

## 基于级数反演法的聚束式广义双基成像算法研究

熊 涛 张 然 邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

**摘 要:** 该文将级数反演法应用于聚束式广义双基成像。对于广义双基, 其 2 维频谱表达式较普通双基更加复杂, 很难用精确的解析关系表达, 这对后续成像处理造成了极大的困难。通过级数反演法, 可以得到信号的 2 维频谱展开式, 在 2 维频域进行 2 次距离压缩, 同时在距离多普勒域进行距离徙动校正。该算法保留了单基距离多普勒算法的高效性, 由于 2 次距离压缩考虑到了方位向的影响, 因此该算法对大合成孔径情况比较适合。用该算法对仿真数据进行处理, 得到了良好的成像结果。

**关键词:** 广义双基 SAR; 级数反演法; 聚束式; 二次距离压缩; 距离徙动校正

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0932-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00502

## General Spotlight Bistatic SAR Imaging Based on Series Reversion

Xiong Tao Zhang Ran Xing Meng-dao

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

**Abstract:** This paper deals with the general spotlight bistatic SAR data based on series reversion. It is rather difficult to obtain the two-dimensional frequency spectrum which is hard for latter processing. By using the series reversion, the two-dimensional point target spectrum can be easily got, secondary range compression can be finished in the 2-D frequency domain and the range cell migration can be corrected in the range-Doppler domain. This algorithm has the advantage of range Doppler algorithm and it is suitable for large synthetic aperture. The accuracy of the proposed approach is verified with a simulation.

**Key words:** General bistatic SAR; Series reversion; Spotlight; Secondary range compression; Range cell migration correcting

### 1 引言

双基 SAR 在地物分类和识别、干涉测高以及高分辨成像等方面有广阔的应用前景。国内外对双基 SAR 成像算法研究由来已久。上个世纪 90 年代开始, 有关文章陆续出现, 但是为数不多。进入 21 世纪, 由于受到分布式小卫星雷达系统的影响, 双/多基成像的研究逐渐多了起来。文献[1]中的时域逐点匹配方法可以用于任意一类双基 SAR, 该方法是理论上最优的, 但缺点是运算量相当大; 文献[2]中, Loffeld 给出了任意构形下双基 2 维频域表达式的一种新方法, 即用傅里叶变换将回波数据从慢时间域变到多普勒域时, 把收、发斜距分别在各自的驻相点处做 2 阶泰勒近似, 然后对 2 阶近似式用驻相点法求出其多普勒域表达式, 此算法的一个主要缺点是推导双基系统的多普勒域表达式时存在近似, 对精确成像不利; 文献[3]中, Neo 提出一种推导任意

构形双基 SAR 系统回波信号的多普勒域表达式的新方法——“级数反演法”。此方法把回波的相位历程在慢时间进行高阶泰勒级数展开, 然后用级数反演法求出信号 2 维频域的近似表达式。在该算法的基础上, Wong 和 Neo 分别提出了改进的非线性 CSA 算法<sup>[4]</sup>和改进的距离多普勒算法<sup>[5]</sup>。和上述两种算法类似, 本文同样基于级数反演法, 将新算法应用于 Dechirp 数据。这三种算法都是基于同样的频谱, 区别在于后续的成像处理, 得到的成像效果基本一样。

聚束式模式可以得到极高的方位向分辨率。国内外对于双基聚束式 SAR 成像的文章极少。有文献记载的如 Brian 提出的一种双基极坐标格式算法<sup>[6]</sup>和李燕平提出的双基频率变标算法<sup>[7]</sup>。在各类双基模式中, 非平行非等速双基 SAR, 即广义双基 SAR 的成像处理最为复杂。在聚束模式下, 处理也最为困难。本文以级数反演法为基础, 先对 Dechirp 信号进行残余视频相位(RVP)去除处理, 然后运用级数反演法求出信号的 2 维频域表达式。然后在 2 维频域进行 2 次距离压缩, 在距离多普勒域进行距离

