

基于子图像变标的非线性轨迹SAR成像及其自聚焦方法

陈溅来^{*①} 熊毅^{*①} 徐刚^② 张俊超^① 杨德贵^① 梁步阁^①

^①(中南大学自动化学院 长沙 410083)

^②(东南大学毫米波国家重点实验室 南京 210000)

摘要: 合成孔径雷达(SAR)的非线性轨迹运动可能会在雷达回波信号中引入严重的二维空变特性,因此基于方位平移不变性假设的传统频域成像算法不再适用于非线性轨迹SAR的高精度成像。现有非线性轨迹SAR成像算法通常采用复杂的非线性变标(NCS)校正回波信号的方位空变特性,然而NCS参数过多导致算法复杂,使得其当存在较大平台运动测量误差时无法与现有自聚焦算法有效结合。针对该问题,该文提出一种基于子图像NCS的非线性轨迹SAR成像及其自聚焦方法,在保证成像精度的前提下能够减少NCS的参数数量,更有利于后续自聚焦处理。仿真与实测数据处理验证了所提方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 非线性轨迹; 非线性变标(NCS); 二维空变; 自聚焦

中图分类号: TN955

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2022)06-1098-12

DOI: 10.12000/JR22171

引用格式: 陈溅来,熊毅,徐刚,等. 基于子图像变标的非线性轨迹SAR成像及其自聚焦方法[J]. 雷达学报, 2022, 11(6): 1098–1109. doi: 10.12000/JR22171.

Reference format: CHEN Jianlai, XIONG Yi, XU Gang, *et al.* Nonlinear trajectory synthetic aperture radar imaging and autofocus algorithm based on sub-image nonlinear chirp scaling[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(6): 1098–1109. doi: 10.12000/JR22171.

Nonlinear Trajectory Synthetic Aperture Radar Imaging and Autofocus Algorithm Based on Sub-image Nonlinear Chirp Scaling

CHEN Jianlai^{*①} XIONG Yi^{*①} XU Gang^② ZHANG Junchao^①
YANG Degui^① LIANG Buge^①

^①(School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

^②(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210000, China)

Abstract: The radar echo signal may experience substantial two-dimensional spatial variance due to the nonlinear Synthetic Aperture Radar (SAR) trajectory. The traditional frequency-domain imaging algorithms based on the assumption of azimuth translational invariance are unsuitable for high-precision imaging of nonlinear trajectory SAR. Therefore, for nonlinear trajectory SAR imaging, the azimuth spatial variance of the echo signals is typically rectified using complex Nonlinear Chirp Scaling (NCS). However, when there are substantial motion errors, it cannot be effectively combined with the current autofocus algorithms considering the complexity of the algorithm due to too many NCS parameters. Thus, to address this issue, this study proposes a nonlinear trajectory SAR imaging and autofocus method according to the sub-image NCS, which can reduce the number of NCS parameters and ensure imaging accuracy; moreover, it is more conducive to the subsequent autofocus processing. The effectiveness of the suggested approach is confirmed by simulation and measured data processing.

收稿日期: 2022-08-23; 改回日期: 2022-11-16; 网络出版: 2022-11-24

*通信作者: 熊毅 XY639692@163.com; 陈溅来 jianlaichen@163.com

*Corresponding Authors: XIONG Yi, XY639692@163.com; CHEN Jianlai, jianlaichen@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61901531, 62271510, 62105372, 62171475)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61901531, 62271510, 62105372, 62171475)

责任编辑: 仇晓兰 Corresponding Editor: QIU Xiaolan

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Nonlinear trajectory; Nonlinear Chirp Scaling (NCS); Two-dimensional spatial-variant; Autofocus

1 引言

非线性轨迹合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的应用越来越广泛, 主要包括机载SAR^[1-5]、弹载SAR^[6]、超高分辨率低轨道星载SAR^[7]、中高轨道星载SAR^[8]等。非线性轨迹特性能够大幅提升雷达获取目标信息的能力, 同时也增加了后续成像处理的难度, 主要原因在于非线性轨迹使得雷达回波信号不再满足方位平移不变特性, 需要在标准成像算法的基础上额外增加复杂的信号处理步骤以校正信号的方位空变特性。需要指出的是, 标准成像算法能够有效校正信号的距离空变特性, 然而对于信号的方位空变特性, 其校正精度通常较差。下面将主要讨论信号的方位空变特性及其校正方法。

目前能够处理信号方位空变的成像算法主要包括时域类算法、插值类算法和变标类算法。其中时域类成像算法比如后向投影(Back Projection, BP)算法理论上不存在近似, 适用于任意情形下的成像处理, 然而其计算效率较低。快速BP算法能够进一步提升计算效率, 然而其在加速过程中引入了一些近似, 依然会存在一定的局限性, 且时域类成像算法较难与自聚焦算法有效结合^[9]; 插值类算法主要通过插值处理校正信号的方位空变特性, 目前已有学者将插值类算法用于方位空变的校正^[10,11], 然而插值操作使得其成像效率依然较低, 而且插值核的精度也很难得到保证, 另外插值类算法难以实现良好的保相性, 不利于后续的干涉处理应用等; 变标类算法主要通过变标的原理将成像区域内所有目标信号的特性校正为与参考目标一致, 完成信号空变特性校正, 该类算法无需插值运算、成像效率高, 被广泛应用于SAR数据的成像处理。另外, 子孔径处理也是一种常用的SAR方位空变补偿手段, 比如典型的PTA, SATA和FD算法^[12], 该类方法通过子孔径分块策略保证子孔径内的信号不存在方位空变特性, 即将子孔径内的误差进行常数建模, 因此这类子孔径处理策略需要将全孔径数据划分为大量的子孔径数据, 可能会带来严重的图像拼缝或

栅瓣等问题。基于以上考虑, 本文基于变标类算法提出了一种非线性轨迹SAR高精度成像方法。

一般而言, 线性调频变标(Chirp Scaling, CS)适用于校正信号的距离空变特性, 而非线性调频变标算法(Nonlinear CS, NCS)常用于校正信号的方位空变特性^[13,14]。也有学者在大斜视模式下将NCS同时用于距离空变和方位空变校正^[15]。在方位空变校正方面, 目前的主流算法^[15-19]通常引入较高阶数的变标函数, 主要依据是更高阶数的变标函数能够处理更为复杂的方位空变特性, 然而高阶多项式通常会引入信号中原本不存在的方位空变特性^[20], 使得其需要进一步引入额外的变标处理才能校正新引入的方位空变特性^[17]。这类成像算法面临的一个共性问题是引入的变标参数过多, 当存在较大运动误差时大大增加了与标准自聚焦方法有效结合的难度, 成像效率和精度都难以保证。针对该问题, 本文提出了一种基于子图像NCS的非线性轨迹SAR成像及其自聚焦方法, 该方法通过子图像分割的方式降低了算法的复杂度, 并且减少了变标处理过程中需引入的参数数量, 从而解决了现有NCS方法存在的参数数量过多的问题。另外, 本文结合所提子图像NCS算法, 进一步针对实测数据处理建立了一种基于误差最小化准则的最优化自聚焦模型, 该模型将自聚焦处理等效建模为求解两个一维优化问题, 有效保证了自聚焦处理的效率和稳健性。仿真和实测数据处理结果也表明了所提算法有效降低自聚焦成像的复杂度, 为非线性轨迹成像与自聚焦处理的结合提供了有效的成像算法基础。

