

基于方向图和多普勒相关系数的天基阵列SAR通道相位误差补偿方法

潘洁^{*①③} 王帅^{①②③} 李道京^{①②} 卢晓春^④

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(微波成像技术重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

^④(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

摘要: 随着对地观测技术的发展, 要求SAR系统能够同时实现高分辨率和宽测绘带, 天基阵列多通道SAR结合数字波束形成(DBF)技术为解决该问题提供了很好的思路, 但各个通道之间相位误差会很大程度上降低DBF的性能, 常规通道误差补偿方法估计精度不足, 应用场景受限。针对上述问题, 该文提出一种基于方向图和多普勒相关系数的天基阵列SAR通道相位误差补偿方法, 不仅利用天线方向图先验信息, 还充分利用场景不同多普勒相关性信息, 通过最小化天线方向图和多普勒的组合差异, 实现对通道之间相位误差的估计。结合RADAR-SAT数据的仿真试验结果验证了该算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 多通道; 相位误差; 天线方向图; 多普勒相关系数

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)07-1758-08

DOI: 10.11999/JEIT181061

A Channel Phase Error Compensation Method for Space Borne Array SAR Based on Antenna Pattern and Doppler Correlation Coefficient

PAN Jie^{①③} WANG Shuai^{①②③} LI Daojing^{①②} LU Xiaochun^④

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

^③(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^④(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: With the development of earth remote sensing technology, SAR system is required to obtain high resolution and wide swath simultaneously, the space borne array SAR combined with Digital Beam Forming (DBF) technology provides a good solution to solve the problem. However, the phase error between channels will degrade the quality of DBF, and the traditional compensation methods suffer from large error or limited application. In this paper, a compensation method based on antenna pattern and Doppler correlation coefficient is proposed, using the antenna pattern and meanwhile utilizing the Doppler correlation coefficient. By minimizing the combined cost function, the phase error between channels are estimated. Simulation results using RADAR-SAT data validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: SAR; Multi-channel; Channel phase error; Antenna pattern; Doppler correlation coefficient

1 引言

传统SAR系统中, 要获得方位向上的高分辨率, 需要提升发射脉冲重复频率, 而实现宽的测绘带宽度, 则需要低的脉冲重复频率, 这两者就成了一对不可调和的矛盾^[1,2]。为了缓解这一矛盾, 实现高分宽幅SAR成像, 文献^[3]提出使用波束形成技

术(Digital Beam Forming, DBF)。DBF要求各个通道之间的位置和相位关系精确已知, 从而保证通道间特性的一致性^[4]。但在实际情况中, 受加工条件、设备、环境温度、电磁辐射等因素的影响, 通过现有的测量仪器和测量方法, 不可能完全消除各个通道之间的误差^[5], 这些误差最终会对DBF处理的效果产生严重的影响^[6]。为了实现通道误差的估计和校正, 文献^[7]通过对相邻通道回波数据的相干处理, 实现了相对相位误差的估计; 文献^[8]提出

收稿日期: 2018-11-20; 改回日期: 2019-04-20; 网络出版: 2019-05-20

*通信作者: 潘洁 panj@mail.ie.ac.cn

了一种基于数据的子空间校正方法，该方法中将通道误差等效为幅相误差和方位向的位置误差，将对通道误差的估计转化为对阵列误差的估计；文献[9]提出了一种改进的位置误差泰勒级数展开方法，降低了传统模型的误差；文献[10,11]针对星载沿航向多通道SAR系统，提出了天线方向图法，该方法将天线方向图相应的值作为相对回波功率，结合协方差矩阵，估计各通道间的相对误差。以上方法或估计精度不足，或基于目标稀疏特性，不能满足多通道SAR高精度成像的需求。本文针对上述问题，基于通道误差小的情况下，方位图匹配程度高，多普勒相关系数低的事实，提出了一种天线方向图和相关系数相结合的方法，能够充分利用两者的信息，实现对各通道间的相对相位误差高精度估计和补偿，基于RADAR-SAT数据的仿真试验结果验证了本文方法的有效性。