徙动校正。该算法具有单基距离多普勒算法的优点, 在简单高效的同时, 可以有效地消除距离和方位间的耦合。

## 2 广义双基地 SAR 回波信号模型

广义双基 SAR 系统构型如图 1 所示, 接收机和发射机以不同的速度, 沿着不平行的轨道运动, 其中  $V_T$  和  $V_R$  分别是发射机和接收机的运动速度, 发射机的运动轨迹和  $y$  轴平行。  $\theta_{sqT}$  和  $\theta_{sqR}$  表示当慢时间  $\eta = 0$  时, 发射机和接收机的瞬时斜视角,  $R_T$  和  $R_R$  是此时发射机和接收机分别到场景中心点  $(X, Y, 0)$  的距离,  $(x_1, y_1, h_1)$  和  $(x_2, y_2, h_2)$  是此时发射机和接收机的坐标。假设双基 SAR 发射脉冲是线性调频信号, 信号的调频率为  $\gamma$ ,  $T_p$  为脉冲持续时间,  $f_c$  为信号中心频率,  $\tau$  和  $\eta$  分别表示快时间和慢时间,  $c$  表示光速, 发射信号经过地面目标  $P(x, y, 0)$  反射后, 经过距离 Dechirp 处理后, 接收到的回波信号为

$$s(\tau, \eta) = w_a(\eta) \text{rect}\left(\frac{\tau - R_{bi}(\eta)/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{2\pi}{c}\gamma\left(\tau - \frac{R_{ref}}{c}\right)R_\Delta - j\frac{2\pi}{c}f_c R_\Delta + j\frac{\pi\gamma}{c^2}R_\Delta^2\right] \quad (1)$$

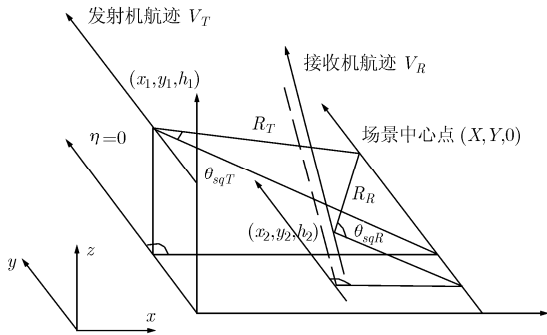


图1 聚束式广义双基 SAR 几何模型

其中  $w_a$  为方位向包络,  $R_{bi}(\eta)$  为双基斜距, 它等于发射和接收雷达到点目标之和, 斜距历程可以表示为

$$R_{bi}(\eta) = R_T(\eta) + R_R(\eta) = \sqrt{V_T^2\eta^2 + R_{cenT}^2 - 2V_T\eta R_{cenT} \sin\theta_{sqT}} + \sqrt{V_R^2\eta^2 + R_{cenR}^2 - 2V_R\eta R_{cenR} \sin\theta_{sqR}} \quad (2)$$

定义  $R_\Delta = R_T(\eta) + R_R(\eta) - R_{ref}$ ,  $R_{ref} = R_{cenT} + R_{cenR}$ ,  $R_{ref}$  为参考距离,  $R_{cenT}$  和  $R_{cenR}$  分别表示发射机和接收机航迹到场景中心点的距离。这里  $K_{Rc} = 2\pi f_c/c$ ,  $\Delta K_R = 2\pi\gamma(\tau - R_{ref}/c)/c$ ,  $K_R = K_{Rc} + \Delta K_R$ 。

由文献[8], 式(1)可以写为

$$s(\Delta K_R, \eta) = \{A(\Delta K_R, \eta) \exp(-jK_R R_\Delta)\} \otimes \exp\left[-j\frac{c^2\Delta K_R^2}{4\pi\gamma}\right] \quad (3)$$