2 信号建模与问题分析

2.1 信号建模

为了一般性分析, 以双基非线性轨迹SAR成像几何为例, 如图1所示。发射机和接收机均做非线性轨迹运动, 因此两者均存在一个三维空间加速度。 $P(x_n, y_n, z_n)$ 是场景里任意一个目标, 其中 (x_n, y_n, z_n) 为目标 P 的三维坐标。 $R_T(t_a)$ 和 $R_R(t_a)$ 分别表示发射机和接收机到点目标 P 的瞬时距离, 分别可以表示为

$$R_T(t_a) = \sqrt{\left(x_t + v_{xt}t_a + \frac{1}{2}a_{xt}t_a^2 - x_n\right)^2 + \left(y_t + v_{yt}t_a + \frac{1}{2}a_{yt}t_a^2 - y_n\right)^2 + \left(z_t + v_{zt}t_a + \frac{1}{2}a_{zt}t_a^2 - z_n\right)^2} \quad (1)$$

$$R_R(t_a) = \sqrt{\left(x_r + v_{xr}t_a + \frac{1}{2}a_{xr}t_a^2 - x_n\right)^2 + \left(y_r + v_{yr}t_a + \frac{1}{2}a_{yr}t_a^2 - y_n\right)^2 + \left(z_r + v_{zr}t_a + \frac{1}{2}a_{zr}t_a^2 - z_n\right)^2} \quad (2)$$

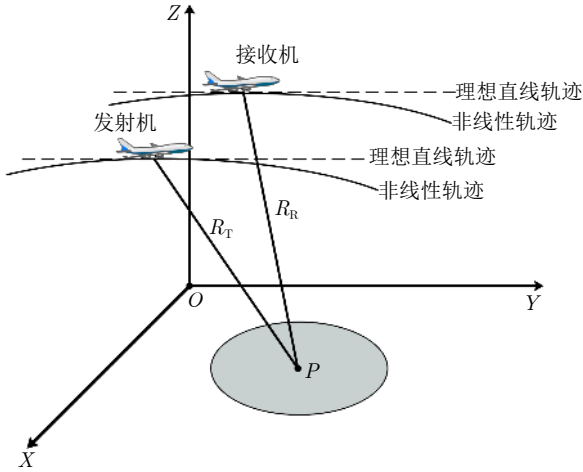


图 1 双基非线性轨迹SAR几何构型

Fig. 1 Geometric configuration of bistatic nonlinear trajectory SAR

其中, t_a 表示方位时间, (x_t, y_t, z_t) 和 (x_r, y_r, z_r) 分别表示发射机和接收机的三维坐标, (v_{xt}, v_{yt}, v_{zt}) 和 (v_{xr}, v_{yr}, v_{zr}) 分别表示发射机和接收机在X轴、Y轴、Z轴的初速度, (a_{xt}, a_{yt}, a_{zt}) 和 (a_{xr}, a_{yr}, a_{zr}) 分别表示发射机和接收机在X轴、Y轴、Z轴的加速度。因此, 目标P的双程斜距可表示为

$$R(t_a) = R_T(t_a) + R_R(t_a) \quad (3)$$

式(3)中的斜距模型为严格的解析形式, 然而由于其表达式为双根号形式, 不利于后续的成像算法的设计。根据文献[21]中的运动补偿原理, 双基SAR的斜距历程可以表示为

$$R(t_a) = R_0(t_a) + \Delta R(t_a) \quad (4)$$

其中, $R_0(t_a) = \sqrt{R_s^2 + (v(t_a - t_0))^2}$ 为标准的双曲线斜距模型, 其中 R_s, v, t_0 分别为双曲线斜距模型下的最近斜距、雷达运动速度和零多普勒时刻, $\Delta R(t_a)$ 为双曲线形式下的近似误差。一般情况下, 该近似误差与目标的空间位置相关, 即具有二维空变特性。对于距离空变的近似误差, 可以采用经典的two-step MoCo方法[6,22]进行补偿, 也可将该近似误差的距离空变特性看作距离徙动的一部分, 采用标准的成像算法完成校正。因此, 为了方便后续问题的分析, 本文暂不考虑近似误差的距离空变特性。接下讨论如何校正近似误差的方位空变特性。

2.2 问题分析

将式(4)中的斜距模型整理为

$$R(t_a) = R_0(t_a) + \Delta R(t_a) \approx R_0(t_a) + a_0(t_a - t_0)^2 + b_0(t_a - t_0)^3 \quad (5)$$

其中, a_0, b_0 分别为2次和3次误差的系数。在后续的推导过程中, 信号均可表示为: $ss(t_a) =$

$\exp(-j2\pi/\lambda R(t_a))$ 。需要指出的是, 经过不同的处理步骤后, 仅斜距 $R(t_a)$ 发生了变化。另外, 这里仅给出了距离徙动校正后的方位信号。式(5)中, 我们忽略了3次以上的误差项, 其中2次和3次误差均与目标的方位位置有关, 即他们的系数与 t_0 有关, 将其建模为1阶空变, 即

$$\begin{cases} a_0 \approx a_{00} + a_{01}t_0 \\ b_0 \approx b_{00} + b_{01}t_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $a_{00}, a_{01}, b_{00}, b_{01}$ 均为常数。为了校正近似误差的方位空变特性, 常规的匹配滤波无法发挥作用, 需要引入高阶变标函数对式(5)中的斜距模型进行变标处理。为此, 首先在时域引入一个纯3阶多项式变标函数并将其整理为

$$\begin{aligned} H_{3rd}(t_a) &= \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\alpha t_a^3\right) \\ &= \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\alpha\left((t_a - t_0)^3 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 3t_0(t_a - t_0)^2 + 3t_0^2(t_a - t_0) + t_0^3\right)\right) \quad (7) \end{aligned}$$

根据式(5)和式(6)可知未加入3次变标函数前, 1阶空变的2次误差的系数为 a_{01} 。因此, 进一步结合式(7)可知, 当 $\alpha = -a_{01}/3$ 时, 引入式(7)中的3次变标函数可以有效校正2次误差的1阶方位空变特性, 如式(7)中的标红部分。然而需要注意的是, 式(7)中的变标函数会额外引入一个2阶空变的1次误差, 即 $3t_0^2(t_a - t_0)$, 当将信号从方位时域变换到方位频域时, 该2阶空变的1次误差对信号的方位空变特性具有一定的调制作用。可以看到, 纯3阶多项式变标函数无法校正空变的3次误差, 因此这类非线性变标算法的精度较低[13,14]。

接着, 为了校正式(5)中3次近似误差的方位空变特性, 需要引入一个纯4阶多项式变标函数并将其整理为

$$\begin{aligned} H_{4th}(t_a) &= \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\beta t_a^4\right) \\ &= \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\beta\left((t_a - t_0)^4 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 4t_0(t_a - t_0)^3 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 6t_0^2(t_a - t_0)^2 + 4t_0^3(t_a - t_0) + t_0^4\right)\right) \quad (8) \end{aligned}$$

根据式(5)和式(6)可知未加入3次变标函数前, 1阶空变的3次误差的系数为 b_{01} 。因此, 进一步结合式(8)可知, 当 $\beta = -b_{01}/4$ 时, 引入式(8)中的4阶变标函数可以有效校正3次误差的1阶方位空变特性, 如式(8)中的标红部分。需要指出的是, 式(8)中的变标函数会额外引入一个2阶空变的2次误差以及3阶空变的1次误差, 即 $6t_0^2(t_a - t_0)^2$ 和 $4t_0^3(t_a - t_0)$ 。新

