

一种大斜视双基地合成孔径雷达的 频率变标成像算法

陈士超, 武其松, 吴玉峰, 邢孟道, 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对具备更多目标散射信息的双基合成孔径雷达的目标二维频谱难以精确获得, 以及为观察前方目标采用的大斜视构型导致的成像效果不佳的问题, 提出一种基于严格解析双基频谱的大斜视频率变标(FS)成像算法. 首先将回波信号变换到二维频率域, 利用由严格解析双基频谱推导出的频率变标函数校正距离弯曲差, 然后进行剩余视频相位校正完成包络去斜, 接着进行逆频率变标操作消除二次相位误差, 经过距离徙动校正后, 再进行非线性变标操作消除由大斜视导致的随距离变化的二次距离压缩项, 最后经过距离压缩和方位压缩完成整个成像过程. 仿真实验表明, 与常规FS算法相比, 在双基地大斜视的情况下, 该算法成像效果良好, 点目标冲激响应的主副瓣可清晰分辨.

关键词: 合成孔径雷达; 严格解析双基频谱; 频率变标; 大斜视

中图分类号: TN957.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)10-0082-06

A Frequency Scaling Algorithm for High Squint Bistatic Synthetic Aperture Radar

CHEN Shichao, WU Qisong, WU Yufeng, XING Mengdao, BAO Zheng

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

Abstract: Since the two-dimensional spectrum of a point target cannot be obtained precisely by bistatic synthetic aperture radar (SAR), and the imaging results are not satisfied for high-squint-angle in front target observing, a new frequency scaling (FS) algorithm is proposed for high-squint-angle SAR based on the exact analytical bistatic spectrum. The method first transforms the echo into the two-dimensional frequency domain, and then chooses a frequency scaling function that is obtained based on an exact analytical spectrum to equalize the range migration of all points. Then, elimination of the residual video phase caused by the dechirp operation and inverse frequency scaling is performed to correct the second-order phase error. After range migration correction, the range-dependent second range compression term is eliminated using the nonlinear frequency scaling operation. The image is finally obtained by range and azimuth compression. Simulation results and comparisons with the normal FS algorithm show that ideal imaging can still be achieved even if the bistatic SAR system works at the equivalent high-squint-angle mode, and the main lobe and sidelobes of the impulse response of the point target can be well-resolved.

Keywords: synthetic aperture radar; exact analytical bistatic spectrum; frequency scaling; high-squint-angle

双基地合成孔径雷达(SAR)的接收机和发射机放置在不同的运动平台上,可以有不同的空间位置和速度,在军事应用、资源调查和地壳形变监测等方面具有特殊的优势。双基地合成孔径雷达成像的可行性早已被实验所证实^[1],但除时间、相位同步等技术问题外,距离多普勒类的快速成像算法还没有完全解决,原因在于,双基 SAR 不同于单基 SAR,其斜距历程是双根号(DSR)之和,直接利用驻相点原理无法获得精确的二维频谱。文献[2-4]基于地震学和级数反演法等理论所提出的几种双基频谱,可以实现一定条件下的成像,但均是某种条件下的近似双基谱。同轨等速构型双基 SAR 具有构型简单,便于工程实现的优点,在动目标检测和干涉合成孔径雷达(InSAR)三维重建上有着广泛的应用前景^[5]。基于文献[6-7]提出的几何关系公式(GBF)方法,文献[8]成功地推导出了同轨构形下严格解析的双基频谱。在实际应用中,双基 SAR 很可能需要工作于大斜视模式,如一些角度依赖性强的目标需要在一定的视角下进行观察,或者在军事上为了便于侦察前方的情况,这时如果双基 SAR 的二次距离压缩项仍然采用小斜视时场景中心处的二次距离压缩项来近似补偿,产生的误差就会较大,难以获得理想的成像效果。频率变标(FS)算法通过相位相乘替代插值操作完成距离徙动补偿,既提高了运算效率,又能保证聚焦精度。本文基于文献[8]的严格解析谱提出一种适用于大斜视情况下双基 SAR 的 FS 成像算法,通过引入非线性变标操作解决了二次距离压缩项的空变问题。

