

基于局部最优匹配的斜视 SAR 子孔径成像算法

孙宁霄^① 吴琼之^② 孙 林^{*②}

^①(北京理工大学光电学院 北京 100081)

^②(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

摘 要: 斜视合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)能够对雷达平台的侧前或侧后方区域进行观测,极大地增加了雷达的探测范围和灵活性。针对斜视 SAR 子孔径成像,该文提出一种基于局部最优匹配准则的成像算法。该算法在针对某方位频率构造对应的距离徙动校正、2 次距离压缩以及方位补偿函数时,以“位于该方位频率处的点目标得到最佳匹配”为准则,不同于传统方法的以“方位中心点获得最佳匹配”为准则,从而能够避免距离方位中心较远的目标的失配,有效地改善了方位边缘区域的聚焦效果。文中通过点目标仿真验证了该算法的有效性。

关键词: 斜视合成孔径雷达; 子孔径成像; 局部最优匹配准则

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)12-2851-09

DOI: 10.11999/JEIT170466

Local Optimal Matching Algorithm for Subaperture Imaging of Squint Synthetic Aperture Radar

SUN Ningxiao^① WU Qiongzhi^② SUN Lin^②

^①(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

^②(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Squint Synthetic Aperture Radar (SAR) can observe the side-front or side-rear scene of the platform. The squint mode improves the observation area and flexibility of SAR greatly. For subaperture imaging of squint SAR, a Local Optimal Matching Algorithm (LOMA) is proposed in this paper. In the algorithm, a new criterion is used in the presentation of the functions for range cell migration correction, secondary range compression and compensation in azimuth frequency domain. The criterion is that the target located at the azimuth frequency is matched optimally. It is different from the traditional algorithm, whose criterion is that the target at the azimuth center is matched optimally. Based on the new criterion, the proposed algorithm is able to avoid the mismatching and improve the focusing of the targets far from the azimuth center. The validity of the proposed algorithm is illustrated by the simulation results.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Subaperture imaging; Local Optimal Matching Criterion (LOMC)

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)搭载在飞机或卫星等运动平台上,可以提供雷达天线辐射区域的 2 维高分辨率图像^[1,2]。SAR 能够在夜间工作,并且对云、雨甚至地面植被有一定的穿透能力。当 SAR 的天线指向与平台速度方向不垂直时,就被称为斜视 SAR。斜视 SAR 的波束指向灵活,可以对平台的侧前方或者侧后方区域进行观测,极大地增加了雷达的探测范围和灵活性。斜视 SAR 在民用和军事方面都有着广阔的应用前景,逐渐成为 SAR 领域的一个研究热点^[3-5]。

前斜 SAR 的主要特点是较大的距离走动引入

了距离向和方位向的强 2 维耦合,增加了成像的难度。为了实现前斜 SAR 成像,一些算法先在方位时域进行距离走动校正,达到降低 2 维耦合的目的。但是,这种操作会将最短斜距不同的目标移动到相同的距离门内,引入方位空变性问题。为了解决方位空变性问题,不同论文中给出了各自不同的方法^[6-9],其基本思路都是利用信号支撑域不同的特点,通过非线性调频信号消除方位空变性,最终实现一致的方位匹配滤波。

子孔径处理是 SAR 成像的一种重要方式,其数据录取时间短,数据量小,成像处理速度快,只要分辨率、信噪比等指标满足需求,子孔径处理则是更合适的选择,因此多应用于实时成像处理或者大量数据的浏览^[10]。常用的子孔径成像算法有 SPECTral ANALYSIS(SPECAN)算法^[11]和 Extended

Chirp Scaling(ECS)算法^[12]。针对斜视 SAR 子孔径成像,也有人开展研究,提出了多种算法^[13-16]。但是这些算法都是针对场景中点构造匹配函数,导致距离中心点越远,误差就越大,散焦就越严重。

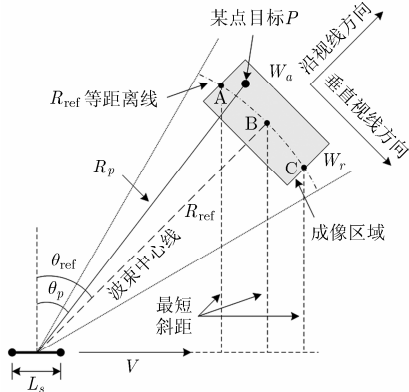
本文针对斜视 SAR 子孔径成像处理,提出一种新的基于局部最优匹配准则的成像算法(Local Optimal Matching Algorithm, LOMA)。该方法首先在方位时域进行距离走动校正,然后基于局部最优匹配准则在方位频域构造徙动校正函数、2次距离压缩函数和方位补偿函数,使得每个目标在其方位频谱中心位置达到最佳校正或补偿,最后利用去斜处理实现方位压缩。该方法可以有效改善方位边缘点目标的聚焦效果。

2 回波信号模型

斜视 SAR 子孔径成像的几何关系如图 1(a)所示,雷达运动速度为 V ,子孔径积累时间为 T_s ,子孔径长度为 $L_s = VT_s$,图中的灰色矩形为一个子孔径数据处理得到的成像区域,其沿雷达视线方向的长度为 W_r ,垂直视线方向的长度为 W_a 。相对于子孔径中心位置,场景中心点的距离为 R_{ref} ,前斜角为 θ_{ref} ,场景中某点目标 P 的距离为 R_p ,前斜角为 θ_p 。

假定雷达发射线性调频矩形脉冲信号,场景中某点目标 P 的回波可以表示为

$$\begin{aligned} s(t_r, t_a; R_p, \theta_p) &= A \cdot \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_s}\right) \cdot \text{rect}\left[\frac{t_r - 2R(t_a; R_p, \theta_p)/c}{T_p}\right] \\ &\quad \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left[t_r - \frac{2R(t_a; R_p, \theta_p)}{c}\right]^2\right. \\ &\quad \left. - j\frac{4\pi R(t_a; R_p, \theta_p)}{\lambda}\right\} \end{aligned} \quad (1)$$