引入的2次误差会严重影响目标的聚焦质量，新引入的1次误差对信号的方位频谱的空变特性具有一定的调制作用。

综上所述，通过引入纯3阶变标函数可以校正1阶空变的2次误差，引入纯4阶变标函数能够校正1阶空变的3次误差，然而其可能会引入较大的2阶空变的2次误差，严重影响图像边缘的聚焦质量。同时，变标函数新引入的空变1次误差对方位频域的信号空变特性也具有一定的调制作用。另外，当场景较大或者运动误差特别严重时，雷达原始回波中也可能会存在高阶空变(2阶及以上)的高次误差。针对这些问题，现有的方法通常是在频域引入扰动因子，相当于在时域引入一个2阶空变的2次项以补偿纯3阶和4阶变标函数新引入的空变项^[17]。这类方法能够提高图像边缘的聚焦质量，然而增加了变标函数和扰动因子的参数数量，在雷达运动轨迹测量精度不够高的情况下，这些参数通常是不精确或未知的，需要通过优化迭代搜索得到，且属于高维优化问题，存在求解复杂度高问题。在这种情形下，参数的个数决定了其优化求解的难度以及收敛性，因此过多的未知参数给参数的优化求解带了极大的困难。因此，本文提出了一种基于子图像NCS的非线性轨迹成像方法，在保证成像精度的基础上尽量减少变标函数或扰动因子的参数个数。该方法第1步通过引入纯4阶变标函数，校正3次误差的1阶空变特性。第2步是对于新引入的2阶空变的2次误差以及原本存在的1阶空变的2次误差，通过在图像域的分块

处理将2阶空变特性在子块内近似为1阶空变，接着对每一个子图像引入纯3阶变标函数，从而避免了参数过多的问题。相比于经典方法^[17]，变标函数或扰动因子的参数从5个降到了2个。需要指出的是，由于1阶空变的2次误差占主导地位，本文方法所需分块数量较少，整个图像不会出现明显的拼缝等问题。

3 基于子图像NCS的非线性轨迹SAR成像方法

图2给出了基于子图像NCS的非线性轨迹成像及其自聚焦方法的流程图，整个算法主要分为3部分：首先是距离徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)，主要是校正信号的距离空变特性，本文将不再详细阐述，具体处理方法可参考文献^[22]；其次是引入第1步NCS处理，采用纯4阶变标函数校正1阶空变的3次误差；最后是引入第2步NCS处理，在子图像分割的基础上，采用纯3阶变标函数校正子图像内的1阶空变的2次误差。需要注意的是，对于实测数据，当雷达运动轨迹测量存在误差时，需要通过迭代优化的方式估计上述两步NCS函数的系数，因此对于实测数据处理需要进一步增加自聚焦处理的步骤(即流程图中两个虚线矩形框的操作)，具体的自聚焦处理步骤将在实测数据处理部分详细描述。

3.1 第1步NCS处理

对于第1步NCS处理，需要引入式(8)中的纯4阶变标函数，这样式(5)中的斜距模型可以整理为

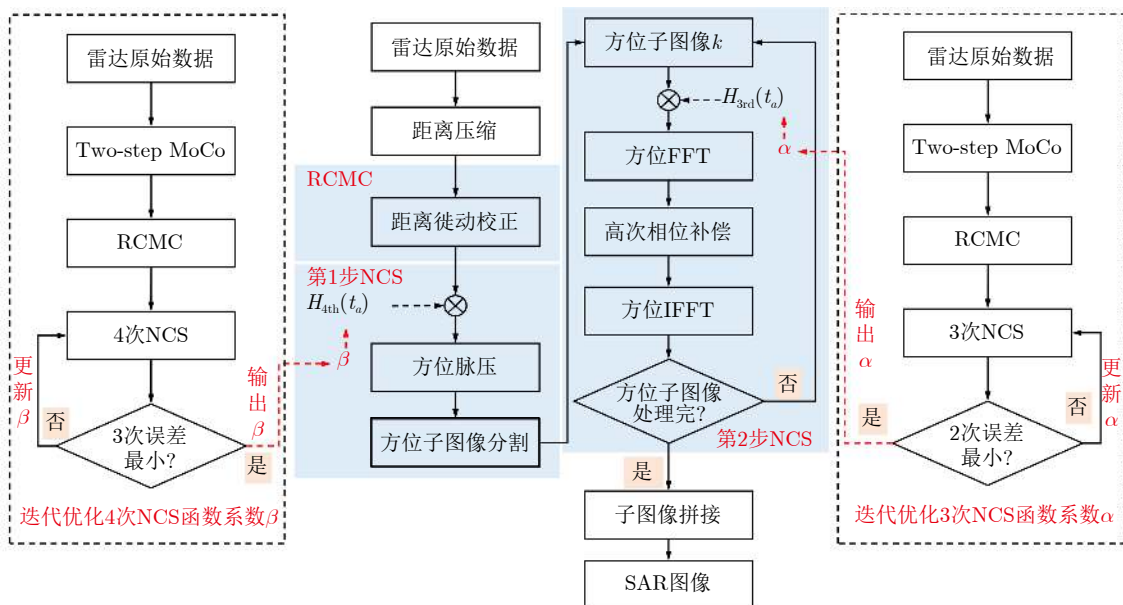


图2 所提算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the proposed algorithm

$$\begin{aligned}
R_{\text{NCS}}^1(t_a) \approx & R_0(t_a) + \underbrace{a_{00}(t_a - t_0)^2 + b_{00}(t_a - t_0)^3 + \beta(t_a - t_0)^4}_{R_1} + \underbrace{b_{01}t_0(t_a - t_0)^3 + 4\beta t_0(t_a - t_0)^3}_{R_2} \\
& + \underbrace{a_{01}t_0(t_a - t_0)^2 + 6\beta t_0^2(t_a - t_0)^2}_{R_3} + \underbrace{4\beta t_0^3(t_a - t_0) + \beta t_0^4}_{R_4}
\end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中的下标“NCS”表示NCS处理，上标“1”表示第1步NCS处理。从式(9)可以看到，标记的第1项 R_1 不存在方位空变，通过将信号变换到方位频域并进行匹配滤波即可补偿该项引入的误差；标记的第2项 R_2 为方位空变的3次误差，通过调整第1步NCS中的参数 β 即可消除这一项引入的误差，可以清晰地看到当 $\beta = -b_{01}/4$ 时，第2项引入的误差为0；标记的第3项 R_3 为方位空变的2次误差，需要通过引入第2步NCS处理补偿该项引入的误差。

3.2 第2步NCS处理

第1步NCS处理校正了空变的3次误差，对于剩余空变的2次误差，引入第2步NCS处理。第1步NCS处理后的斜距可以表示为

$$\begin{aligned}
R_{\text{NCS}}^1(t_a) \approx & R_0(t_a) + a_{00}(t_a - t_0)^2 + b_{00}(t_a - t_0)^3 + \beta(t_a - t_0)^4 + a_{01}t_0(t_a - t_0)^2 \\
& + 6\beta t_0^2(t_a - t_0)^2 + 4\beta t_0^3(t_a - t_0) + \beta t_0^4
\end{aligned} \quad (10)$$