2 多通道回波模型

设SAR系统在方位向上有 N 个通道，不妨设 N 是一个奇数，采用单个通道发射一个宽波束信号， N 个通道同时接收回波信号，对于所观测的场景如图1所示，其中 (x, y, z) 表示地面观测单元的中心坐标， θ 表示方位角， φ 表示入射角， ϕ 表示锥角， v_a 表示平台速度， X, Y, Z 方向分别表示顺轨方向，交轨方向和径向。

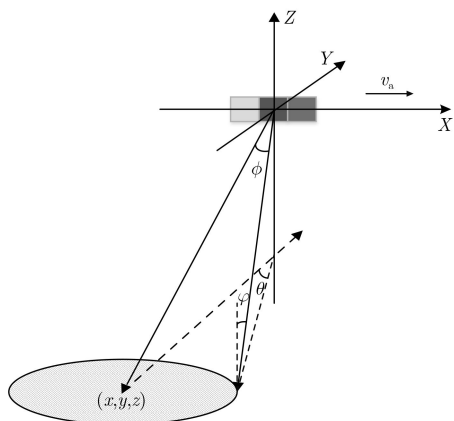


图1 SAR系统坐标系

第 n 个通道接收到的回波

$$s_n(t_r, t_a) = \sigma(x, y, z) \omega_r \left(t_r - \frac{r_n + r_0}{c} \right) \omega_a(t_a - t_{ac}) \cdot e^{-j2\pi f_0 \frac{r_n + r_0}{c}} e^{+j\pi K_r \left(t_r - \frac{r_n + r_0}{c} \right)^2} \quad (1)$$

其中， t_a 表示方位慢时间， c 表示光速， f_0 为工作频率， $r_n = \sqrt{(x - x_n - v_a t_a)^2 + y^2 + z^2}$ 为地面观测单元到第 n 个通道的瞬时距离， $r_0 = \sqrt{(x - v_a t_a)^2 + y^2 + z^2}$

为地面观测单元到参考通道的瞬时距离， $\sigma(x, y, z)$ 为该地面单元对应的复反射系数， ω_r 表示距离包络， $\omega_a(t_a)$ 表示天线方向图对应方位包络， t_{ac} 为方向图波束中心偏离时间， $x_n = (n - 1)d$ 为阵元的位置， d 为阵元间隔。考虑斜视角较小的情况下^[12]

$$r_n(t_a, x, y, z) + r_0(t_a, x, y, z) \approx 2\sqrt{v_a^2 \left(\frac{x}{v_a} - \frac{x_n}{2v_a} - t_a \right)^2 + y^2 + z^2} + \frac{x_n^2}{4\sqrt{y^2 + z^2}} \quad (2)$$

所以，补偿相位之后得到

$$s_n(t_r, t_a) \approx s_0 \left(t_r, t_a + \frac{x_n}{2v_a} \right) \quad (3)$$

其中

$$s_0(t_r, t_a) = \sigma(x, y, z) \omega_r \left(t_r - \frac{2r_0}{c} \right) \omega_a(t_a - t_{ac}) \cdot e^{-j2\pi f_0 \frac{2r_0(t_a, x, y, z)}{c}} e^{+j\pi K_r \left(t_r - \frac{2r_0(t_a, x, y, z)}{c} \right)^2} \quad (4)$$

3 基于方向图和多普勒相关系数的相位误差补偿方法

在多通道之间存在相位误差的情况下，高分宽幅成像存在较强的模糊能量。传统的通道相位误差估计方法或估计精度不足、或要求目标稀疏分布，不能满足多通道SAR高精度成像的需求。基于在通道间相位误差小的情况下，方位图匹配程度较高，模糊能量低，即多普勒相关系数低的事实，本文提出了一种天线方向图和相关系数相结合的方法，通过最小化两者的综合代价函数，实现对各通道间的相对相位误差高精度估计和补偿。该方法充分利用了天线方向图和多普勒相关系数的信息，能够实现更高精度的相位误差估计，而且同时适用于稀疏目标和分布式目标场景。