(a) 几何关系

其中, t_a 为方位时间, t_r 为距离时间, A 为幅度, $\text{rect}(\cdot)$ 表示宽度为 1 且幅度为 1 的矩形信号, c 为电磁波传播速度, T_p 为发射脉冲宽度, K_r 为脉冲调频率, λ 为载波波长, $R(t_a; R_p, \theta_p)$ 为点目标 P 的瞬时斜距。

为了更直观地理解子孔径成像的特点,图 1(b)给出了子孔径长度内 3 个点目标的距离徙动曲线和时频关系曲线。在图 1(b)中,点目标 1 和 2 位于子孔径中心的同一条射线上,即具有相同的前斜角 θ_p ,因此它们的时频关系曲线在子孔径中心时刻相交,点目标 1 和 3 位于子孔径中心的同一条等距离弧上,即具有相同的距离 R_p ,因此它们的距离徙动曲线在子孔径中心时刻相交。

3 LOMA 成像算法

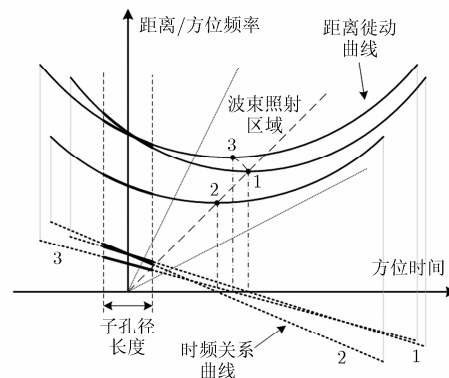
LOMA 成像算法的处理流程图如图 2 所示,主要步骤包括距离压缩、方位时域的距离走动校正、方位频域的距离徙动校正及 2 次距离压缩、方位频域相位补偿以及基于去斜处理的方位压缩,下面对每个成像步骤进行详细介绍。

3.1 距离徙动校正及 2 次距离压缩

对回波进行距离压缩并采用文献[8]的方法进行距离走动校正后,回波信号的 2 维频谱可以表示为

$$\begin{aligned} S(f_a, f_r; R_p, \theta_p) &= \text{rect}\left[\frac{f_a - f_{\text{dep}}(\theta_p)}{f_{\text{drp}}(R_p, \theta_p)T_s}\right] \\ &\quad \cdot \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_r}\right) \cdot \exp\{j\Omega(f_a, f_r; R_p, \theta_p)\} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, f_r 为距离向频率, f_a 为方位向频率, $f_c = c/\lambda$ 为载波频率, $B_r = K_r T_p$ 为发射脉冲带宽, $f_{\text{drp}}(R_p, \theta_p)$ 为点目标 P 的多普勒调频率, $f_{\text{dep}}(\theta_p)$ 为点目标 P 的方位频域支撑域中心频率,支撑域宽度



(b) 3 个点目标的距离徙动曲线和时频关系曲线

图 1 斜视 SAR 子孔径成像示意图

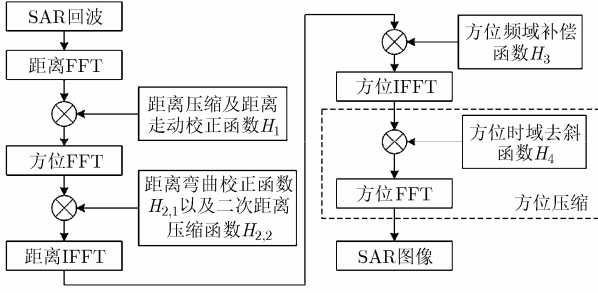


图2 LOMA 成像算法的处理流程图

为 $f_{\text{drp}}(R_p, \theta_p) T_s$ 。 $f_{\text{dcp}}(\theta_p)$ 和 $f_{\text{drp}}(R_p, \theta_p)$ 的表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} f_{\text{dcp}}(\theta_p) &= \frac{2V}{\lambda} (\sin \theta_p - \sin \theta_{\text{ref}}) \\ f_{\text{drp}}(R_p, \theta_p) &= -\frac{2V^2 \cos^2 \theta_p}{R_p \lambda} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将回波2维频谱的相位 $\Omega(f_a, f_r; R_p, \theta_p)$ 对距离频率进行泰勒级数展开。由于方位时域的距离走动校正已经大大降低了距离向与方位向的2维耦合，因此可以只考虑展开式的前3项，展开式为

$$\Omega(f_a, f_r; R_p, \theta_p) \approx \Omega_0(f_a; R_p, \theta_p) + \Omega_1(f_a; R_p, \theta_p) f_r + \Omega_2(f_a; R_p, \theta_p) f_r^2 \quad (4)$$

3.1.1 距离徙动校正函数 这里假定通过距离分段实现距离空变的距离徙动校正，因此本小节主要分析位于中心斜距 R_{ref} 上的点目标的距离徙动校正。在方位时域进行距离走动校正后，中心斜距 R_{ref} 上的点目标位于同一个距离门，但是由于其最短斜距不同，如图1(a)所示，它们在方位频域的距离徙动曲线并不重合，如果使用中心点的距离徙动量进行校正，将会导致方位边缘点存在残余距离徙动。为了解决该问题，本小节基于局部最优匹配准则构造方位频域的距离徙动校正量，可以使沿方位向上的所有点目标都实现良好的距离徙动校正。

假定点目标 P 位于斜距 R_{ref} 上，即令 $R_p = R_{\text{ref}}$ ，根据式(4)中一次项系数 $\Omega_1(f_a; R_p, \theta_p)$ 可以得到此时点目标 P 的距离徙动曲线，由于子孔径的持续时间 T_s 较短，距离徙动曲线中仍以1次项(即残余的距离走动)为主，因此在 f_{dcp} 处展开，忽略2次及更高次