$\otimes$  表示卷积操作。

## 3 基于二维频谱展开的残余视频相位去除以及成像处理

### 3.1 残余视频相位去除

式(3)中最后一项为残余视频相位(PVP), 根据傅里叶变换的卷积定理, 该项可以在距离位置域将其去除。其距离位置域构造的相位函数为  $\Phi = \exp(j2\pi\gamma Y^2/c^2)$ 。其中,  $Y$  为距离位置。文献[9]提到了具体实现步骤, 其流程图如图 2 所示。FFT 变换之后, 信号在距离波数域表达式为

$$s'(\Delta K_R, \eta) = A(\Delta K_R, \eta) \cdot \exp[-j\Delta K_R \cdot (R_{bi} - R_{ref})] \quad (4)$$

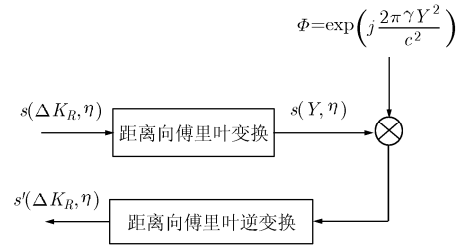


图2 消除 RVP 的流程图

为了便于后续推导, 可以将信号用距离频率来表示, 其中  $\Delta K_R = 2\pi f_r/c$ , 则式(4)可以写作

$$s'(f_r, \eta) = A(f_r, \eta) \exp[-j2\pi f_r (R_{bi} - R_{ref})/c] = A(f_r, \eta) \exp(-j2\pi f_r R_{bi}/c) \exp(j2\pi f_r R_{ref}/c) \quad (5)$$

对于  $\exp(j2\pi f_r R_{ref}/c)$ , 由于和方位向没有关系, 可以通过构造匹配函数去掉。该匹配函数为

$$s_{ref} = \exp(-j2\pi f_r R_{ref}/c) \quad (6)$$

之后

$$s'(f_r, \eta) = A(f_r, \eta) \exp(-j2\pi f_r R_{bi}/c) \quad (7)$$

### 3.2 基于级数反演法的信号 2 维频谱展开

将式(2)在合成孔径中心  $\eta = 0$  进行泰勒级数展开, 有

$$R_{bi}(\eta) = R_{cenR} + R_{cenT} + k_1\eta + k_2\eta^2 + k_3\eta^3 + k_4\eta^4 + \dots \quad (8)$$

其中

$$k_1 = -V_R \sin\theta_{sqR} - V_T \sin\theta_{sqT} \quad (9)$$

$$k_2 = \frac{1}{2!} \left[ \frac{dR_R^2(\eta)}{d\eta^2} + \frac{dR_T^2(\eta)}{d\eta^2} \right] \Big|_{\eta=0}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{V_R^2 \cos^2 \theta_{sqR}}{R_{cenR}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{V_T^2 \cos^2 \theta_{sqT}}{R_{cenT}} \quad (10)$$

$$k_3 = \frac{1}{3!} \left[ \frac{dR_R^3(\eta)}{d\eta^3} + \frac{dR_T^3(\eta)}{d\eta^3} \right] \Big|_{\eta=0}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{V_R^3 \cos^2 \theta_{sqR} \sin \theta_{sqR}}{R_{cenR}^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{V_T^3 \cos^2 \theta_{sqT} \sin \theta_{sqT}}{R_{cenT}^2} \quad (11)$$

$$k_4 = \frac{1}{4!} \left[ \frac{dR_R^4(\eta)}{d\eta^4} + \frac{dR_T^4(\eta)}{d\eta^4} \right] \Big|_{\eta=0}$$

$$= \frac{1}{8} \cdot \frac{V_R^4 \cos^2 \theta_{sqR} (4 \sin^2 \theta_{sqR} - \cos^2 \theta_{sqR})}{R_{cenR}^3}$$

$$+ \frac{1}{8} \cdot \frac{V_T^4 \cos^2 \theta_{sqT} (4 \sin^2 \theta_{sqT} - \cos^2 \theta_{sqT})}{R_{cenT}^3} \quad (12)$$