3.1 方向图代价函数

雷达观测场景如图1所示，将接收到的原始信号进行脉冲压缩处理

$$s_{rc}(t_r, t_a) = \text{IFFT}_{t_r} \{ S_0(f_{t_r}, t_a) H(f_{t_r}) \} = \sigma(x, y, z) p_r \left(t_r - \frac{2r_0}{c} \right) \cdot \omega_a(t_a - t_{ac}) e^{-j2\pi f_0 \frac{2r_0}{c}} \quad (5)$$

其中， $S_0(f_{t_r}, t_a)$ 为信号 $s_0(t_r, t_a)$ 沿距离向进行傅里叶变换的结果， f_{t_r} 为距离向频率， $H(f_{t_r})$ 为距离向匹配滤波器， $p_r(t_r)$ 为距离向压缩脉冲包络。

$$r_0 \approx \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \left(1 + \frac{(v_a t_a)^2}{2(x^2 + y^2 + z^2)} \right) \\ = R_0(x, y, z) + \frac{(v_a t_a)^2}{2R_0(x, y, z)} \quad (6)$$

联立式(5)和式(6), 距离压缩信号为

$$s_{0rc}(t_r, t_a) \approx \sigma(x, y, z) p_r \left(t_r - \frac{2r_0}{c} \right) \\ \cdot \omega_a(t_a - t_{ac}) e^{-j\frac{4\pi f_0 R_0}{c}} e^{-j\pi \frac{2(v_a t_a)^2}{\lambda R_0}} \quad (7)$$

将距离压缩之后的数据变换到距离多普勒域, 得到图像的距离多普勒域信号为

$$S_0(t_r, f_a) = \sigma(x, y, z) p_r \left(t_r - \frac{2r_{rd}(f_a)}{c} \right) \\ \cdot W_a(f_a - f_{ac}) e^{-j\frac{4\pi f_0 R_0}{c} + j\pi \frac{f_a^2}{K_a}} \quad (8)$$

其中, $r_{rd}(f_a) \approx R_0 + \lambda^2 R_0 f_a^2 / (8v_a^2)$, $W_a(f_a - f_{ac})$ 为天线方向图 $\omega_a(t_a - t_{ac})$ 的频域形式, 两者在形状上是一致的。由式(8)可以发现, 在距离多普勒域, 方位向频域幅度包络与天线方向图的形状是一致的, 在场景为分布式目标情况下上述结论也成立。因此, 可以通过最小化方位向频域幅度谱与天线方向图的差异, 实现对通道间相位误差的估计。

由式(3)第 n 个通道和参考通道的关系, 可知在距离多普勒域

$$S_n(t_r, f_a) = S_0(t_r, f_a) e^{j2\pi f_a \frac{x_n}{2v_a}} \quad (9)$$

通过DBF进行多通道融合得到完整信号

$$S(t_r, f_a) = \sum_{n=0}^{N-1} S_n(t_r, f_a) = \sum_{n=0}^{N-1} \sigma(x, y, z) \\ \cdot p_r \left(t_r - \frac{2r_{rd}(f_a)}{c} \right) W_a(f_a - f_{ac}) \\ \cdot e^{-j\frac{4\pi f_0 R_0}{c} + j\pi \frac{f_a^2}{K_a} + j2\pi f_a \frac{x_n}{2v_a}} \quad (10)$$

若通道间存在相对相位误差 $\zeta_0, \zeta_1, \dots, \zeta_{N-1}$, $\zeta_0=0$ 则

$$S_{er}(t_r, f_a) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\zeta_n} S_n(t_r, f_a) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\zeta_n} \sigma(x, y, z) \\ \cdot p_r \left(t_r - \frac{2r_{rd}(f_a)}{c} \right) W_a(f_a - f_{ac}) \\ \cdot e^{-j\frac{4\pi f_0 R_0}{c} + j\pi \frac{f_a^2}{K_a} + j2\pi f_a \frac{x_n}{2v_a}} \quad (11)$$

进行通道误差补偿, 设补偿相位为 $[\phi_{00}, \phi_{01}, \dots, \phi_{0N-1}]$, 补偿之后得到

$$S_{cp}(t_r, f_a) = \sigma(x, y, z) e^{-j\frac{4\pi f_0 R_0}{c}} e^{j\pi \frac{f_a^2}{K_a}} \\ \cdot p_r \left(t_r - \frac{2r_{rd}(f_a)}{c} \right) \\ \cdot \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(\zeta_n - \phi_{0n})} e^{j2\pi f_a \frac{x_n}{2v_a}} \\ \cdot W_a(f_a - f_{ac}) \quad (12)$$