项，距离徙动曲线可以表示为

$$R_{\text{rm}}(f_a; R_{\text{ref}}, \theta_p) \approx R_{\text{ref}} + \frac{R_{\text{ref}} \lambda (\sin \theta_p - \sin \theta_{\text{ref}})}{2V \cos^2 \theta_p} \cdot (f_a - f_{\text{dcp}}) \quad (5)$$

根据式(3)可以知道， θ_p 与 f_{dcp} 有一一对应关系， θ_p 可以用 f_{dcp} 表示，因此距离徙动曲线 $R_{\text{rm}}(f_a; R_{\text{ref}})$ 可以表示为 $R_{\text{rm}}(f_a; R_{\text{ref}}, f_{\text{dcp}})$ 。构造距离徙动校正量 $R_{\text{rmc}}(f_a; R_{\text{ref}})$ ，使其在任一 f_a 处的1次项系数与 $f_{\text{dcp}} = f_a$ 的点的距离徙动曲线 $R_{\text{rm}}(f_a; R_{\text{ref}}, f_{\text{dcp}})$ 相同，即

$$\left. \frac{dR_{\text{rmc}}(f_a; R_{\text{ref}})}{df_a} \right|_{f_a=f_{\text{dcp}}} = \frac{R_{\text{ref}} \lambda^2 f_{\text{dcp}}}{4V^2} \left[1 - \left(\frac{\lambda f_{\text{dcp}}}{2V} + \sin \theta_{\text{ref}} \right)^2 \right]^{-1} \quad (6)$$

同时，令 $f_a = 0$ 时距离徙动校正量为零，即 $R_{\text{rmc}}(0; R_{\text{ref}}) = 0$ 。因此，对式(6)利用数值法或解析法求解，就可以得到距离徙动校正量 $R_{\text{rmc}}(f_a; R_{\text{ref}})$ ，并构造距离徙动校正函数 $H_{2.1}(f_a, f_r; R_{\text{ref}})$ 。

本小节在构造任一 f_a 处距离徙动校正量 $R_{\text{rmc}}(f_a; R_{\text{ref}})$ 时，参考的是正好位于该方位频率处的目标(即 $f_{\text{dcp}} = f_a$ 的目标)的距离徙动曲线，使该目标能够实现最佳的校正，因此称其为基于局部最优匹配准则的距离徙动校正量。为了更清晰地展示距离徙动曲线被校正的过程，以图1(a)中的3个点目标A、B和C为例，图3给出了LOMA算法的距离走动校正和距离徙动校正过程的示意图。

3.1.2 2次距离压缩函数 这里也忽略2次距离压缩的距离空变性，针对中心斜距 R_{ref} 上的点目标构造2次距离压缩函数。当 $R_p = R_{\text{ref}}$ 时，式(4)中回波2维频域的距离频率2次项系数 $\Omega_2(f_a; R_{\text{ref}}, \theta_p)$ 可以表示为

$$\Omega_2(f_a; R_{\text{ref}}, f_{\text{dcp}}) = \frac{2\pi R_{\text{ref}} \lambda}{c^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_{\text{dcp}}}{2V} + \sin \theta_{\text{ref}} \right)^2} \cdot \left(\frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V} + \sin \theta_{\text{ref}} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad (7)$$

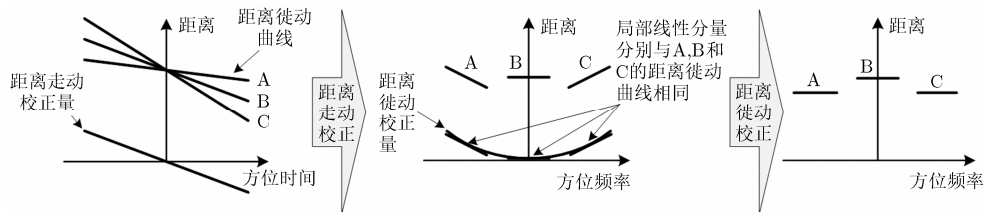


图3 LOMA 算法的距离走动校正和徙动校正过程示意图

根据局部最优匹配准则, 针对任一 f_a 构造 2 次距离压缩函数 $H_{2,2}(f_a, f_r; R_{\text{ref}})$ 时, 以正好位于该 f_a 的目标 (即 $f_{\text{dep}} = f_a$ 的目标) 的距离频率 2 次项系数为参考, 使 2 次距离压缩函数在该 f_a 处的距离频率 2 次项系数为该目标的相反数 $-\Omega_2(f_a; R_{\text{ref}}, f_{\text{dep}} = f_a)$, 即

$$H_{2,2}(f_a, f_r; R_{\text{ref}}) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi R_{\text{ref}} \lambda}{c^2} \left(\frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V} + \sin \theta_{\text{ref}} \right)^2 \right]^{-1} f_r^2 \right\} \quad (8)$$

3.2 方位频域补偿

由于是子孔径成像处理, 本文采用去斜处理实现方位压缩。如果直接使用 SPECAN 算法, 由于同一距离门内目标的多普勒频率不同, 因此部分目标会散焦。如果采用 ECS 算法中方位压缩方法, 由于同一距离门内目标的最短斜距不同, 导致匹配函数不同, 因此仍会有部分目标散焦。为了实现所有目标的良好聚焦, 本文根据局部最优匹配准则构造方位频域补偿函数, 使其将该距离门内所有点目标的多普勒调频率修正为相同值, 然后再在方位时域采用统一的去斜处理实现压缩。

由于子孔径处理的方位积累时间较短, 因此可以将目标回波的方位调制相位在 $f_a = f_{\text{dep}}$ 处进行泰勒展开, 2 次和 3 次项系数分别为

$$\kappa(R_p, \theta_p) = \frac{\pi R_p \lambda}{2V^2 \cos^2 \theta_p}, \chi(R_p, \theta_p) = \frac{\pi R_p \lambda^2 \sin \theta_p}{4V^3 \cos^4 \theta_p} \quad (9)$$