接下来引入第2步NCS处理，引入式(7)中的纯3阶变标函数后的斜距可以整理为

$$\begin{aligned}
R_{\text{NCS}}^2(t_a) \approx & R_0(t_a) + \underbrace{a_{00}(t_a - t_0)^2 + b_{00}(t_a - t_0)^3 + \alpha(t_a - t_0)^3 + \beta(t_a - t_0)^4}_{R_5} \\
& + \underbrace{a_{01}t_0(t_a - t_0)^2 + 6\beta t_0^2(t_a - t_0)^2 + 3\alpha t_0(t_a - t_0)^2}_{R_6} + \underbrace{3\alpha t_0^2(t_a - t_0) + 4\beta t_0^3(t_a - t_0) + \alpha t_0^3 + \beta t_0^4}_{R_7}
\end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中的上标“2”表示第2步NCS处理，式中标记的第1项 R_5 不存在方位空变；第2项 R_6 中存在空变的2次误差，可以看到通过调整参数 α 可以消除1阶空变的2次误差，然而无法消除2阶空变的2次误差。考虑到2次误差的1阶空变特性占据主导地位，我们可以通过将整个图像在方位向进行分块处理，使得所有子图内的空变特性近似为1阶空变。需要注意的是，子图像数量越多，方位空变校正的精度越高，但会影响成像效率并引入明显的图像拼缝等问题，因此我们需要在图像分割的数量上进行综合考虑。综上所述，图3给出了通过子图像分割策略校正2次误差的2阶空变特性的示意图。

接下来，我们首先分析 R_6 的影响，对于第 k 个子图像： $t_0 = t_k + t_k^{\text{ref}}$ ，其中 t_k 为子图像对应的时间， t_k^{ref} 表示第 k 个子图像的中心时间，则第 k 个子图像的 R_6 可以整理表示为

$$\begin{aligned}
R_6 = & a_{01}(t_k + t_k^{\text{ref}})(t_a - t_0)^2 + 6\beta(t_k + t_k^{\text{ref}})^2(t_a - t_0)^2 + 3\alpha(t_k + t_k^{\text{ref}})(t_a - t_0)^2 \\
= & \left(a_{01}t_k^{\text{ref}} + 3\alpha t_k^{\text{ref}} + 6\beta(t_k^{\text{ref}})^2 \right) (t_a - t_0)^2 + (a_{01} + 3\alpha + 12\beta t_k^{\text{ref}}) t_k(t_a - t_0)^2 + 6\beta t_k^2(t_a - t_0)^2
\end{aligned} \quad (12)$$

从式(12)可以看到，第2个等号后的第1项不存在方位空变，第2项中仅存在1阶空变的2次误差，第3项为2阶空变的2次误差。由于采用了子图像分割处理，每一个子图像的大小相比于全图像要小得多，即满足 $t_k^2 \ll t_0^2$ ，因此子图像内的2阶空变的2次误差可以忽略不计，则第 k 个子图像的斜距可以表示为

$$\begin{aligned}
R_{\text{NCS}}^2(t_a) \approx & R_0(t_a) + \underbrace{a_{00}(t_a - t_0)^2 + b_{00}(t_a - t_0)^3 + \alpha(t_a - t_0)^3 + \beta(t_a - t_0)^4}_{R_5} \\
& + \underbrace{\left(a_{01}t_k^{\text{ref}} + 3\alpha t_k^{\text{ref}} + 6\beta(t_k^{\text{ref}})^2 \right) (t_a - t_0)^2 + (a_{01} + 3\alpha + 12\beta t_k^{\text{ref}}) t_k(t_a - t_0)^2}_{R_6} \\
& + \underbrace{3\alpha t_0^2(t_a - t_0) + 4\beta t_0^3(t_a - t_0) + \alpha t_0^3 + \beta t_0^4}_{R_7}
\end{aligned} \quad (13)$$

从式(13)可以看到，为了消除2次误差的1阶空变特性，需要满足 $\alpha = -(a_{01} + 12\beta t_k^{\text{ref}})/3$ ，在此条件下的式(13)可以表示为

$$R_{\text{NCS}}^2(t_a) \approx R_0(t_a) + \underbrace{a_{00}(t_a - t_0)^2 + b_{00}(t_a - t_0)^3 + \alpha(t_a - t_0)^3 + \beta(t_a - t_0)^4}_{R_5} + \underbrace{\left(a_{01}t_k^{\text{ref}} + 3\alpha t_k^{\text{ref}} + 6\beta(t_k^{\text{ref}})^2 \right) (t_a - t_0)^2}_{R_6} + \underbrace{3\alpha t_0^2 (t_a - t_0) + 4\beta t_0^3 (t_a - t_0) + \alpha t_0^3 + \beta t_0^4}_{R_7} \quad (14)$$

从式(14)可以看到只存在不空变的2次及以上误差，然而需要注意的是，式(14)中方位空变的1次误差对方位频谱的空变特性具有一定的调制作用，可能会导致信号在方位频域的高次相位依然存在方位空变，无法通过匹配滤波进行消除。幸运的是，子图像分割处理不仅能解决2次误差的2阶空变特性，也能克服1次误差的2阶及3阶空变特性。特别需要提到的是，式(5)和式(6)中的误差建模也存在一定的近似，子图像分割处理还能减少这些近似对聚焦质量的影响，从而可以大幅降低算法的复杂度。采用 R_6 同样的近似方式对 R_7 进行处理后，式(14)可以表示为

$$R_{\text{NCS}}^2(t_a) \approx R_0(t_a) + \underbrace{a_{00}(t_a - t_0)^2 + b_{00}(t_a - t_0)^3 + \alpha(t_a - t_0)^3 + \beta(t_a - t_0)^4}_{R_5} + \underbrace{\left(a_{01}t_k^{\text{ref}} + 3\alpha t_k^{\text{ref}} + 6\beta(t_k^{\text{ref}})^2 \right) (t_a - t_0)^2}_{R_6} + \underbrace{3\alpha t_k^2 (t_a - t_0) + 4\beta t_k^3 (t_a - t_0) + \alpha t_0^3 + \beta t_0^4}_{R_7} \quad (15)$$

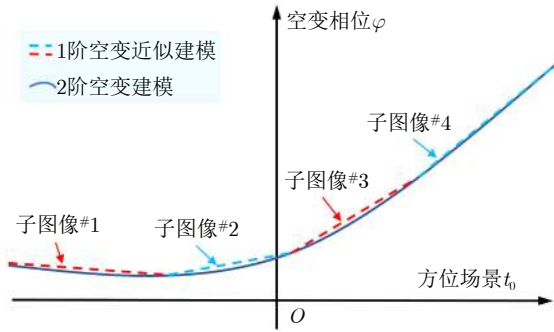


图3 2次误差的2阶空变特性校正示意图

Fig. 3 Schematic diagram for the second-order spatial-variant characteristic correction of quadratic error

可以看出式(15)中已不存在任何的空变项，故将式(14)对应的信号变换到方位频域进行统一匹配滤波即可实现精确聚焦。需要注意的是，对于正侧视模式，式(5)中的斜距建模可以忽略关于 $t_a - t_0$ 的1次项对成像的影响。若雷达系统存在较大的斜视角，则该一次项会引入明显的目标聚焦位置偏移，严重影响整个图像的拼接效果。因此，针对斜视观测模式仍需对所提算法做进一步的修正，以补偿该一次项带来的位置偏移。

3.3 分块策略分析

图像分块的数量会影响自聚焦成像的效率和精度，确定子图像数量的关键是确保所有子图像在第2步NCS处理后场景边缘目标的最大剩余空变误差小于 $\pi/4$ ，同时取满足条件的最小整数，即

$$\max \{ \phi_{\text{NCS}}^2(N, t_a) \} \leq \frac{\pi}{4} \quad (16)$$

其中， N 表示子图像数量，且满足 $N = t_0/t_k$ ， $\phi_{\text{NCS}}^2(N, t_a)$ 表示两步NCS处理后子图像内的剩余空