将补偿之后的多普勒频谱与没有相位误差的多普勒谱进行比较, 得到

$$\|S_{cp}\| - \|S\| = |\sigma(x, y, z)| \left| p_r \left(t_r - \frac{2r_{rd}(f_a)}{c} \right) \right| \\ \cdot \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(\zeta_n - \phi_{0n})} e^{j2\pi f_a \frac{x_n}{2v_a}} W_a(f_a - f_{ac}) \right| \\ - \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi f_a \frac{x_n}{2v_a}} W_a(f_a - f_{ac}) \right| \\ = |\sigma(x, y, z)| \left| p_r \left(t_r - \frac{2r_{rd}(f_a)}{c} \right) \right| \\ \cdot |A_{cp} - A_a| \quad (13)$$

其中, A_{cp} 是补偿之后的方位向频域幅度谱, 计算中对多个距离单元取均值降低估计误差, A_a 是没有通道误差的情况下合成天线方向图, 工程中 A_a 可以通过地面测试或定标得到的天线方向图进行估计^[13]。通道误差的存在会导致SAR图像在方位向上出现模糊。由之前的推导可知, 在没有通道误差的情况下, 方位向频谱与天线方向图形状一样, 因此构造代价函数 $G(\phi_{00}, \phi_{01}, \dots, \phi_{0N-1})$

$$G(\phi_{00}, \phi_{01}, \dots, \phi_{0N-1}) = \|S_{cp}\| - \|S\|^2 \quad (14)$$

$$[\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_{N-1}] = \operatorname{argmin}[G(\phi_{00}, \phi_{01}, \dots, \phi_{0N-1})] \quad (15)$$

其中, $\phi_{00}, \phi_{01}, \dots, \phi_{0N-1}$ 分别为补偿各个通道的相位误差, 可知当 $\phi_{0n} = \zeta_n + \phi_c$ 时, G 可以取得最小值 0, 其中 ϕ_c 为常数。可以通过搜索方法对代价函数 G 进行优化求解获得多通道之间相位差。

3.2 多普勒相关系数代价函数

除方向图信息之外, 通道相位补偿可用信息还有场景不同多普勒图像之间的相关性。当不存在通道误差时, 通过方位向DBF处理可以抑制SAR图像中的模糊能量, 但是存在通道误差的情况下, SAR图像中的模糊能量抑制不完全^[14], 模糊图像部分和主图像存在相似特性, 利用它们之间的相关系数可以确定通道间的相位误差。

对式(12)中距离多普勒信号进行方位向脉冲压缩得到

$$g(t_r, t_a) = \text{IFFT}_{t_a} \{ S_{cp}(t_r, f_a) H_a(f_a) \} \\ = \sigma(x, y, z) p_r \left(t_r - \frac{2r_0}{c} \right) \cdot w_a(t_a - t_{ac}) e^{-j2\pi f_0 \frac{2r_0}{c}} \quad (16)$$

其中， g 为所获得2维SAR图像。当通道误差补偿不完全时，图像中不仅包含主图像分量 g_0 ，还存在模糊图像分量 g_1, g_2, \dots, g_{N-1} ^[15]，根据雷达系统参数可以计算得到主图像分量和相邻模糊图像分量之间的方位向偏移

$$\Delta a = \frac{\lambda r f_p}{2v_a} \quad (17)$$

其中， λ 为雷达工作波长， f_p 为脉冲重复频率， r 为距离。因此可以得到

$$g_{n+1}(t_r, t_a) = g_n \left(t_r, t_a - \frac{\lambda r f_p}{2v_a^2} \right) \quad (18)$$