这里忽略 3 次相位的空变特性及更高次相位, 主要分析 2 次相位的空变特性。考虑距离徙动校正后位于距离门 R_n 内的点目标原本的距离为 $R_p = R_n + R_{\text{rnc}}(f_{\text{dep}}; R_{\text{ref}})$, 同时利用 θ_p 与 f_{dep} 的对应关系, $\kappa(R_p, \theta_p)$ 可以用 R_n 和 f_{dep} 表示为 $\kappa(R_n, f_{\text{dep}})$ 。因此, $\kappa(R_n, f_{\text{dep}})$ 在方位频域的空变特性可以表示为

$$\Delta \kappa(R_n, f_{\text{dep}}) = \kappa(R_n, f_{\text{dep}}) - \kappa(R_n, 0) \quad (10)$$

根据局部最优匹配准则, 构造方位频域补偿函数 $H_3(f_a, t_r)$, 使其在任一方位频率 f_a 处的 2 次项系

数为 $-\Delta \kappa(R_n, f_{\text{dep}} = f_a)$, 则使位于该方位频率处的目标的 2 次相位系数得到最佳补偿。对 $-2\Delta \kappa(R_n, f_{\text{dep}} = f_a)$ 进行两次积分得到方位频域补偿函数 $H_3(f_a, t_r)$, 即

$$H_3(f_a, t_r) = \exp \left\{ j \int_0^{f_a} d\eta \int_0^\eta [-2\Delta \kappa(R_n, \xi)] d\xi \right\} \quad (11)$$

其中, t_r 与 R_n 的关系为 $t_r = 2R_n / c$ 。由于式(11)的解析表达式很难推导获得, 因此通过数值法求解 $H_3(f_a, t_r)$ 。乘以补偿函数 $H_3(f_a, t_r)$ 后, 2 次相位系数与目标方位位置无关, 3 次项系数变为原来的 $1/3$ 。

3.3 方位压缩

完成方位频域补偿后, 将回波变到方位时域, 构造方位去斜函数:

$$H_4(t_a, t_r) = \exp \left\{ j\pi \frac{2V^2 \cos^2 \theta_{\text{ref}}}{\lambda R_n} t_a^2 + j\pi \frac{2V^3 \sin \theta_{\text{ref}} \cos^2 \theta_{\text{ref}}}{3R_n^2 \lambda} t_a^3 \right\} \quad (12)$$

回波乘以去斜函数后, 进行方位 FFT, 完成方位压缩。为了便于理解方位处理的过程, 以图 1(a)中的 3 个点目标 A、B 和 C 为例, 图 4 直观地给出了 LOMA 算法方位频域补偿和压缩过程中 2 次相位的变化。

3.4 算法适用性讨论

任何成像算法都有一定的局限性和算法误差, 为了能够在实际应用中选择最佳的成像算法, 本小节将对 LOMA 算法的适用性进行讨论。

(1)LOMA 算法只适用于中低分辨率的子孔径成像处理: 局部最优匹配准则只保证了点目标频谱中心位置 f_{dep} 处实现最佳匹配, 而无法保证频谱范围 $[f_{\text{dep}} - f_{\text{drp}} T_s / 2, f_{\text{dep}} + f_{\text{drp}} T_s / 2]$ 内其它位置的最佳匹配。因此, 如果分辨率较高, 就可能由于非频谱中心位置的误差导致散焦, 这种误差主要包括距离徙动校正误差和 2 次距离压缩误差。

根据第 3.1 小节的分析, 完成距离徙动校正后, 点目标的 P 的残余距离徙动和残余 2 次距离压缩相位为

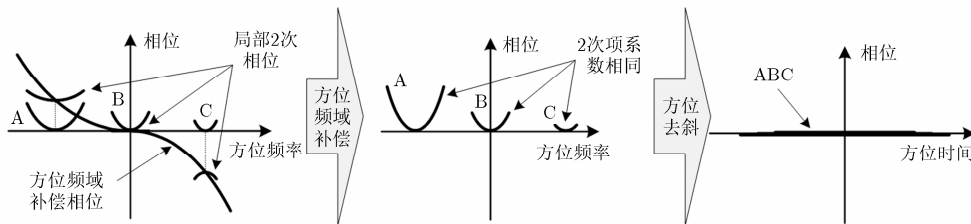


图 4 LOMA 算法方位频域补偿和压缩过程中 2 次相位变化示意图

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{rm}}(f_a; R_{\text{ref}}, \theta_p) \\ = R_{\text{rm}}(f_a; R_{\text{ref}}, \theta_p) - R_{\text{rmc}}(f_a; R_{\text{ref}}) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_{\text{src}}(f_a; R_{\text{ref}}, f_{\text{dcp}}) \\ = [\Omega_2(f_a; R_{\text{ref}}, f_{\text{dcp}}) - \Omega_2(f_a; R_{\text{ref}}, f_a)](B_r/2)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

在点目标的频谱范围内计算 $\Delta R_{\text{rm}}(f_a; R_{\text{ref}}, \theta_p)$ 和 $\Delta \Phi_{\text{src}}(f_a; R_{\text{ref}}, f_{\text{dcp}})$ ，就可以得到距离徙动校正误差和 2 次距离压缩相位误差。以表 1 中的成像参数为例，计算中心斜距上目标的误差，结果如图 5 所示。从图中可以看出，这两种误差都很小，对聚焦效果的影响都可以忽略。

表 1 斜视 SAR 子孔径成像处理仿真参数

参数名	符号	数值
中心斜距	R_{ref}	20 km
前斜角	θ_{ref}	40°
速度	V	150 m/s
积累时间	T_s	6 s
成像区域幅宽	W_a	3 km
波长	λ	0.16 m
带宽	B_r	65 MHz

(2)LOMA 算法中方位频域补偿函数会引起信号在方位时域的位移，可能导致方位向散焦：方位频域补偿函数 $H_3(f_a, t_r)$ 在 f_{dcp} 处存在线性相位分量，该分量会引起信号在时域的位移，信号支撑域不再关于子孔径中心时刻对称，使方位去斜函数在信号时域支撑域内包含了局部 2 次相位分量，且该 2 次相位分量在方位去斜后仍然存在，成为残余的 2 次相位误差，当该分量足够大时，就会导致方位散焦。