变相位。根据表1的仿真参数，图4展示了场景边缘左端目标的剩余空变相位随子图像数量的变化曲线，可以看出当子图像数量不小于5时即可满足式(16)中的误差限制条件。

4 仿真与实测数据结果

4.1 仿真数据结果

本小节采用仿真数据验证所提方法的有效性，仿真参数如表1所示。我们对比了统一匹配滤波、通用的 N 阶多项式NCS算法^[18]、本文算法的仿真结果。图5展示了方位场景边缘左端目标的等高线图、方位剖面图、距离剖面图，图6为场景边缘右端目标的成像结果，表2给出了成像质量的定量评估结果，包括峰值旁瓣比(Peak Side-Lobe Ratio, PSLR)、积分旁瓣比(Integrated Side-Lobe Ratio, ISLR)、图像熵值。综合图5(a)—图5(c)、图6(a)—

表1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	发射机	接收机
初速度	(48.3, 13.6, 0) m/s	(48.2, 13.5, 0) m/s
加速度	(-0.05, -0.01, 0) m/s ²	(-0.05, -0.01, 0) m/s ²
载频	16 GHz	
PRF	1000 Hz	
带宽	1400 MHz	
合成孔径时间	24 s	
方位分辨率	0.1 m	
最近斜距	17.5 km	
工作模式	聚束	
斜视角	0°	

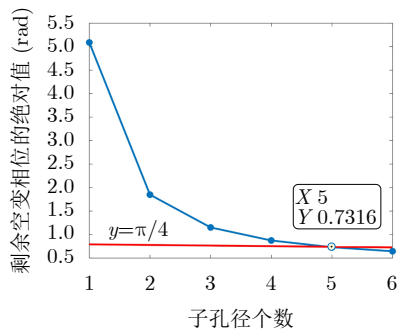


图 4 剩余空变相位随子图像数量的变化

Fig. 4 Change of residual spatial-variant phase with the number of sub images

图6(c)和表2可以看出, 匹配滤波后信号的方位空变特性明显, 场景边缘点目标存在严重的散焦现象, 这是由于原始雷达回波中存在严重的空变2阶和3阶误差; 通用的 M 阶多项式NCS算法能够提升目标的聚焦质量, 然而随着NCS阶数的增加, 该算法将会引入新的空变相位误差, 导致场景边缘点依然存在一定的散焦现象; 所提方法基于子图像分割处理无需引入新的变标或扰动因子, 能够补偿高阶NCS新引入的空变相位误差, 进一步提升了场景边缘目标的聚焦质量, 验证了所提算法的有效性。另外, 通过仿真分析了所提算法引入的位置偏移问题,

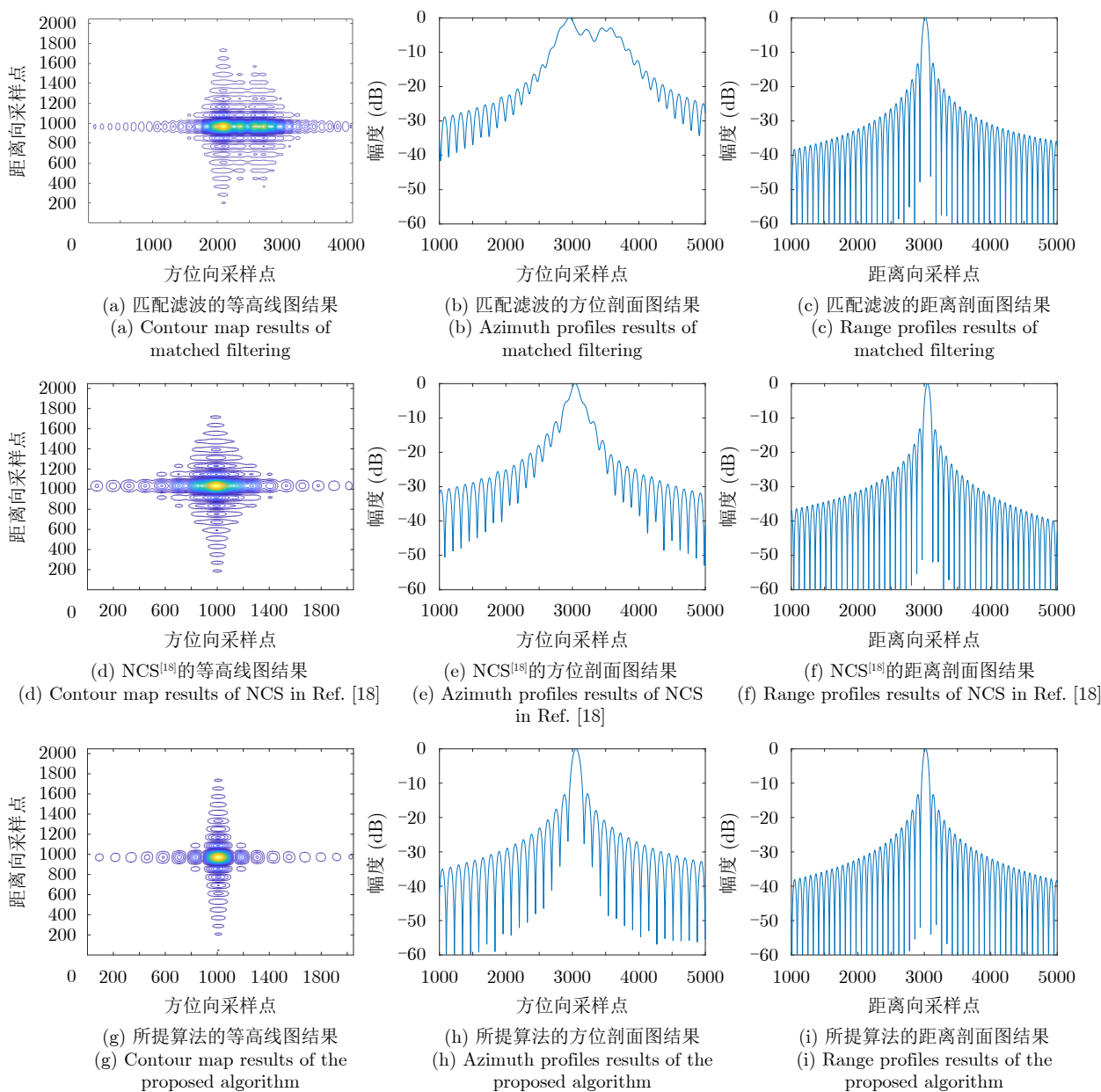


图 5 场景左端点目标仿真数据处理结果

Fig. 5 The simulation data processing results of the left edge target in the scene