1 严格解析半双基角

在同轨双基地 SAR 系统中,发射平台和接收平台以相同的速度 v 沿 X 轴匀速直线飞行,当运动到 x 位置时,目标 P 到发、收平台的瞬时斜视角分别为 θ_T 和 θ_R , $R_T(x)$ 和 $R_R(x)$ 分别为此时的瞬时斜距。同轨等速构型双基 SAR 的几何关系如图 1 所示。基于图 1 的几何关系,文献[8]成功地推导出了半双基角 β 的解析表达式

$$\beta = \arctan\left(\frac{-(2y-2)^{1/2}}{2} + \frac{1}{2}\left(2y-2-4\left[y-\frac{2k_d^2 R_c}{hk_D^2(2y-2)^{1/2}}\right]^{1/2}\right)\right) \quad (1)$$

式中: k_d 为距离波数; k_D 为多普勒波数; h 为基线长度的一半; R_c 表示场景中心到航线的最近距离; $y = \left[-q/2 + ((q/2)^2 + (p/3)^3)^{1/2}\right]^{1/3} + \left[-q/2 - ((q/2)^2 + (p/3)^3)^{1/2}\right]^{1/3} + \frac{1}{3}$, 其中 $p = -\left(\frac{4}{3} - \frac{4k_d^2}{k_D^2}\right)$, $q = \frac{2}{3}\left(1 - \frac{4k_d^2}{k_D^2}\right) - \frac{2}{27} - \frac{2k_d^4 R_c^2}{h^2 k_D^4}$ 。

$$2)^2 + (p/3)^3)^{1/2}]^{1/3} + \frac{1}{3}, \text{ 其中 } p = -\left(\frac{4}{3} - \frac{4k_d^2}{k_D^2}\right),$$

$$q = \frac{2}{3}\left(1 - \frac{4k_d^2}{k_D^2}\right) - \frac{2}{27} - \frac{2k_d^4 R_c^2}{h^2 k_D^4}.$$

获得半双基角的所有推导过程没有采取任何近似,得到的半双基角是完全解析的。

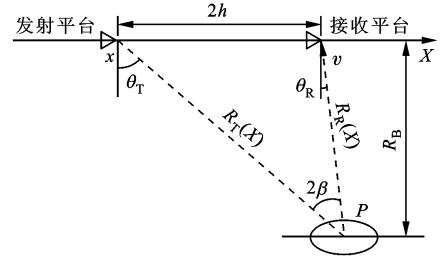


图 1 同轨等速构型双基 SAR 的几何关系示意图

2 双基 SAR 的 FS 成像算法

在聚束模式下,由 GBF 方法^[6]推导出的点目标二维频谱解析表达式为

$$S(\Delta k_d, k_D) = \left\{ \sigma_p W_a(k_D) \text{rect}[\Delta k_d / (bcT_p)] \cdot \exp\left[-j(R_c + h \tan \beta)(4k_d^2 \cos^2 \beta - k_D^2)^{1/2}\right] \cdot \exp[-jk_D x_P] \exp(jk_D R_{\text{ref}}) \right\} \otimes \exp[-jk_D^3 / 2b] \quad (2)$$

式中: σ_p 为后项散射系数; $W_a(\cdot)$ 为回波方位谱包络; $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩形窗; c 为光速; T_p 为脉冲宽度; γ 为发射信号的调频率; $b = \frac{c^2}{2\pi\gamma}$; R_{ref} 表示信号解线调的参考距离; x_P 为目标所在的方位位置; 符号 $\otimes$ 表示卷积操作; Δk_d 表示距离波数在基频的变化。

式(2)中的半双基角取自式(1)所得的值,这样所得的二维频谱是严格解析的。

将式(2)在 $k_d = k_{dc}$ 处进行泰勒展开, k_{dc} 为距离波数中心,并保留到三次项,得

$$S(\Delta k_d, k_D) = \left\{ \sigma_p W_a(k_D) \text{rect}[\Delta k_d / (bcT_p)] \exp(j\phi) \cdot \exp(-jk_D x_P) \exp(-jD_1 \Delta k_d) \exp(jD_2 \Delta k_d^2 + jD_3 \Delta k_d^3) \right\} \otimes \exp\left(-j \frac{\Delta k_d^2}{2b}\right) \quad (3)$$

式中: ϕ 为双基的方位调制项

$$\phi = -(R_c + h \tan \beta) M_1 \quad (4)$$

D_1 为双基距离徙动因子

$$D_1 = (R_c + h \tan \beta_0) \frac{M_2}{M_1} + (h' \beta_0 \sec^2 \beta_0) M_1 - R_{\text{ref}} \quad (5)$$