方位向主图像分量和模糊图像分量之间存在明显的相似特性，不仅表现在幅度上面，而且表现在干涉相位上面。可以根据式(18)获得主图像和模糊图像的相对位置。由于多普勒去相关特性和图像模糊混叠现象的存在，主图像和模糊图像之间的相关系数较低，通常低于0.1，但是相关系数相对通道相位误差变化特性明显，详见仿真实验，可以作为通道误差估计的重要指标。

根据以上原理构造多普勒相关系数代价函数为

$$\text{cov}(g_0, g_1, \dots, g_{N-1}) = \sum_{l=1}^{N-1} |\text{cov}(g_0, g_l)| \quad (19)$$

$$\text{cov}(g_0, g_l) = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K g_0(i, k) g_l^*(i, k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K |g_0(i, k)|^2 \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K |g_l(i, k)|^2}} \quad (20)$$

$$[\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_{N-1}] = \arg \min [\text{cov}(g_0, g_1, \dots, g_{N-1})] \quad (21)$$

其中， I 和 K 分别为图像方位向和距离向像素点数。主图像分量和模糊图像分量是 $[\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_{N-1}]$ 的函数。当模糊现象很严重时， $\text{cov}(g_0, g_1, \dots, g_{N-1})$ 的取值较大；当方位向模糊现象得到很大的抑制时， $\text{cov}(g_0, g_1, \dots, g_{N-1})$ 的取值就会减小。因此，可以通过最小化代价函数 $\text{cov}(g_0, g_1, \dots, g_{N-1})$ ，得到一组对应的通道间相位误差估计值。

3.3 基于方向图和多普勒相关系数的相位误差补偿方法

为了实现对多通道相位误差更为准确的估计，需要充分利用方向图和多普勒相关系数两种信息，因此将这两种代价函数结合，得到

$$\Phi(\phi_{00}, \phi_{01}, \dots, \phi_{0N-1}) = G + \mu \text{cov}(g_0, g_1, \dots, g_{N-1}) \quad (22)$$

$$[\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_{N-1}] = \arg \min [\Phi(\phi_{00}, \phi_{01}, \dots, \phi_{0N-1})] \quad (23)$$

基于方向图和多普勒相关系数的多通道SAR相位补偿方法处理流程如图2所示。

采用RD算法对接收到的回波数据进行处理。首先对各个通道在距离向进行脉冲压缩处理，再对方位向进行傅里叶变换，变换到距离多普勒域。在距离多普勒域，通过DBF处理，获取方向图代价函

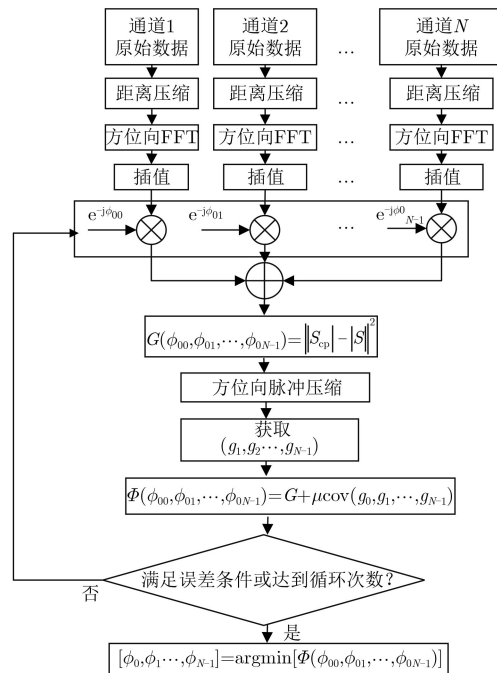


图2 算法流程图

数, 再进行方位向的脉冲压缩, 获得多普勒相关系数代价函数。结合两者构造的代价函数不仅利用了方向图匹配, 而且利用了自然场景多普勒相关信息, 两者共同约束提高估计精度。以文献[10,11]估计得到相位误差值作为初始值, 在初始值附近进行搜索, 对代价函数进行求解。当达到误差条件或循环次数时, 求出代价函数最小值所对应的一组补偿相位值, 作为通道相位误差的估计值。