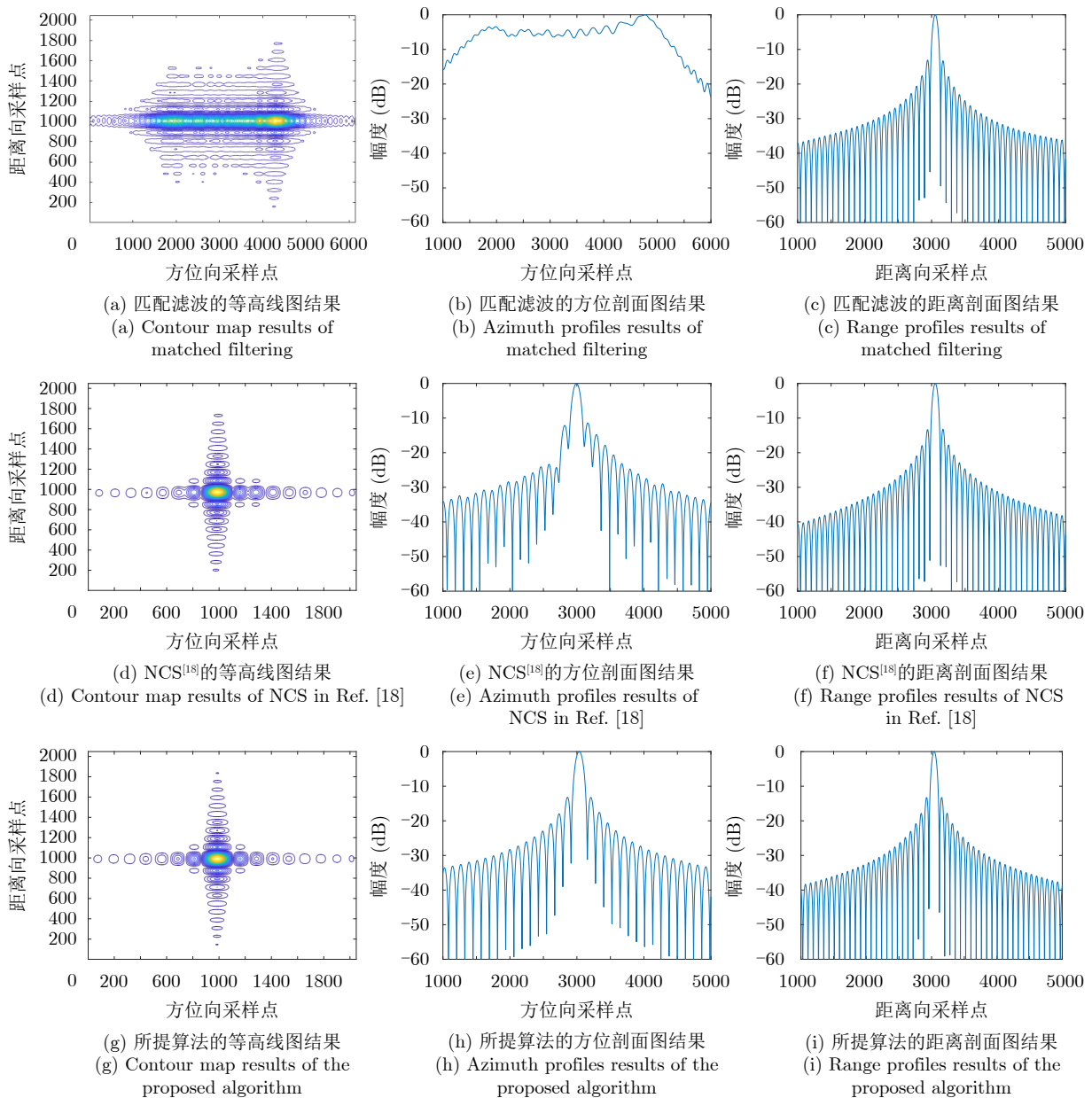


图 6 场景右端点目标仿真数据处理结果

Fig. 6 The simulation data processing results of the right edge target in the scene

表 2 3种方法方位聚焦质量的定量评估结果

Tab. 2 Quantitative evaluation results of azimuth focusing quality for the three methods

方法	场景左端目标			场景右端目标		
	PSLR(dB)	ISLR(dB)	熵值	PSLR(dB)	ISLR(dB)	熵值
匹配滤波	-2.34	-5.11	8.487	-3.47	-4.88	8.512
NCS ^[18]	-5.27	-7.24	8.391	-11.48	-8.91	8.344
子图像分割+NCS	-13.14	-9.81	8.312	-13.20	-9.89	8.309

如图7所示，可以看到边缘点的最大位置偏移约10个方位采样单元，对应的方位距离约0.5 m。该位置偏移是由于式(7)和式(8)中NCS函数引入了额外的一次项，但由于数值较小，位置偏移在可接受的范围内。

4.2 自聚焦建模及实测数据结果

本小节采用实测数据验证所提方法的有效性，获取该实测数据的雷达工作在Ku波段，信号带宽为1.4 GHz，雷达运动速度约50 m/s，合成孔径时

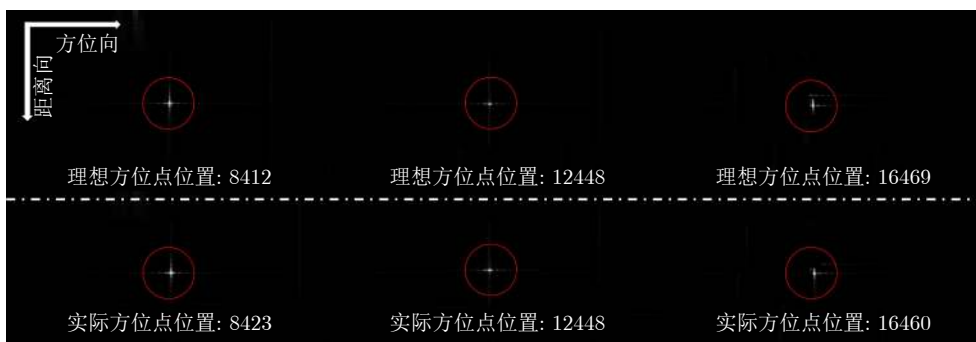


图 7 位置偏移分析结果

Fig. 7 Analysis results of position offset

间大约为33 s, 该实际雷达由一小型运输机搭载对地进行观测, 数据获取时间大约在2017年, 工作于聚束模式。需要注意的是, 实测数据中的运动误差通常是未知的, 因此本算法中的多项式变标函数系数需预先估计。针对这个问题, 本文基于误差最小化准则, 通过迭代搜索的方法估计多项式变标函数的系数, 算法具体过程如下。

首先, 采用 $E(\alpha, \beta)$ 表示第1步NCS后边缘场景目标剩余的3阶误差, 采用 $E_k(\alpha_k, \beta)$ 表示第2步NCS后子图像内边缘场景目标剩余的2阶误差。随后, 将多项式变标函数系数的估计问题建模为求解2个一维优化问题: 首先针对全孔径图像, 基于3阶误差最小化的准则估计4阶NCS函数的系数 β , 如式(17)所示; 其次针对每一个子图像, 基于2阶误差最小化的准则估计3阶NCS函数的系数 α_k , 如式(18)所示。

$$\hat{\beta} = \min_{\beta} E\{\alpha, \beta\}, \quad \text{s.t. } \alpha = 0 \quad (17)$$

$$\hat{\alpha}_k = \min_{\alpha_k} E_k\{\alpha_k, \beta\}, \quad \text{s.t. } \beta = \hat{\beta} \quad (18)$$

其中, 对于 $E(\alpha, \beta)$, $E_k(\alpha_k, \beta)$ 的定量评估, 可以采用显性散射算法(Dominant Scatterer Algorithm, DSA)或者相位梯度自聚焦(Phase Gradient Autofocus, PGA)估计场景边缘目标的剩余误差, 从而计算 $E(\alpha, \beta)$, $E_k(\alpha_k, \beta)$ 。需要注意的是, α_k 和 β 的求解顺序不能更换, 这是由于引入4阶变标函数校正空变3阶误差的同时会引入额外的2阶误差, 需要进一步引入3阶变标函数对该误差进行补偿。因此首先需要引入4阶变标函数校正空变的3阶误差, 接着引入3阶变标函数校正空变的2阶误差。需要指出的是, 若采用图像质量最优作为评价准则, 则会导致该最优化问题存在高维求解的问题, 原因在于空变的3阶误差和2阶误差对图像质量的影响是耦合的, 使得其较难对参数 α_k 和 β 实现分离求解。由于不同阶的NCS校正的是不同阶的空变误差, 因此基