其中 $\beta_0 = \beta|_{k_d=k_{dc}}$ 为半双基角在距离多普勒中心处的值; $\exp(jD_2 \Delta k_d^2 + jD_3 \Delta k_d^3)$ 为二次距离压缩项,

D_2, D_3 为二次距离压缩项系数

$$D_2 = \frac{(R_c + h \tan \beta_0) M_2^2}{2 M_1^3} - \frac{M_5 M_1}{2} - \frac{(h \beta_0' \sec^2 \beta_0) M_2}{M_1} - \frac{(R_c + h \tan \beta_0) M_3}{2 M_1} \quad (6)$$

$$D_3 = -\frac{1}{6} h M_1 M_6 - \frac{1}{2} \frac{M_5 M_2}{M_1} + \frac{1}{2} (h \beta_0' \sec^2 \beta_0) \cdot$$

$$\frac{M_2^2}{M_1^3} - \frac{1}{6} (R_c + h \tan \beta_0) \frac{M_4}{M_1} + \frac{1}{2} (R_c + h \tan \beta_0) \cdot$$

$$\frac{M_3 M_3}{(M_1)^3} - \frac{1}{2} (R_c + h \tan \beta_0) \frac{M_2^2}{M_1^3} \quad (7)$$

其中

$$M_1 = (4k_{dc}^2 \cos^2 \beta_0 - k_D^2)^{1/2};$$

$$M_2 = 4k_{dc} \cos^2 \beta_0 - 2k_{dc}^2 \beta_0' \sin(2\beta_0);$$

$$M_3 = 4 \cos^2 \beta_0 - 8k_{dc} \beta_0' \sin(2\beta_0) - 4k_{dc}^2 (\beta_0')^2 \cos(2\beta_0);$$

$$M_4 = -12 \beta_0' \sin(2\beta_0) - 12k_{dc} \beta_0' \sin(2\beta_0) -$$

$$24k_{dc} (\beta_0')^2 \cos(2\beta_0) - 2k_{dc}^2 \beta_0' \sin(2\beta_0) -$$

$$12k_{dc}^2 \beta_0' \cos(2\beta_0) \beta_0' + 8k_{dc}^2 (\beta_0')^3 \sin(2\beta_0);$$

$$M_5 = h \beta_0' \sec^2 \beta_0 + 2h (\beta_0')^2 \tan \beta_0 \sec^2 \beta_0;$$

$$M_6 = \beta_0'' \sec^2 \beta_0 + 6 \beta_0' \beta_0' \sec^2 \beta_0 \tan \beta_0 +$$

$$2(\beta_0')^3 \sec^4 \beta_0 + 4(\beta_0')^3 \sec^2 \beta_0 \tan^2 \beta_0;$$

$$\beta_0' = \frac{\partial \beta}{\partial \Delta k_d} \Big|_{k_d=k_{dc}}; \quad \beta_0'' = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \Delta k_d^2} \Big|_{k_d=k_{dc}};$$

$$\beta_0''' = \frac{\partial^3 \beta}{\partial \Delta k_d^3} \Big|_{k_d=k_{dc}}$$

将 D_1 在 $R_c = R_{sc}$ 处进行泰勒展开, 其中 R_{sc} 为场景中心处目标到航线的最近距离, 取一阶近似

$$D_1 \approx A + B \Delta r \quad (8)$$

式中: $A = D_1|_{R_c=R_{sc}}$; $B = \partial D_1 / \partial R_c|_{R_c=R_{sc}}$; $\Delta r = R_c - R_{sc}$. 由式(8)近似造成的包络误差数值大小远远小于距离分辨率, 故式(8)近似所造成的影响完全可以忽略.

为校正目标的距离徙动, 类比单基的变标法

则^[9]选择频率变标函数

$$f(\Delta k_d, k_D) = \exp\left[j \frac{\Delta k_d^2}{2b} \left(1 - \frac{B_0}{B}\right)\right] \quad (9)$$

为避免斜视角较大时可能引发的距离频谱模糊, 在变标函数中引入 $B_0 = B(k_{Dc})$, 其中 $k_{Dc} = k_{dc}(\sin \theta_{T0} + \sin \theta_{R0})$ 为全孔径中心对应的多普勒波数, 等效正侧视或小斜视时可选取 $B_0 = 1$.

