} x^2$ ，据此可以将斜距图像投影为地距图像。图 9(c) 为地距平面内的点目标压缩位置，投影后： $X(x, y) - X(0, y) = x$ 。

6 结论

与双曲等效方法相比，改进双曲等效方法精度更高，并且具有与双曲等效方法相似的解析频域回波表达式。本文将改进双曲等效方法引入双站聚束 SAR 成像处理中，提出了相应的波数域图像重建方法，解决了双站聚束 SAR 点目标精确成像问题。本文推导了距离空变引起的残余耦合相位，并发展了距离空变补偿方法，在很大程度上改善了 ωK 算法的距离空变处理能力，使场景边缘点目标成像质量大幅提高。在本文仿真条件下，改进 ωK 算法在整幅场景内的成像指标基本接近理想指标，并且具有很好的几何保持特性。

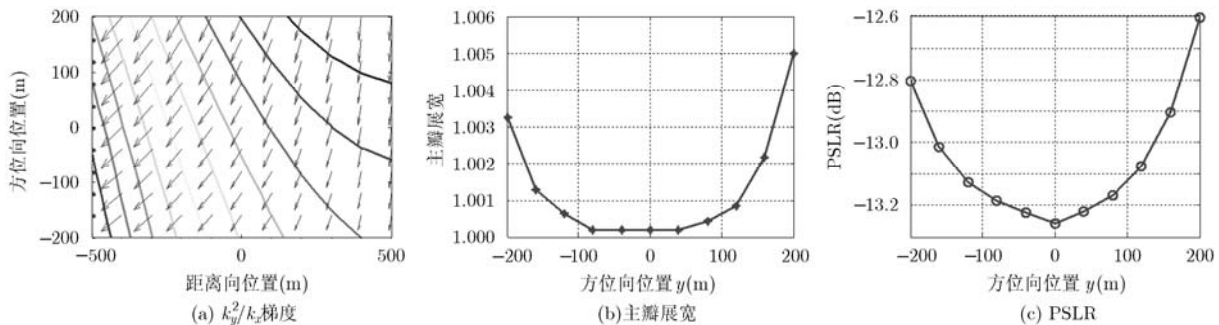


图7 近距离 11 个点目标的方位压缩指标

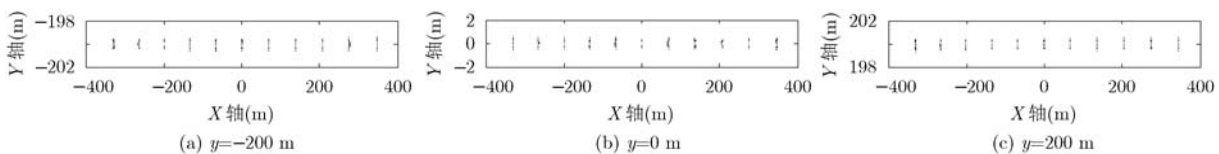
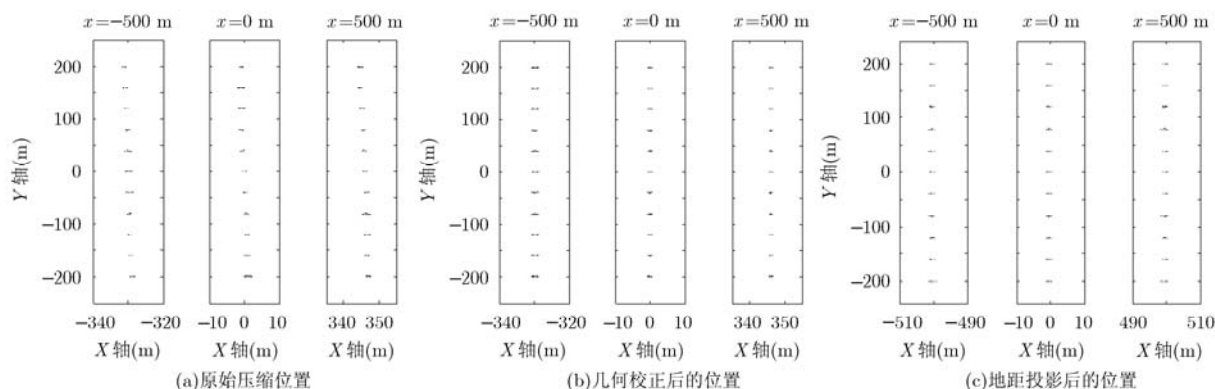