方位频域补偿函数 $H_3(f_a, t_r)$ 引起的方位时移 $\tau(R_n, f_{\text{dcp}})$ ，可以通过对 $H_3(f_a, t_r)$ 求导得到，即

$$\tau(R_n, f_{\text{dcp}}) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_{H3}}{df_a} \quad (15)$$

式中， Φ_{H3} 表示 $H_3(f_a, t_r)$ 的相位。根据方位去斜函数 $H_4(t_a, t_r)$ 中的 3 次相位，可以计算其在方位时移 $\tau(R_n, f_{\text{dcp}})$ 处的局部 2 次相位分量，即残余的 2 次相位误差为

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_{2\text{nd}}(R_n, f_{\text{dcp}}) = \pi \frac{2V^3 \sin \theta_{\text{ref}} \cos^2 \theta_{\text{ref}}}{R_n^2 \lambda} \\ \cdot \tau(R_n, f_{\text{dcp}}) \left(T_s' / 2 \right)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

式中， $T_s' = T_s \cdot f_{\text{dcp}}(R_p, \theta_p) / f_{\text{dcp}}(R_n, \theta_{\text{ref}})$ 表示方位频域补偿后信号在方位时域的持续时间。

以表 1 中的成像参数为例，分析中心斜距上目标的方位时移和 2 次相位误差，结果如图 6 所示，目标距离方位中心越远，其方位时移和 2 次相位误差就越大。在该成像参数下，最大的 2 次相位误差约为 -1.2 rad ，超出了 $\pi/4$ ，会导致一定的散焦和副瓣抬升，可以通过减小垂直视线方向的幅宽降低该误差。

另外，由于子孔径信号已经占满了整个时域支撑域，信号的方位时移会导致信号折叠，在方位 FFT 时折叠部分的信号无法与未折叠信号相干累加，导致分辨率下降，并产生弱虚假目标。为了解决该问题，需要在方位频域补偿之前，在方位时域补零，扩展时域的支撑域，或者采用类似于文献[15]中方法，通过在方位时域乘以调制相位，影响方位频域补偿函数，将方位时移降低到可接受的范围。

(3)LOMA 算法在推导过程中，进行了一些近似，例如忽略了 2 维频谱中的距离频率 3 次及更高次相位、方位调制中的 3 次相位的空变特性以及更高次相位等等。这些近似都会引入一定的相位误差，而且这些误差都会随着分辨率的提高或者成像区域的增加而变大，因此在实际使用 LOMA 算法时要对这些误差进行分析，以保证其对图像质量的影响在可接受的范围内。

4 仿真结果

本节将通过点目标仿真验证 LOMA 算法的有效性，仿真参数如表 1 所示。由于本算法不考虑距离空变性，因此这里只分析中心斜距 R_{ref} 上方位中心及边缘的 3 个点目标，如图 1(a)中的点目标 A、B 和 C 所示。

4.1 距离徙动校正结果

完成距离压缩和距离走动校正后，3 个点目标的距离徙动曲线如图 7 所示。从图中可以看出，只有方位中心点 B 的距离走动被校正，位于边缘的 A 和 C 则仍有距离走动分量。

为了去除距离走动校正后的残余徙动，在方位频域进行距离徙动校正，图 8 给出了使用方位中心的距离徙动量进行校正后的结果。从图中看出，点目标 A 和 C 大部分距离徙动量都被校正掉了，但是仍没有被完全校直。图 9 给出了使用本文提出的 LOMA 算法进行距离徙动校正的结果。从图中可以看出，无论是位于方位中心的点目标 B，还是位于方位边缘的点目标 A 和 C，距离徙动曲线都被校直。

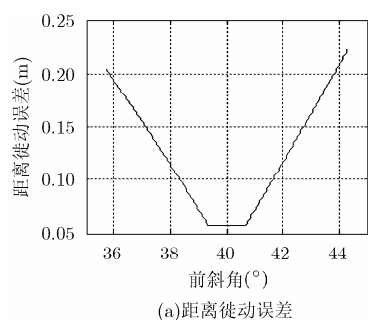
4.2 方位压缩结果

图 10 给出了 3 个点目标在方位时域的包络和 2 次相位，其中图 10(a)~图 10(c)分别为补偿前、ECS

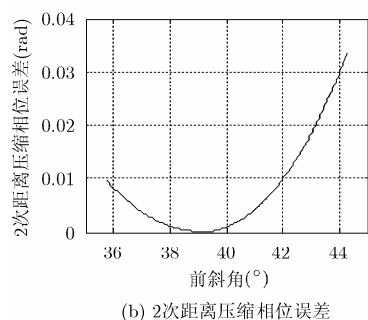
算法补偿后、LOMA 算法补偿后的包络,图 10(d)~图 10(f)分别为补偿前、ECS 算法补偿后、LOMA 算法补偿后的 2 次相位。在图 10(d)中,由于 3 个点目标的前斜角不同,因此多普勒调频率不同,2 次相位的弯曲程度也不同。如果直接进行去斜处理,必然有些点目标会存在残余 2 次相位,导致方位散焦,所以必须将所有点目标的多普勒调频率修正为同一值,才能进行方位去斜处理。

使用 ECS 算法进行方位频域补偿后,点目标在方位时域的包络和 2 次相位如图 10(b)和图 10(e)所示。从图中可以看出,3 个点目标的 2 次相位的差异变小了,说明 ECS 算法对多普勒调频率实现了一定的修正,但是仍存在能够产生明显散焦的差异。另外,由于方位频域补偿相位的影响,信号在时域的位置和宽度都有一定的变化。