将式(8)带入式(3)后与式(9)相乘, 得

$$S(\Delta k_d, k_D) = \left\{ \sigma_P W_a(k_D) \text{rect}[B_0 \Delta k_d / B(b c T_p)] \cdot \exp(j\phi) \exp(-j k_{Dc} x_P) \exp\left[-j \left(\frac{A}{B} + \Delta r\right) B_0 \Delta k_d\right] \exp\left[j D_2 \left(\frac{B_0}{B} \Delta k_d\right)^2 + j D_3 \left(\frac{B_0}{B} \Delta k_d\right)^3\right] \right\} \otimes \exp\left[-j \frac{B_0}{2bB} \Delta k_d^2\right] \quad (10)$$

类似单基情形, 将接下来的操作总结如下: 构造剩余视频相位校正函数 d_1 完成包络去斜, 引入逆频率变标函数 f_1 来消除频率变标操作产生的二次相位误差, 利用函数 d_2 进行统一的距离徙动校正

$$d_1(r, k_D) = \exp\left(-j \frac{bB}{2B_0} r^2\right) \quad (11)$$

$$f_1(\Delta k_d, k_D) = \exp\left[j \frac{(B_0 - B)}{2bB^2} B_0 \Delta k_d^2\right] \quad (12)$$

$$d_2(\Delta k_d, k_D) = \exp\left[j \frac{AB_0}{B} \Delta k_d\right] \quad (13)$$

式中 r 为距离位置. 至此, 信号形式变为

$$S(\Delta k_d, k_D) = \sigma_P W_a(k_D) \text{rect}[B_0 \Delta k_d / B(b c T_p)] \cdot \exp(j\phi) \exp(-j k_{Dc} x_P) \exp[-j B_0 \Delta k_d \Delta r] \cdot \exp\left[j D_2 \left(\frac{B_0}{B} \Delta k_d\right)^2 + j D_3 \left(\frac{B_0}{B} \Delta k_d\right)^3\right] \quad (14)$$

双基地 SAR 的二次距离压缩项是随距离空变的, 当收发系统的斜视角较小时, 可以不考虑二次距离压缩项的空变性, 以场景中心处目标对应的二次距离压缩项进行补偿

$$d_0(\Delta k_d, k_D) =$$

$$\exp\left[-j D_{20} \left(\frac{B_0}{B}\right)^2 \Delta k_d^2 - j D_{30} \left(\frac{B_0}{B}\right)^3 \Delta k_d^3\right] \quad (15)$$

式中: $D_{20} = D_2|_{R_c=R_{sc}}$, $D_{30} = D_3|_{R_c=R_{sc}}$. 当等效正侧视或小斜视情况时, 将式(14)与(15)相乘后, 再对信号进行距离维的逆傅里叶变换完成距离向的操作, 然后构造方位压缩参考函数

$$F_{azi}(r, k_D) = \exp\{j[(R_c + h \tan \beta) M_1]\} \quad (16)$$

最后, 通过方位维的逆傅里叶变换完成整个成像过程.

当系统工作于大斜视角情形时, 如果仍然采用

式(15)进行补偿,则剩余相位误差将大于 $\pi/4$,这时可以采用类似单基情形时的非线性调频变标算法^[10]来解决二次距离压缩项的空变问题,本文将这种方法推广到双基地 SAR 中,首先引入一个三次滤波函数

$$F(\Delta k_d, k_D) = \exp\left[jD_{30}\left(\frac{B_0}{B}\right)^3 \Delta k_d^3\right] \exp(jd_m \Delta k_d^3) \quad (17)$$

式中系数 d_m 的求解将在后文的推导中求出. 与单基情形类似,二次距离压缩项的三次项可采用场景中心进行补偿,同时引入一个新的三次相位,使得二次项得以保留以进行变标操作. 式(14)与式(17)相乘以后,得

$$S(\Delta k_d, k_D) = \sigma_p W_a(k_D) \text{rect}\left[B_0 \Delta k_d / B(bcT_p)\right] \cdot \exp(j\phi) \exp(-jk_D x_P) \exp[-jB_0 \Delta k_d \Delta r] \cdot \exp\left[-j \frac{1}{2b_D} \Delta k_d^2\right] \exp(jd_m \Delta k_d^3) \quad (18)$$