4 仿真实验

为了对算法的有效性进行验证, 开展了计算机数值仿真, 仿真的参数如表1所示。

表 1 雷达系统参数

参数	数值
雷达工作频率(GHz)	5.3
雷达有效速度(m/s)	150
中心斜距(km)	20
PRF(Hz)	40
带宽(MHz)	50
信噪比(dB)	20
方位向通道数	3

首先对单个点目标进行了仿真验证, 设定各个通道相对于参考通道的相位误差分别为 0° , -8.60° , 8.60° , 成像结果如图3所示, 相应目标位置方位向切片如图4所示, 可以看到成像结果中出现明显的模糊现象。

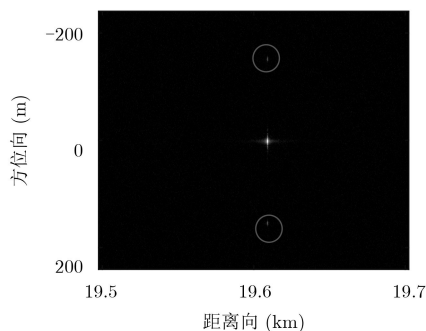


图 3 通道融合之后的点目标

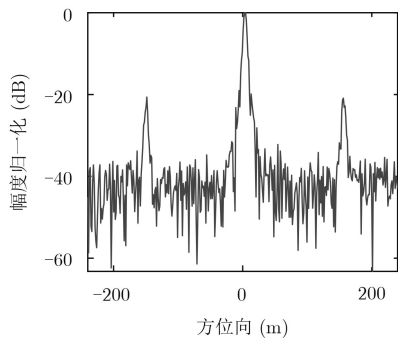


图 4 通道融合之后的方位向切片

采用本文方法对通道间的相位误差进行估计, 得到相对于参考通道的误差分别为 0° , -8.75° , 8.75° 。在估计的基础上, 进行相位补偿之后成像结果如图5所示, 相应目标位置方位向切片如图6所示, 可以看到模糊得到了较大程度的抑制。而利用文献[10,11]中的天线方向图法得到相对于参考通道的误差分别为 0° , -6.87° , 11.02° , 本文方法估计值更靠近真实误差。

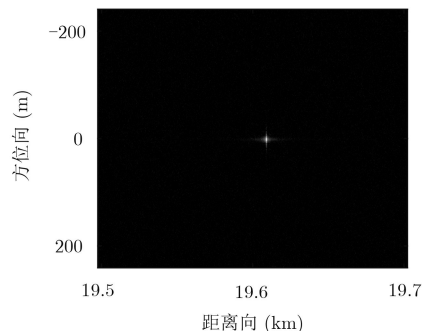


图 5 补偿相位误差之后的点目标

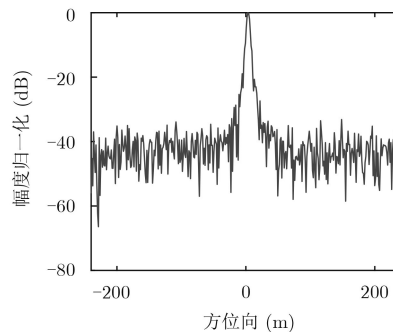


图 6 补偿之后方位向切片

对多点目标组成的分布式目标进行仿真验证, 设定各个通道相对于参考通道的相位误差分别为 0° , -17.19° , 17.19° , 多个通道融合之后得到成像结果如图7所示, 此时主图像和模糊图像之间的相关系数是0.030。为了更好地研究图像中出现明显的模糊现象进行了切片分析, 如图8所示。