使用 LOMA 算法进行方位频域补偿的结果如

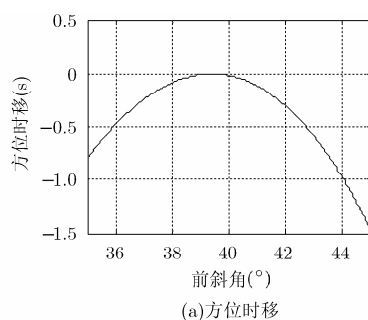


(a) 距离徙动误差

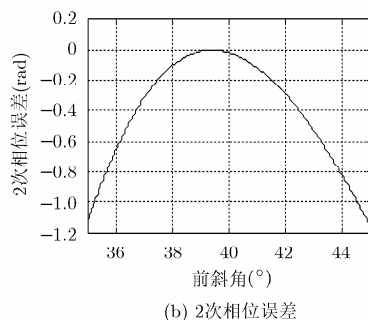


(b) 2次距离压缩相位误差

图5 距离徙动误差和 2 次距离压缩相位误差分析计算结果

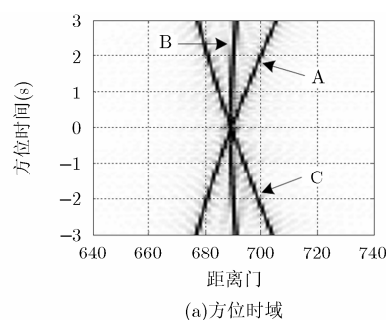


(a) 方位时移

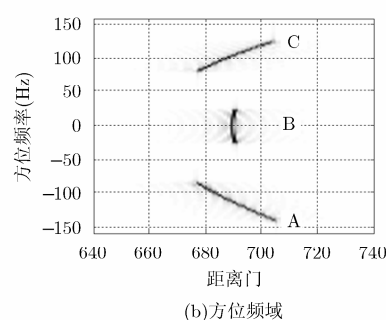


(b) 2次相位误差

图6 方位频域补偿引起的方位时移和 2 次相位误差



(a) 方位时域



(b) 方位频域

图7 距离走动校正后点目标在方位时域和频域的距离徙动曲线

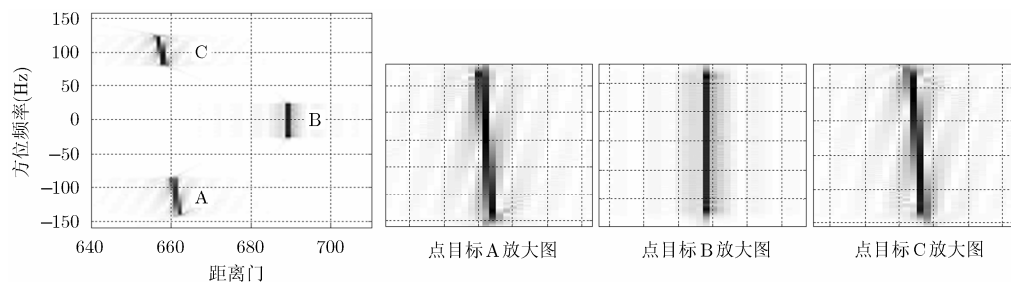


图8 使用方位中心的距离徙动量进行校正后的结果

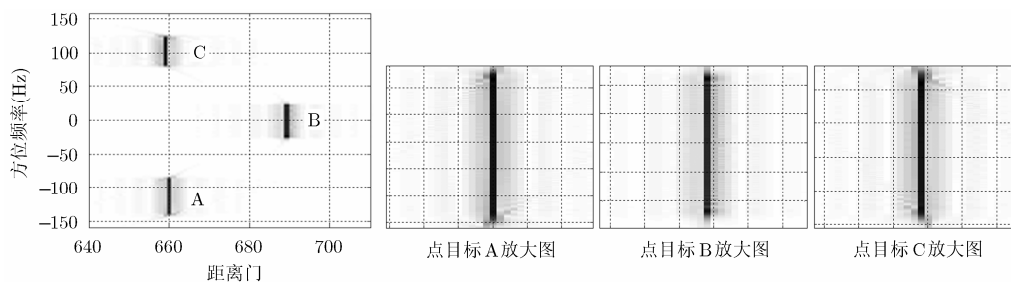


图9 使用 LOMA 算法的距离徙动量进行校正后的结果

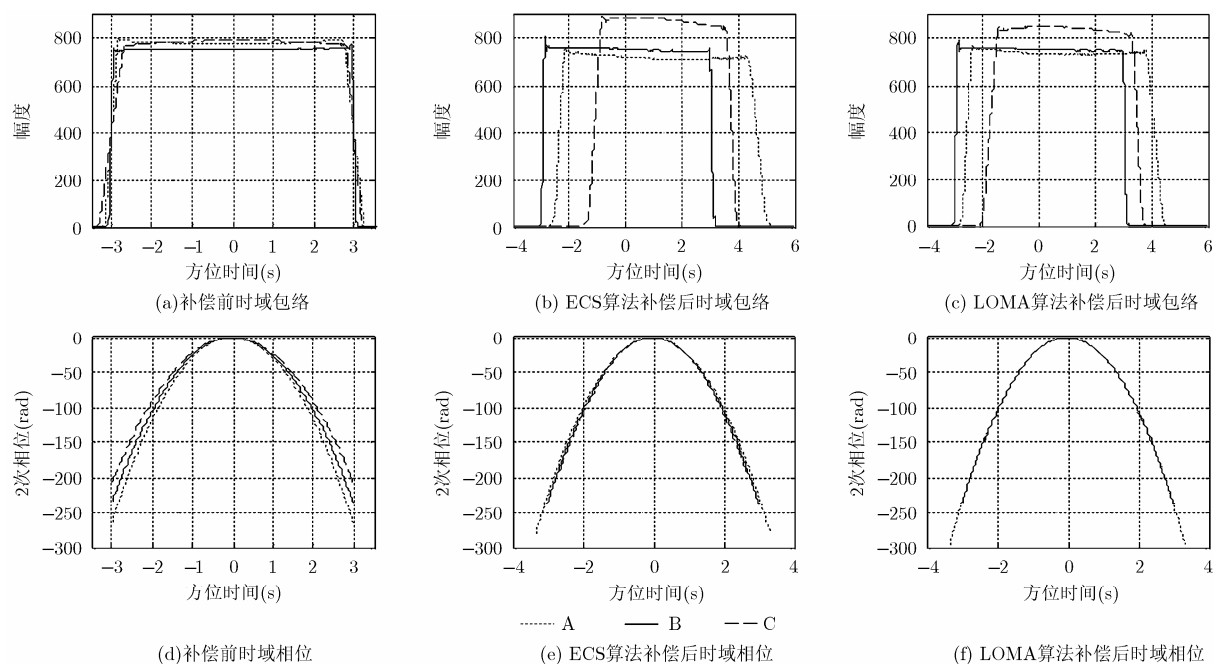


图10 方位频域补偿前后点目标在方位时域的包络和2次相位

图10(c)和图10(f)所示。从图中可以看出,点目标的2次相位基本重合,多普勒调频率已被修正为同一值。(这里认为3个点目标仍近似位于同一个距离门,所以多普勒调频率已被修正为同一值。但严格讲,点目标B与其它两个点目标并不在同一个距离门,其多普勒调频率并没有被修正为同一值,存在一定差异,但是差异很小,图中无法显示出来。)

图11给出了分别使用ECS算法和LOMA算法获得的点目标地距图像。为了使结果对比更加清晰,