将式(7)进行方位向傅里叶变换,可以得到信号的二维频谱表达式:

$$S(f_r, f_\eta) = W_r(f_r) W_{az} \left[ f_\eta + (f_c + f_r) \frac{k_1}{c} \right] \exp[j\phi(f_r, f_\eta)] \quad (13)$$

$W_r$  和  $W_{az}$  分别表示距离向和方位向包络,  $\phi(f_r, f_\eta)$  是相位信息, 可以表示为

$$\phi(f_r, f_\eta) = -2\pi \left( \frac{f_c + f_r}{c} \right) R_{cen} - \frac{\pi f_r^2}{\gamma}$$

$$+ 2\pi \frac{c}{4k_2(f_c + f_r)} \left( f_\eta + (f_c + f_r) \frac{k_1}{c} \right)^2$$

$$+ 2\pi \frac{c^2 k_3}{8k_2^3(f_c + f_r)^2} \left( f_\eta + (f_c + f_r) \frac{k_1}{c} \right)^3$$

$$+ 2\pi \frac{c^3(9k_3^2 - 4k_2 k_4)}{64k_2^5(f_c + f_r)^3} \left( f_\eta + (f_c + f_r) \frac{k_1}{c} \right)^4 + \dots \quad (14)$$

文献[10]中,利用数值计算的方法,得到斜距变化量与  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  以及  $k_4$  的关系。本文直接将  $\phi(f_r, f_\eta)$  进行展开,然后再进行2次距离压缩和距离徙动校正处理。通过文献[5],可以将  $\phi(f_r, f_\eta)$  对  $f_r$  进行泰勒级数展开,经过整理,可以得到

$$\phi(f_r, f_\eta) \approx \phi_{rg}(f_r) + \phi_{az}(f_\eta) + \phi_{rcm}(f_r, f_\eta)$$

$$+ \phi_{src}(f_r, f_\eta) + \phi_{res} \quad (15)$$

### 3.3 后续成像处理

分别对式(15)的各项加以说明并且分析:

$$\phi_{rg}(f_r) = -\pi f_r^2 / \gamma \quad (16)$$

该项是信号的距离向调频项,此项只和  $f_r$  有关,

可以通过构造相位匹配函数  $\psi_{rg}(f_r) = \exp(\pi f_r^2 / \gamma)$  将它去掉。

$$\phi_{src}(f_r, f_\eta) \approx 2\pi \left\{ \frac{c}{4k_2 f_c} \left[ \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^2 - \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^3 \right] f_\eta^2 \right.$$

$$+ \frac{k_3}{8k_2^3} \left[ 3k_1 \left( \frac{c}{f_c} \right) \left[ \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^2 - \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^3 \right] f_\eta^2 \right.$$

$$+ \left. \left. \left( \frac{c}{f_c} \right)^2 \left[ 3 \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^2 - 4 \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^3 \right] f_\eta^3 \right] \right.$$

$$+ \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} \left[ 6k_1^2 \left( \frac{c}{f_c} \right) \left[ \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^2 - \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^3 \right] f_\eta^2 \right.$$

$$+ 4k_1 \left( \frac{c}{f_c} \right)^2 \left[ 3 \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^2 - 4 \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^3 \right] f_\eta^3$$

$$\left. \left. \left. + \left( \frac{c}{f_c} \right)^3 \left[ 6 \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^2 - 10 \left( \frac{f_r}{f_c} \right)^3 \right] f_\eta^4 \right] \right\} \quad (17)$$