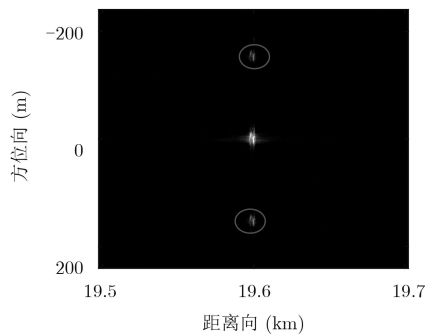


图 7 通道融合之后分布式目标

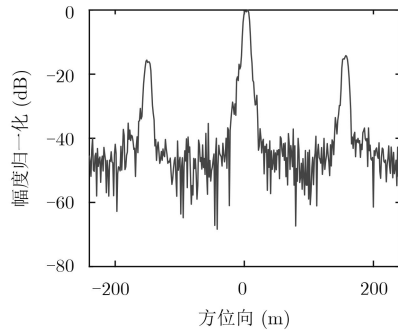


图8 通道融合之后方位向切片

采用本文方法对通道间的相位误差进行估计, 得到相对于参考通道的误差分别为 $0^\circ, -16.89^\circ, 16.89^\circ$ 。在估计的基础上, 进行相位补偿, 得到的图像如图9和图10所示, 可以看到模糊得到了较大程度的抑制, 此时主图像和模糊图像之间的相关系数是0.012, 可以看到经过补偿之后的相关系数得到很大的降低。而利用文献[10,11]中的天线方向图法得到相对于参考通道的误差分别为 $0^\circ, -12.88^\circ, 11.66^\circ$, 补偿之后的结果如图11和图12所示, 此时主图像和模糊图像之间的相关系数是0.026。可见本文算法补偿之后相关系数比天线方向图法低一倍左右, 模糊抑制高10 dB以上, 验证了本文通道相位补偿算法的有效性。

通过蒙特卡洛仿真实验来分析通道相位误差估计精度相对于信噪比(SNR)的变化情况, 通道相位

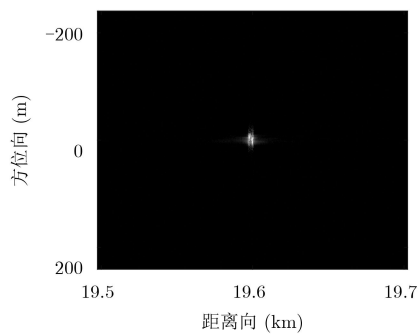


图9 本文方法补偿相位之后

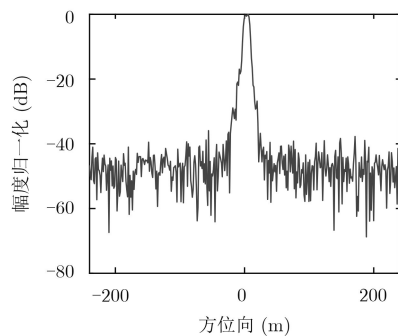


图10 本文方法补偿相位之后方位向切片

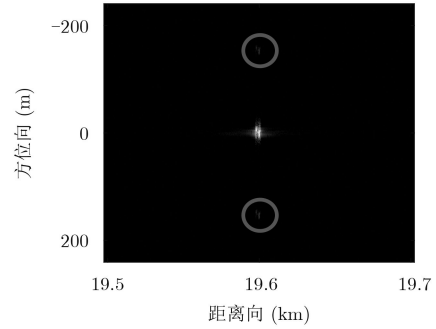


图11 方向图方法补偿之后

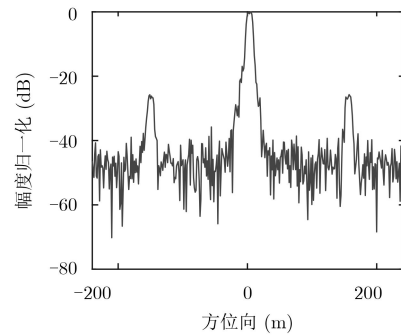


图12 文献[10,11]方向图方法方位向切片

误差的估计精度用平均均方差(ARMSE)来衡量, 估计得到的相位误差ARMSE定义为[16]

$$\sigma_\phi = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sigma_{\phi_k} \quad (24)$$

$$\sigma_{\phi_k} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\hat{\phi}_{km} - \phi_k)^2} \quad (25)$$

其中, σ_{ϕ_k} 表示第 k 个通道估计相位误差得到的均方差(RMSE), M 表示蒙特卡洛仿真实验的次数, ϕ_k 表示第 k 个通道相对于参考通道的相位误差值, $\hat{\phi}_{km}$ 表示第 k 个通道在第 m 次试验中所估计得到的相位误差估计值。