图中的点目标图像都进行了升采样处理。从图中可以明显看出,ECS算法方位压缩的结果中,只有方位中心点目标实现了良好聚焦,方位边缘点目标方位向明显散焦,而使用LOMA算法的结果中,方位边缘点目标的聚焦效果得到了明显改善。另外,从图中可以看出点目标的2维旁瓣是相互垂直的,这主要是因为仿真中没有考虑平台高度,多普勒中心不随距离变化,而且方位向采用去斜方式实现聚焦,所以点目标的2维旁瓣是相互垂直的,具体原理可

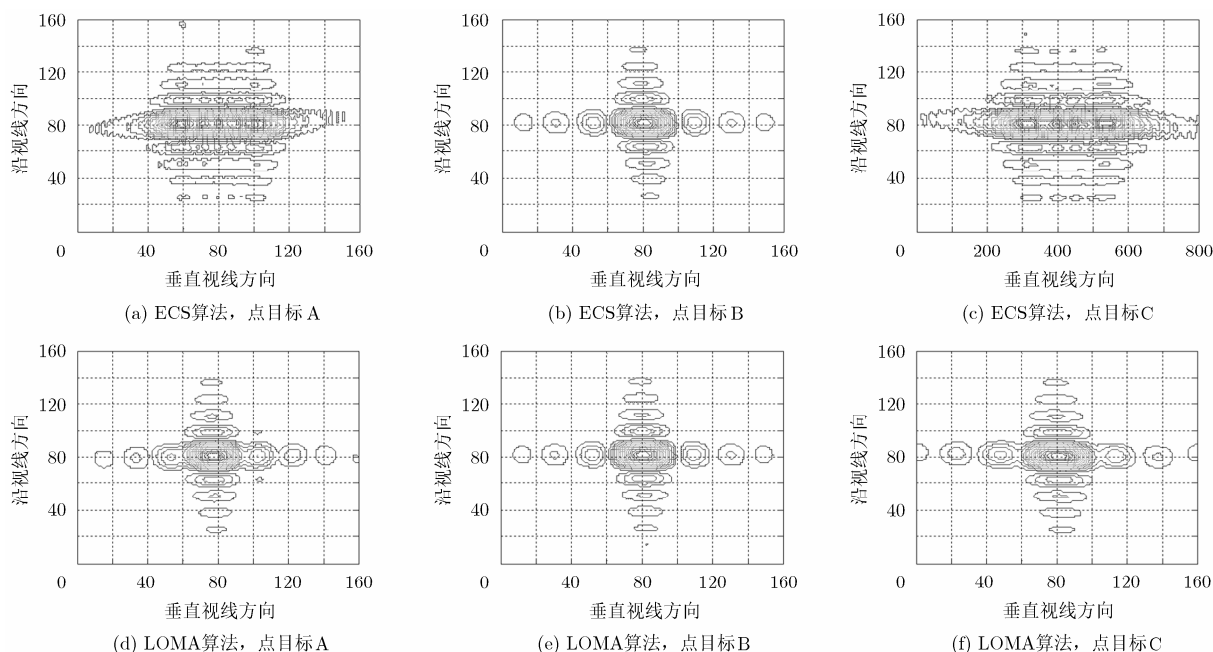


图11 ECS算法和LOMA算法的方位压缩结果对比

以参考文献[17]中的分析内容。

对图 11 中的点目标进行聚焦效果评估(由于 ECS 算法的点目标 A 和 C 散焦太严重,无法进行评估),地距分辨率、峰值旁瓣比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR)评估结果如表 2 所示。从表中可以看出,LOMA 算法的点目标 A 和 C 垂直视线方向有略微散焦,主要原因是方位频域补偿引起的 2 次相位误差(如图 6 所示),点目标的副瓣水平与该 2 次相位误差相一致。通过减小垂直视线方向的幅宽可以降低该 2 次相位误差,利用方位加窗处理也可以减弱该 2 次相位误差对方位聚焦的影响。

5 结束语

本文提出了一种适用于中低分辨率的斜视 SAR

子孔径成像的 LOMA 算法,该算法创造性地利用局部最优匹配准则构造成像处理中的匹配函数,能够保证每个目标在其方位频谱中心位置达到距离徙动校正、2 次距离压缩和相位补偿的最佳实现,明显改善了方位边缘点目标的聚焦效果。点目标仿真的对比结果验证了 LOMA 算法的对图像质量的改善效果。本文的 LOMA 算法之所以能够利用局部最优匹配准则,主要是因为斜视子孔径成像处理具有“同一距离门内点目标在多普勒域支撑域不同”的特点。因此,LOMA 算法的适用范围并不局限于斜视子孔径成像,只要具有类似特点的成像模式,例如 TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans)模式、小子孔径宽波束成像模式等,都可以考虑使用 LOMA 算法进行成像处理。