式(17)为距离和方位的交叉耦合项,要在2维频率域进行消除。实际处理中,通过点乘  $\psi_{src} = \exp(-j\phi_{src}(f_r, f_\eta, R_{cenT}, R_{cenR}))$  将该耦合项去除。由于  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  以及  $k_4$  都是和  $R_T$  与  $R_R$  相关的量,当波长较小的时候,可以用发射机和接收机的航迹到场景中心的距离  $R_{cenT}$  和  $R_{cenR}$  来代替  $R_T$  和  $R_R$ 。

$$\phi_{rcm}(f_r, f_\eta) \approx 2\pi f_r \left\{ -\frac{R_{cen}}{c} + \frac{1}{4k_2} \left[ \frac{k_1^2}{c} - \frac{c}{f_c^2} f_\eta^2 \right] \right.$$

$$+ \frac{k_3}{8k_2^3} \left[ \frac{k_1^3}{c} - \frac{3k_1 c}{f_c^2} f_\eta^2 - \frac{2c^2}{f_c^3} f_\eta^3 \right]$$

$$+ \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} \left[ \frac{k_1^4}{c} - \frac{6k_1^2 c}{f_c^2} f_\eta^2 \right.$$

$$\left. \left. - \frac{8k_1 c^2}{f_c^3} f_\eta^3 - \frac{3c^3}{f_c^4} f_\eta^4 \right] \right\} \quad (18)$$

式(18)表示的是距离徙动项,同样由于空变性,距离徙动校正很难进行。本文依照单基 SAR 处理方法,将信号变换到距离多普勒域,通过插值来校正距离徙动。

$$\phi_{az}(f_\eta) \approx 2\pi \left\{ \frac{1}{4k_2} \left[ 2k_1 f_\eta + \frac{c}{f_c} f_\eta^2 \right] \right.$$

$$+ \frac{k_3}{8k_2^3} \left[ 3k_1^2 f_\eta + \frac{3k_1 c}{f_c} f_\eta^2 + \frac{c^2}{f_c^2} f_\eta^3 \right]$$

$$+ \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} \left[ 4k_1^3 f_\eta + \frac{6k_1^2 c}{f_c} f_\eta^2 \right.$$

$$\left. \left. + \frac{4k_1 c^2}{f_c^2} f_\eta^3 + \frac{c^3}{f_c^3} f_\eta^4 \right] \right\} \quad (19)$$

式(19)表示的是方位调频项,它只与方位频率  $f_\eta$  有

关, 可以通过构造方位向匹配滤波器  $\psi(f_\eta) = \exp(-j\phi_{az}(f_\eta))$  将它去除。

$$\phi_{\text{res}} \approx 2\pi \left\{ -\frac{f_c}{c} R_{\text{cen}} + \frac{1}{4k_2} \left[ \frac{k_1^2}{c} f_c \right] + \frac{k_3}{8k_2^3} \left[ \frac{k_1^3}{c} f_c \right] + \frac{9k_3^2 - 4k_2k_4}{64k_2^5} \left[ \frac{k_1^4}{c} f_c \right] \right\} \quad (20)$$

式(20)和距离频率以及方位频率均没有关系, 它对成像结果没有影响。

以上的操作, 可以按照图 3 进行。

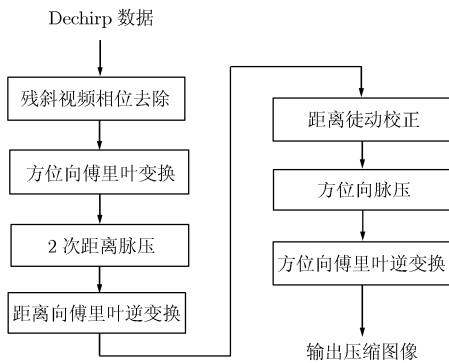


图 3 聚束式广义双基 SAR 处理算法流程图

### 4 仿真试验

按照表 1 的参数进行仿真, 该组参数适用于机载条件, 并且发射和接收系统均工作于小斜视。仿真点的分布如图 4 所示, 其中仿真点 5 为场景中心点。在距离向上, 各点间隔 100 m, 在方位向上, 各点间隔 300 m。