式中: $b_D = -\frac{B^2}{2B_0^2 D_2}$ 是随距离空变的,对其做一阶线性近似,得

$$b_D = b_0 + b_1 \Delta r \quad (19)$$

其中

$$b_0 = b_D \big|_{R_c=R_{sc}} = -\frac{B^2}{2B_0^2 D_2};$$

$$b_1 = \frac{\partial b_D}{\partial R_c} \bigg|_{R_c=R_{sc}} =$$

$$\frac{B^2}{B_0^2} \left[\frac{3M_1^2}{M_7} \frac{\partial M_1}{\partial R_c} \bigg|_{R_c=R_{sc}} - \frac{M_1^3}{M_7^2} \frac{\partial M_7}{\partial R_c} \bigg|_{R_c=R_{sc}} \right];$$

$$M_7 = M_5 M_1^4 + (2h\beta'_0 \sec^2 \beta_0) M_2 M_1^2 +$$

$$(R_c + h \tan \beta_0) M_3 M_1^2 - (R_c + h \tan \beta_0) M_2^2$$

b_0 为场景中心对应的二次距离压缩, b_1 为 b_D 随距离的变化率,忽略三次相位对驻相点的影响,将信号变到 (r, k_D) 域,有

$$S(r, k_D) = \sigma_p W_a(k_D) \text{rect}\left[\frac{B_0 b_D (r - B_0 \Delta r)}{B b c T_p}\right] \cdot \exp[j\phi(\Delta r, k_D)] \exp(-jk_D x_P) \exp\left[j \frac{b_D}{2} (r - B_0 \Delta r)^2\right] \exp[jd_m b_D^3 (r - B_0 \Delta r)^3] \quad (20)$$

构造非线性变标函数

$$f_{nl}(r, k_D) = \exp\left(j \frac{q_2}{2} r^2\right) \exp(jq_3 r^3) \quad (21)$$

式(20)与式(21)相乘后经距离向的傅里叶变换,再将式(19)代入,其相位表达式经整理后为

$$\phi \approx C_1(d_m, q_2, q_3, k_D, \Delta k_d) +$$

$$C_2(d_m, q_2, q_3, k_D) \Delta r \Delta k_d + C_3(d_m, q_2, q_3, k_D) \Delta r^2 \Delta k_d + C_4(d_m, q_2, q_3, k_D) \Delta r \Delta k_d^2 + C_5(d_m, q_2, q_3, k_D, \Delta r) \quad (22)$$

取 $C_2 = -1/\mu$, $C_3 = C_4 = 0$, 得 $q_2 = b_0(\mu - 1)$, $q_3 = b_1(\mu - 1)/6$, $d_m = \frac{(\mu - 0.5)b_1}{3(\mu - 1)b_0^3}$, 更新

$$S(\Delta k_d, k_D) = \sigma_P W_a(k_D) \text{rect}\left[B_0 \Delta k_d / (bcT_p B \mu)\right] \exp(j\phi) \exp(-jk_D x_P) \exp\left\{j\left[-\frac{B_0 \Delta r}{\mu} \Delta k_d - \frac{1}{2\mu b_0} \Delta k_d^2 + \frac{b_1}{6\mu(\mu - 1)b_0^3} \Delta k_d^3\right]\right\} \cdot \exp\left\{j\left[\frac{b_0}{2} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) B_0^2 \Delta r^2 + \frac{b_1}{6} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) B_0^3 \Delta r^3\right]\right\} \quad (23)$$

构造距离压缩函数

$$d_3(\Delta k_d, k_D) = \exp\left(\frac{1}{2\mu b_0} \Delta k_d^2 - \frac{b_1}{6\mu(\mu - 1)b_0^3} \Delta k_d^3\right) \quad (24)$$

距离压缩后,经距离维逆傅里叶变换,构造剩余相位补偿函数

$$\varphi_1(r, k_D) = -\frac{b_0}{2} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) B_0^2 \Delta r^2 - \frac{b_1}{6} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) B_0^3 \Delta r^3 \quad (25)$$

接下来的操作和小斜视时情形相同. 需要说明的是,由公式(23)可见,距离向处理后,图像在距离向上发生了伸缩,为构造正确的方位压缩函数,应更新 R_c , $R_c = R_{sc} + u \Delta r / B_0$.