表 2 点目标仿真成像结果评估

成像算法	点目标	垂直视线方向			沿视线方向		
		分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
ECS	B	2.01	-13.25	-10.21	2.07	-13.21	-10.34
	A	2.04	-10.56	-8.50	2.01	-13.56	-10.62
LOMA	B	2.06	-13.29	-10.21	2.07	-13.39	-10.40
	C	2.19	-11.62	-9.42	2.06	-13.54	-10.59

参 考 文 献

- [1] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989, 第 1 章.
- [2] CURLANDER C John and MCDONOUGH N Robert. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing[M]. New York: John Wiley & Sons, 1991, Chapter 1.
- [3] 董祺, 杨泽民, 李震宇, 等. 基于方位空变斜距模型的大斜视机动平台波数域 SAR 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3166-3173. doi: 10.11999/JEIT160785.
- [4] 董祺, YANG Zemin, LI Zhenyu, et al. Wavenumber-domain imaging algorithm for high squint SAR based on azimuth variation range model [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3166-3173. doi: 10.11999/JEIT160785.
- [5] 聂鑫. 变波门大斜视滑动聚束 SAR 成像关键技术分析[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3122-3128. doi: 10.11999/JEIT160812.
- [6] NIE Xin. Research on key technique of highly squinted sliding spotlight SAR imaging with varied receiving range bin[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3122-3128. doi: 10.11999/JEIT160812.
- [7] 董祺, 邢孟道, 李震宇, 等. 一种基于坐标轴旋转的俯冲段大斜视 SAR 波数域成像算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3137-3143. doi: 10.11999/JEIT160784.
- [8] DONG Qi, XING Mengdao, LI Zhenyu, et al. Wavenumber-domain imaging algorithm for high squint diving SAR based on axes rotation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3137-3143. doi: 10.11999/JEIT160784.
- [9] WONG H Frank and YEO Soon tat. New applications of nonlinear chirp scaling in SAR data processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(5): 946-953. doi: 10.1109/36.921412.
- [10] SUN Guangcai, JIANG Xiuwei, XING Mengdao, et al. Focus improvement of highly squinted data based on azimuth nonlinear scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 2308-2322. doi: 10.1109/TGRS.2010.2102040.
- [11] AN Daoxiang, HUANG Xiaotao, JIN Tian, et al. Extended nonlinear chirp scaling algorithm for high-resolution highly squint SAR data focusing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(9): 3595-3609. doi: 10.1109/TGRS.2012.2183606.
- [12] 刘高高, 张林让, 刘昕, 等. 一种曲线轨迹下的大场景前斜视成像算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 628-633. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00575.
- [13] LIU Gaogao, ZHANG Linrang, LIU Xin, et al. Missile-borne large region squint SAR algorithm based on a curve trajectory[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3): 628-633. doi: 10.3724/SP.J.1146.

- 2010.00575.
- [10] CUMMING G Ian and WONG H Frank. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data[M]. Norwood MA: Artech House Inc., 2005, Chapter 9.
- [11] SACK M, ITO M R, and CUMMING I G Application of efficient linear FM matched filtering algorithms to synthetic aperture radar processing[J]. *IEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing)*, 1985, 132(1): 45–57. doi: 10.1049/ip-f-1:19850006.
- [12] MOREIRA Alberto, MITTERMAYER Josef, and SCHEIBER Rolf. Extended chirp scaling algorithm for air-and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123–1136. doi: 10.1109/36.536528.
- [13] 李震宇, 梁毅, 邢孟道, 等. 弹载合成孔径雷达大斜视子孔径频域相位滤波成像算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 953–960. doi: 10.11999/JEIT140618.
- LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, *et al.* A frequency phase filtering imaging algorithm for highly squint missile-borne synthetic aperture radar with subaperture[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 953–960. doi: 10.11999/JEIT140618.
- [14] 李震宇, 梁毅, 邢孟道, 等. 一种俯冲段子孔径 SAR 大斜视成像及几何校正方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1814–1820. doi: 10.11999/JEIT141516.
- LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, *et al.* New subaperture imaging algorithm and geometric correction method for high squint diving SAR based on equivalent squint model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1814–1820. doi: 10.11999/JEIT141516.
- [15] ZENG Tao, LI Yinghe, DING Zegang, *et al.* Subaperture approach based on azimuth-dependent range cell migration correction and azimuth focusing parameter equalization for maneuvering high-squint-mode SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(12): 6718–6734. doi: 10.1109/TGRS.2015.2447393.
- [16] 怀园园, 梁毅, 李震宇, 等. 一种基于方位谱重采样的大斜视子孔径 SAR 成像改进 Omega-K 算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1744–1750. doi: 10.11999/JEIT141383.
- HUAI Yuanyuan, LIANG Yi, LI Zhenyu, *et al.* Modified Omega-K algorithm for sub-aperture high squint SAR imaging based on azimuth resampling[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(7): 1744–1750. doi: 10.11999/JEIT141383.
- [17] LONG Teng, LI Yinghe, and DING Zegang. Interpolation method for geometric correction in highly squint synthetic aperture radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(7): 620–626. doi: 10.1049/iet-rsn.2011.0313.
- 孙宁霄: 男, 1987年生, 博士, 研究方向为合成孔径雷达信号处理及成像算法、极化 SAR 理论研究与应用.
- 吴琼之: 男, 1977年生, 讲师, 博士, 研究方向为雷达信号处理与存储、合成孔径雷达成像算法.
- 孙林: 男, 1987年生, 助理实验师, 硕士, 研究方向为合成孔径雷达系统设计、合成孔径雷达实时成像处理.