于误差最小化的准则可以很好地解决图像质量评估准则存在的参数耦合问题。

综上所述可以看出, 结合本文所提方法对实测数据进行自聚焦处理只需先后求解2个独立的一维优化问题。而传统NCS方法通常需要引入5个变量参数, 且需要在时频域进行变换, 因此传统NCS方法中的5个参数之间存在严重的耦合关系, 很难将其建模为多个一维优化问题进行独立求解, 存在高维度优化求解的难题。对于式(17)、式(18)中的两个一维优化问题, 可以采用经典的线搜索方法比如黄金分割法对其实现精确求解, 具体的求解算法如表3所示。一般而言, 在上述优化问题的求解过程

表 3 变标函数系数 α_k, β 的估计算法Tab. 3 The estimation method of coefficients α_k, β

步骤1	求解第1个最优化问题, 即式(17)
1.1	输入: two-step MoCo后的SAR图像
1.2	设 $\alpha = 0$, 参数 β 的初始搜索区间为 $\beta \in [\beta_s, \beta_e]$, 迭代终止阈值为 $\varepsilon = 0.01$
1.3	while $\max\{E(\beta_s), E(\beta_e)\} > \varepsilon$ 引入式(8)中的4阶变标函数; 采用黄金分割法不断缩小 β 的区间
1.4	End while
1.5	输出: $\hat{\beta}$ 及3阶误差校正后的图像
步骤2	求解第2个最优化问题, 即式(18)
2.1	输入: $\hat{\beta}$ 及3阶误差校正后的图像
2.2	对图像进行分块处理, 得到 N 个子图像
2.3	For $k = 1:N$
(1)	设 $\beta = \hat{\beta}$, 参数 α_k 的初始搜索区间为 $\alpha_k \in [\alpha_{sk}, \alpha_{ek}]$, 迭代终止阈值为 $\varepsilon = 0.01$
(2)	while $\max\{E_k(\alpha_{sk}), E_k(\alpha_{ek})\} > \varepsilon$ 引入式(7)中的3阶变标函数; 采用黄金分割法不断缩小 α_k 的区间
(3)	End while
(4)	输出: $\hat{\alpha}_k$ 及2阶误差校正后的子图像
2.4	End
2.5	子图像拼接

中, 当剩余相位小于 $\pi/4$ rad即可满足迭代终止条件, 本文中的终止阈值设为0.01 rad。

结合上述的最优化自聚焦模型, 采用所提方法对该实测数据进行了成像处理, 结果如图8所示, 子图像的数量为5, 子图像的重叠率为0。长合成孔径时间导致雷达回波数据中运动误差的方位空变特性特别明显, 因此匹配滤波处理无法校正雷达回波信号中的方位空变特性(见图8(a)结果)。采用纯3阶和4阶NCS处理能够校正一部分的方位空变特性, 从而提升方位边缘目标的聚焦质量(见图8(b)结果), 然而纯3阶和4阶NCS处理可能会引入一些新的方位空变特性且存在一定的近似处理, 无法完

全校正信号的方位空变特性。因此若以场景左端目标为参考, 场景左端目标聚焦良好, 然而场景右端目标依然存在散焦。传统方法^[17]引入更多的变标参数能够进一步提升场景边缘的聚焦质量, 然而会大大增加算法的复杂度, 导致其较难与自聚焦方法相结合。本文结合子图像分割和NCS处理能够在不增加算法复杂度的基础上进一步提升场景边缘的聚焦质量(见图8(c)结果), 可以看到场景两端均聚焦良好。最后, 采用熵值评估准则对图8的局部细节图进行了质量评估如表4所示, 熵值越小代表图像质量越高, 因此可以看到所提方法能够对整个场景实现较好的聚焦质量, 验证了所提算法的有效性。

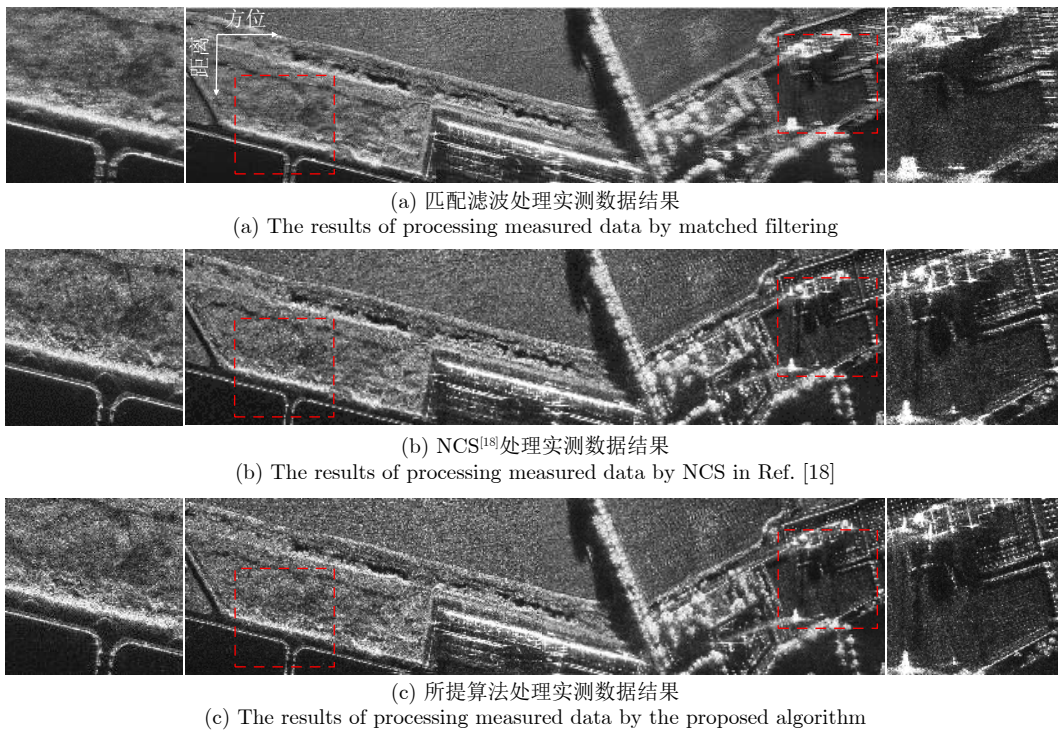


图8 实测数据处理结果(第1列为第2列左端红色虚线矩形框的局部细节图; 第3列为第2列右端红色虚线矩形框的局部细节图)

Fig. 8 Measured data processing results (The first and the third columns are the local enlarged images of the left and right edge scenes, respectively)

表4 图8局部细节图的熵值评估结果

Tab. 4 Entropy evaluation results of local enlarged images in Fig. (8)

方法	场景左端	场景右端
匹配滤波	11.287	10.943
NCS ^[18]	11.161	10.867
子图像分割+NCS	11.160	10.852

5 结语

非线性轨迹SAR成像的核心问题是如何校正信号的方位空变特性, 本文首先分析了经典NCS算法

用于方位空变校正存在的问题, 即经典的NCS算法存在参数过多的问题。当存在运动误差时, 非线性轨迹SAR的自聚焦将会成为一个高维度的优化问题。针对该问题, 本文结合子图像分割的处理策略, 提出了一种基于子图像NCS的非线性轨迹SAR成像及其自聚焦方法。第1步处理在时域引入纯4次NCS函数校正了1阶空变的3次误差, 第2步处理引入纯3次NCS并结合子图像分割校正了1阶和2阶的2次空变误差, 此后无需进一步在频域引入扰动因子, 将经典NCS算法中的5个参数减少到了2个。子图像分割的处理方式会导致子图像之间存在几何畸变, 整个