3 实验结果和分析

基于 X 波段(波长为 0.03 m)雷达平台的仿真参数为:载机的运动速度为 110 m/s,脉冲宽度为 30 μ s,发射信号带宽 250 MHz,脉冲重复频率(PRF)为 600 Hz,参考作用距离为 8 000 m,合成孔径时间为 6.83 s. 仿真目标点阵由 9 个点组成,以场景中心点为基准,相邻两点的距离维间距 400 m,方位维间隔 200 m. 用本文所述适用于小斜视情形下的算法成像,等效小斜视情形下的中心点和边缘点的成像效果如图 2 所示. 由图 2 可以看出,所得的聚焦效果良好. 当收发斜视角增加到 $\theta_{T0} = 54.3^\circ$, $\theta_{R0} = 51.7^\circ$ 时,二次距离压缩的剩余相位误差已经大于 $\pi/4$,如图 3 所示. 如果忽略二次距离压缩的空变性,仍然采用小斜视时的 FS 算法进行成像处理,中心点和

边缘点的成像结果如图 4 所示,可见,虽然中心点可以实现较好的聚焦,但边缘点目标散焦严重. 采用本文大斜视情形下的频率变标算法的成像结果如图 5 所示. 由图 5 可见,边缘点目标的成像效果取得了明显的改善.

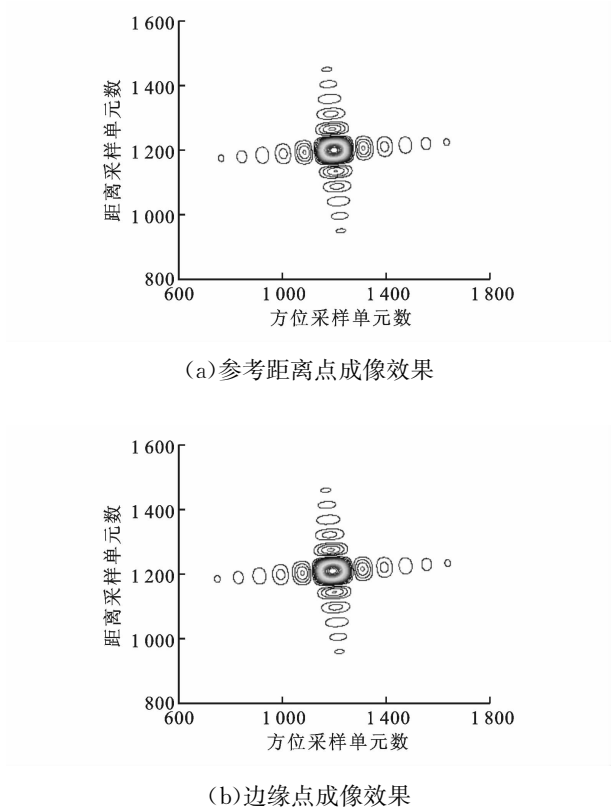


图 2 小斜视时目标成像效果的等值线图

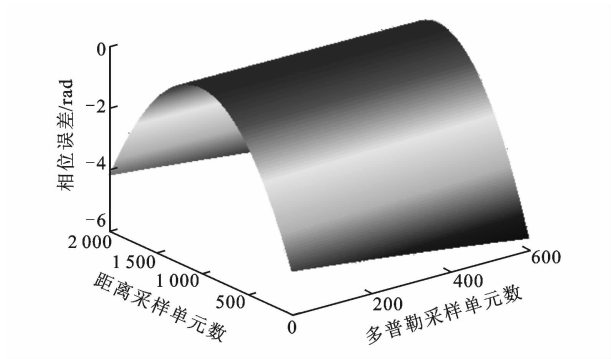


图 3 大斜视情形下二次距离压缩的剩余相位误差图

4 结 论

当双基地合成孔径雷达系统工作于大斜视情形时,二次距离压缩的空变问题必须加以考虑,无法直接采用场景中心处的二次距离压缩项进行补偿. 基于文献[8]的严格解析双基频谱,提出了一种适用于大斜视情形的同轨构型双基地 SAR 的 FS 成像算

法,通过非线性变标操作解决二次距离压缩项的空变问题,取得了较为满意的成像结果.