图8 $y = -200$ m, 0 m, 200 m 点处的目标压缩位置

图9 $x = -500$ m, 0 m, 500 m 处的点目标压缩位置

参考文献

- [1] 仇晓兰, 丁赤飏, 胡东辉. 双站 SAR 成像处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 8-12.
Qiu Xiao-lan, Ding Chi-biao, and Hu Dong-hui. Bistatic SAR Data Processing Algorithms[M]. Beijing: Science Press, 2010: 8-12.
- [2] 武拥军, 黄治, 吴先良. 机载双站聚束合成孔径雷达的三维空间分辨特性[J]. 电波科学学报, 2011, 26(6): 1200-1206.
Wu Yong-jun, Huang Zhi, and Wu Xian-liang. Three-dimensional spatial resolution of airborne bistatic spotlight SAR[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(6): 1200-1206.
- [3] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Norwood, MA: Artech House, 2005: 225-362.
- [4] Aria D D, Guarnieri A M, and Rocca F. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1362-1376.
- [5] 武拥军, 黄治. 一般构型机载双站 SAR 的距离徙动特性分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 3008-3012.
Wu Yong-jun and Huang Zhi. Range migration properties analyses for airborne bistatic SAR with general configuration [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 3008-3012.
- [6] Wu Y and Huang Y. A novel imaging algorithm for airborne bistatic squint SAR with unparallel trajectories[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25(1): 94-102.
- [7] 王增宇, 李欣, 黄晓涛. 固定接收机双站 UWB SAR 改进 NLCS 算法[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(4): 311-315.
Wang Zeng-yu, Li Xin, and Huang Xiao-tao. An improved NLCS algorithm of bistatic UWB SAR with a stationary receiver[J]. *Radar Science and Technology*, 2011, 9(4): 311-315.
- [8] Leffeld O, Nies H, Gebhardt U, et al. Bistatic SAR: some reflections on Rocca's smile[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Ulm, Germany, 2004: 379-383.
- [9] Ding J, Zhang Z, Xing M, et al. A new look at the bistatic-to-monostatic conversion for tandem SAR image formation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 392-395.
- [10] 闫鸿慧, 王岩飞, 于海峰, 等. 一种基于距离补偿的分布式小卫星双基 SAR 成像方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(5): 771-774.
Yan Hong-hui, Wang Yan-fei, Yu Hai-feng, et al. An imaging method of distributed small satellites bistatic SAR based on range distance compensation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(5): 771-774.
- [11] Bamler R, Meyer F, and Liebhart W. Processing of bistatic SAR data from quasi-stationary configuration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3350-3358.
- [12] Qiu X, Hu D, and Ding C. Focusing bistatic images use RDA based on hyperbolic approximating[C]. International Conference on Radar, Shanghai, China, 2006: 1323-1326.
- [13] Huang L, Qiu X, Hu D, et al. Focusing of medium-earth-orbit SAR with advanced nonlinear chirp scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 500-509.
- [14] Loffeld O, Nies H, Peters V, et al. Models and useful relations for bistatic SAR processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2031-2038.
- [15] Neo Y, Wong F, and Cumming I. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 93-96.
- [16] Liu B, Wang T, Wu Q, et al. Bistatic SAR data focusing using an Omega-K algorithm based on method of series reversion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2899-2912.

黄丽佳: 女, 1984 年生, 助理研究员, 主要研究方向为星载 SAR 成像处理。

仇晓兰: 女, 1982 年生, 副研究员, 主要研究方向为双站 SAR 成像处理、SAR 几何精校正、SAR 目标特性。

胡东辉: 男, 1970 年生, 副研究员, 主要研究方向为雷达信号处理。

丁赤飏: 男, 1969 年生, 研究员, 主要研究方向为雷达系统和信号处理。