图像中存在拼缝的现象。为验证该非线性轨迹成像方法更有利于自聚焦处理, 本文最后针对实测数据建立了最优化自聚焦模型, 将其近似建模为先后求解2个一维优化问题, 大幅提高了自聚焦处理的效率和稳健性。仿真和实测数据处理的结果均表明了所提方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 邢孟道, 林浩, 陈澹来, 等. 多平台合成孔径雷达成像算法综述[J]. 雷达学报, 2019, 8(6): 732–757. doi: [10.12000/JR19102](https://doi.org/10.12000/JR19102).
XING Mengdao, LIN Hao, CHEN Jianlai, et al. A review of imaging algorithms in multi-platform-borne synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(6): 732–757. doi: [10.12000/JR19102](https://doi.org/10.12000/JR19102).
- [2] 陈潇翔, 邢孟道. 基于空变运动误差分析的微波光子超高分辨 SAR 成像方法[J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 205–214. doi: [10.12000/JR18121](https://doi.org/10.12000/JR18121).
CHEN Xiaoxiang and XING Mengdao. An ultra-high-resolution microwave photonic-based SAR image method based on space-variant motion error analysis[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(2): 205–214. doi: [10.12000/JR18121](https://doi.org/10.12000/JR18121).
- [3] 李根, 马彦恒, 熊旭颖. 基于二维空变运动补偿的机动平台大斜视 SAR 稀疏自聚焦方法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(7): 1992–1999. doi: [10.11999/JEIT200456](https://doi.org/10.11999/JEIT200456).
LI Gen, MA Yanheng, and XIONG Xuying. Sparse autofocus method for maneuvering platform high-squint SAR based on two-dimensional spatial-variant motion compensation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(7): 1992–1999. doi: [10.11999/JEIT200456](https://doi.org/10.11999/JEIT200456).
- [4] 施天玥, 刘惠欣, 刘衍琦, 等. 基于先验相位结构信息的双基 SAR 二维自聚焦算法[J]. 雷达学报, 2020, 9(6): 1045–1055. doi: [10.12000/JR20048](https://doi.org/10.12000/JR20048).
SHI Tianyue, LIU Huixin, LIU Yanqi, et al. Bistatic synthetic aperture radar two-dimensional autofocus approach based on prior knowledge on phase structure[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(6): 1045–1055. doi: [10.12000/JR20048](https://doi.org/10.12000/JR20048).
- [5] CHEN Jianlai, XING Mengdao, YU Hanwen, et al. Motion compensation/autofocus in airborne synthetic aperture radar: A review[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2022, 10(1): 185–206. doi: [10.1109/MGRS.2021.3113982](https://doi.org/10.1109/MGRS.2021.3113982).
- [6] 别博文, 孙路, 邢孟道, 等. 基于局部直角坐标和子区域处理的弹载 SAR 频域成像算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(8): 1779–1786. doi: [10.11999/JEIT171107](https://doi.org/10.11999/JEIT171107).
BIE Bowen, SUN Lu, XING Mengdao, et al. A frequency-domain algorithm based on local Cartesian coordinate and subregion processing for missile-borne SAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(8): 1779–1786. doi: [10.11999/JEIT171107](https://doi.org/10.11999/JEIT171107).
- [7] CHEN Jianlai, ZHANG Junchao, JIN Yanghao, et al. Real-time processing of spaceborne SAR data with nonlinear trajectory based on variable PRF[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5205212. doi: [10.1109/TGRS.2021.3067945](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3067945).
- [8] 李航, 刘文康, 孙光才, 等. 基于成像坐标系优化的中轨星载 SAR 成像方法[J]. 雷达学报, 2020, 9(5): 856–864. doi: [10.12000/JR20098](https://doi.org/10.12000/JR20098).
LI Hang, LIU Wenkang, SUN Guangcai, et al. MEO SAR imaging based on imaging coordinate system optimization[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(5): 856–864. doi: [10.12000/JR20098](https://doi.org/10.12000/JR20098).
- [9] ASH J N. An autofocus method for backprojection imagery in synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 104–108. doi: [10.1109/LGRS.2011.2161456](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2161456).
- [10] XIONG Yi, LIANG Buge, YU Hanwen, et al. Processing of bistatic SAR data with nonlinear trajectory using a controlled-SVD algorithm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 5750–5759. doi: [10.1109/JSTARS.2021.3084619](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3084619).
- [11] WU Junjie, LI Zhongyu, HUANG Yulin, et al. A generalized omega-K algorithm to process translationally variant bistatic-SAR data based on two-dimensional stolt mapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6597–6614. doi: [10.1109/TGRS.2014.2299069](https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2299069).
- [12] PRATS P, CAMARA DE MACEDO K A, REIGBER A, et al. Comparison of topography- and aperture-dependent motion compensation algorithms for airborne SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 349–353. doi: [10.1109/LGRS.2007.895712](https://doi.org/10.1109/LGRS.2007.895712).
- [13] WONG F H, CUMMING I G, and NEO Y L. Focusing bistatic SAR data using the nonlinear chirp scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(9): 2493–2505. doi: [10.1109/TGRS.2008.917599](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.917599).
- [14] HUANG Lijia, QIU Xiaolan, HU Donghui, et al. Medium-earth-orbit SAR focusing using range Doppler algorithm with integrated two-step azimuth perturbation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(3): 626–630. doi: [10.1109/LGRS.2014.2353674](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2353674).
- [15] ZHANG Tianyi, DING Zegang, TIAN Weiming, et al. A 2-D nonlinear chirp scaling algorithm for high squint GEO SAR imaging based on optimal azimuth polynomial compensation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5724–5735. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2765353](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2765353).

- [16] 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2447393).
- [17] LI Zhenyu, XING Mengdao, LIANG Yi, *et al.* A frequency-domain imaging algorithm for highly squinted SAR mounted on maneuvering platforms with nonlinear trajectory[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(7): 4023–4038. doi: [10.1109/TGRS.2016.2535391](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2535391).
- [18] QIU Xiaolan, HU Donghui, and DING Chibiao. An improved NLCS algorithm with capability analysis for one-stationary BiSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3179–3186. doi: [10.1109/TGRS.2008.921569](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.921569).
- [19] WANG Zhigui, LIU Mei, AI Gengting, *et al.* Focusing of bistatic SAR with curved trajectory based on extended azimuth nonlinear chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(6): 4160–4179. doi: [10.1109/TGRS.2019.2961562](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2961562).
- [20] CHEN Jianlai, ZHANG Junchao, YU Hanwen, *et al.* Blind NCS-based autofocus for airborne wide-beam SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2022, 8: 626–638. doi: [10.1109/TCI.2022.3194745](https://doi.org/10.1109/TCI.2022.3194745).
- [21] PRATS-IRAOLA P, SCHEIBER R, RODRIGUEZ-CASSOLA M, *et al.* On the processing of very high resolution spaceborne SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6003–6016. doi: [10.1109/TGRS.2013.2294353](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2294353).
- [22] MOREIRA A and HUANG Yonghong. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1029–1040. doi: [10.1109/36.312891](https://doi.org/10.1109/36.312891).

作者简介

陈溅来，副教授，博士生导师，主要研究方向为雷达成像、雷达图像解译。

熊毅，博士生，主要研究方向为非线性轨迹SAR成像。

徐刚，副教授，博士生导师，主要研究方向为雷达成像技术、遥感图像处理、稀疏信号处理、统计机器学习、人工智能等。

张俊超，讲师，主要研究方向为光电信息处理、模式识别和机器学习。

杨德贵，教授，博士生导师，主要研究方向为目标特性分析、雷达电子对抗及雷达目标探测与识别。

梁步阁，教授，博士生导师，主要研究方向为超宽带雷达探测技术、电磁性能集成测试。

(责任编辑：于青)