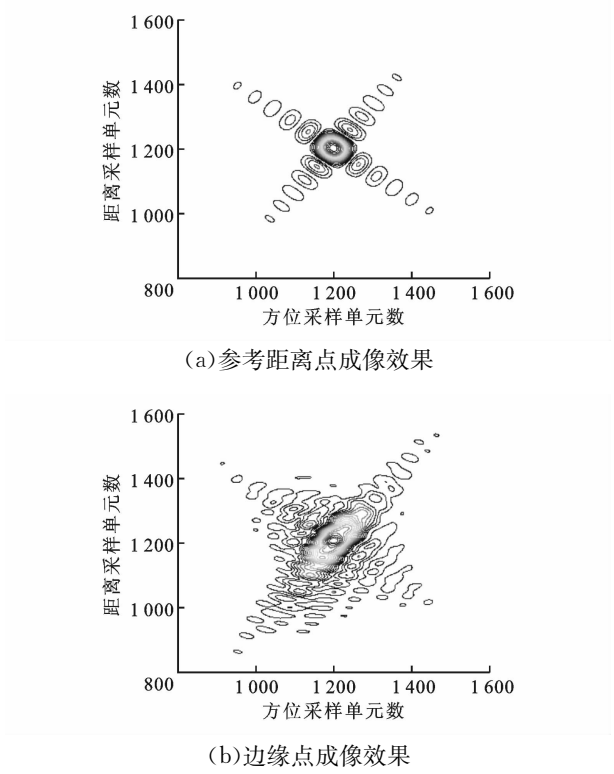


图 4 采用小斜视角频率变标算法处理的结果

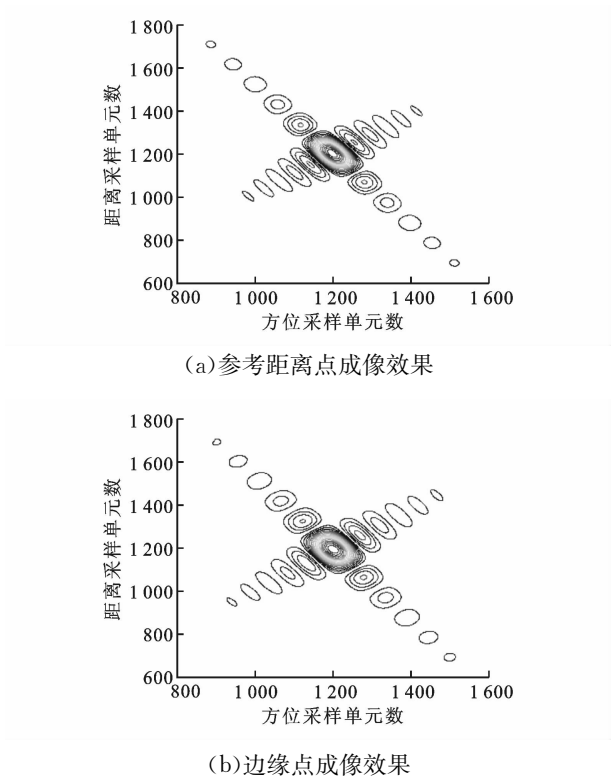


图 5 采用本文算法处理的结果

参考文献:

[1] RODRIGUEZ-CASSOLA M, BAUMGARTNER S V,

- KRIEGER G, et al. Bistatic Terra SAR-X/F-SAR spaceborne-airborne experiment; description data processing and results [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 781-794.
- [2] DARIA D, GUARNIERI A M, ROCCA F. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(7): 1362-1376.
- [3] WANG R, LOFFELD O, NEO Y L, et al. Extending Loffeld's bistatic formula for the general bistatic SAR configuration [J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2010, 4(1): 74-84.
- [4] NEO Y L, WONG F H, CUMMING I G. A comparison of point target spectrum derived for bistatic SAR processing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 2481-2492.
- [5] WALTERSCHEID I, ESPETER T, BRENNER A R, et al. Bistatic SAR experiments with PAMIR and Terra SAR-X: setup, processing, and image results [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(8): 3268-3279.
- [6] ZHANG Zhenhua, XING Mengdao, DING Jinshan, et al. Focusing parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in the wavenumber domain [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3633-3645.
- [7] LI Yanping, ZHANG Zhenhua, XING Mengdao, et al. Bistatic spotlight SAR processing using the frequency-scaling algorithm [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(1): 48-52.
- [8] WU Qisong, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. Focusing of tandem bistatic-configuration data with range migration algorithm [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(1): 88-92.
- [9] MITTERMAYER J, MOREIRA A. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [10] DAVIDSON G W, CUMMING I G, ITO M R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 32(1): 121-133.

(编辑 刘杨)