表 1 聚束式广义双基 SAR 仿真参数

| 参数名称     | 发射雷达    | 接收雷达    |
|----------|---------|---------|
| 波长       |         | 0.03 m  |
| 采样率      |         | 25 MHz  |
| 发射信号带宽   |         | 20 MHz  |
| 脉冲重复频率   |         | 900 Hz  |
| 参考距离     |         | 50 km   |
| X 方向速度   | 0 m/s   | 20 m/s  |
| Y 方向速度   | 130 m/s | 130 m/s |
| Z 方向速度   | 0 m/s   | 0 m/s   |
| 与航迹的最近距离 | 30 km   | 20 km   |
| 零时刻斜视角   | 10°     | 15°     |

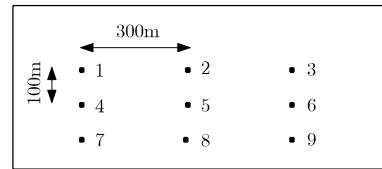


图 4 仿真点分布图

成像结果如图 5 所示, 其中距离向和方位向处理均没有加窗。本文列出了边缘点仿真点 3(图 6)和仿真点 7(图 7)的剖面图, 所有点目标的成像性能如表 2 所示。所有点目标的距离向和方位向分辨率均为 7 m。从表 2 可以看到, 所有点目标的距离向剖面图的峰值旁瓣比都小于 -13 dB, 方位向剖面图效果差一点, 但都可以达到 -12 dB。所有点目标的积分旁瓣比都小于 -9 dB。这说明, 该方法是有效果的。

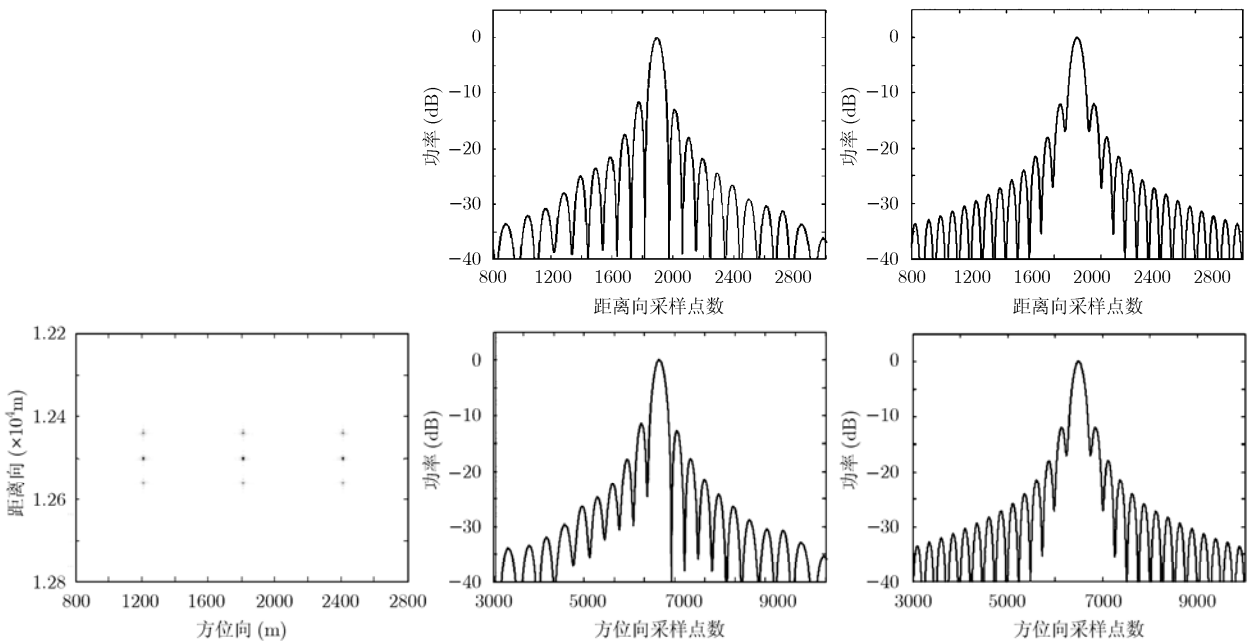


图 5 成像结果图

图 6 仿真点 3 的距离向以及方位向剖面图

图 7 仿真点 7 的距离向以及方位向剖面图

表 2 各仿真点成像性能分析结果

| 仿真点   | 峰值旁瓣比<br>(距离/方位)(dB) | 积分旁瓣比<br>(距离/方位)(dB) |
|-------|----------------------|----------------------|
| No. 1 | -13.45/-12.90        | -9.74/-9.61          |
| No. 2 | -13.62/-12.39        | -9.24/-9.80          |
| No. 3 | -13.48/-12.45        | -9.35/-9.94          |
| No. 4 | -13.34/-13.55        | -11.52/-9.19         |
| No. 5 | -13.54/-13.51        | -11.46/-9.08         |
| No. 6 | -13.49/-12.45        | -11.52/-9.79         |
| No. 7 | -13.36/-13.47        | -11.53/-9.70         |
| No. 8 | -13.35/-13.50        | -11.48/-9.57         |
| No. 9 | -13.25/-13.11        | -11.51/-9.63         |

## 5 结束语

对于非平行非等速双基, 即广义双基 SAR, 其成像难点在于难以得到精确的 2 维频谱表达式。由于航迹与速度的任意性, 难以直接利用其他模式下双基算法加以处理。本文利用级数反演法, 对 Dechirp 数据进行去残余相位处理之后, 在时域将斜距进行展开, 然后得到信号的 2 维频谱表达式, 然后在 2 维频域进行 2 次距离压缩, 并且在距离多普勒域进行距离徙动校正。本文的方法对于收发平台的速度和方向没有要求, 在距离和方位耦合不是很严重的情况下, 即 2 次距离脉压的空变性可以忽略时, 可以很好的应用。

## 参考文献

- [1] Krieger G and Moreira A. Spaceborne bi- and multistatic SAR: Potentials and challenges[J]. *IEE Proceeding- F: Radar Sonar Navigation.*, 2006, 153(3): 184-198.
- [2] Loffeld O, Nies H, Peters V, and Knedlik S. Models and useful relations for bistatic SAR processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2031-2038.
- [3] Neo Y, Wong F, and Cumming I G. A two-dimensional

spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, 2007, 4(1): 93-96.

- [4] Wong F, Cumming I G, and Neo Y. Focusing bistatic SAR data using the nonlinear chirp scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(9): 2493-2505.
  - [5] Neo Y, Wong F, and Cumming I G. Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range Doppler algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 14-21.
  - [6] Brian D, Randolph L. Polar format algorithm for bistatic SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(4): 1147-1159.
  - [7] Li Y, Zhang Z, and Xing M. Bistatic spotlight SAR processing using the frequency-scaling algorithm[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, 2008, 5(1): 48-52.
  - [8] Mittermayer J, Moreira A, and Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.
  - [9] Carrara G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar[M]. Norwood, MA: Artech House, 1995: 501-506.
  - [10] 李燕平, 张振华, 邢孟道等. 基于级数反演法和数值计算的广义双基 SAR 距离徙动成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(12): 2800-2804.
- Li Yan-ping, Zhang Zhen-hua, and Xing Meng-dao. A novel range migration algorithm for general bistatic SAR imaging based on series reversion and numerical computation[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, 30(12): 2800-2804.
- 熊涛: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像。  
张然: 女, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为 SAR 成像及其干扰研究。  
邢孟道: 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和模式识别等。