蒙特卡洛仿真得到通道相位误差估计精度相对于SNR的变化绘制在图13中, 信噪比从5 dB到30 dB变化, 可以看到伴随着SNR的增大, 相位误差的估

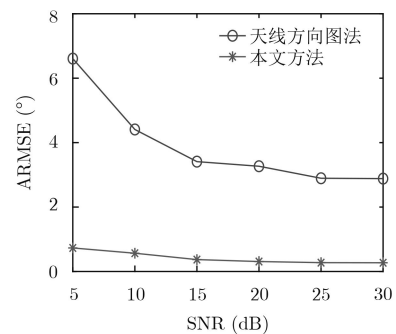


图13 通道相位误差估计精度随SNR变化

计精度逐渐提高。同时,将本文所提方法与天线方向图法进行了对比,可以看到本文方法估计精度优于天线方向图法,验证了本文方法的有效性。

基于RADAR-SAT实测数据进行多通道仿真,主要参数如表2所示。对RADAR-SAT原始信号进行方位向抽取,获得方位向3通道数据,对3个通道分别添加相位误差 0° , -16° , 25° ,得到SAR图像如图14所示,可以看到,由于通道误差引入了方位模糊,使得图像纹理清晰度较差,而且图像阴影区域存在较为明显的模糊能量。

表2 实际系统的主要参数

参数	数值
工作频率(GHz)	5.3
带宽(MHz)	30
采样率(MHz)	32.3
PRF(Hz)	1256.98
速度(m/s)	7062
通道数	3
相邻通道间的距离(m)	1.9

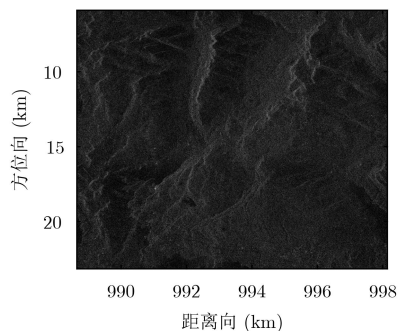


图14 存在通道误差的成像结果

用本文方法对通道相位误差进行估计,相对于参考通道,得到相位误差分别为 0° , -15.88° , 25.54° 。利用本文方法进行相位误差估计和补偿后,对3个通道进行融合处理,得到如图15所示的结果,可以看到模糊现象得到了良好的抑制,此时主图像和模

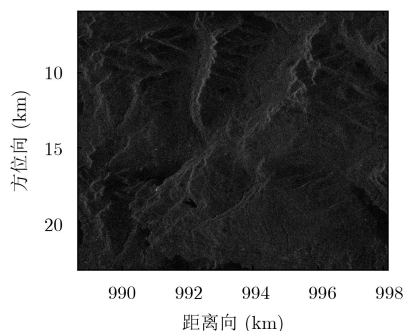


图15 通道误差补偿之后的结果

糊图像之间的相关系数是0.008。而利用文献[10,11]中的天线方向图法估计得到相位误差分别为 0° , -11.24° , 27.34° ,对应主图像和模糊图像之间的相关系数是0.011。可见本文方法相位误差估计精度更高,方位模糊抑制效果更好,验证了本文方法的有效性。

5 结束语

高分宽幅是SAR技术发展的重要方向,然而传统单通道SAR系统中,方位向高分辨率和宽测绘带是一对不可调和的矛盾。天基阵列多通道SAR系统结合DBF技术,为缓解这一矛盾提供了很好的思路,但是多通道相位误差会导致DBF处理结果极大恶化,常规基于天线方向图的相位补偿方法容易受到噪声影响,且依赖高精度天线方向图先验知识,相位误差估计精度不足、模糊能量抑制不完全。本文针对上述问题,提出了一种基于方向图和多普勒相关系数的天基阵列SAR通道相位误差补偿方法,本文方法不仅利用了方向图信息,而且充分利用了场景主图像和模糊图像之间的多普勒相关性信息,通过两种信息构造代价函数,将通道相位误差估计问题转化为代价函数的优化求解问题,优化方向图匹配误差的同时最小化图像中模糊能量,降低了对信噪比和高精度天线方向图的依赖,大大提高了多通道相位误差估计精度。该方法不仅适用于稀疏目标场景,也适用于分布式目标场景,基于RADAR-SAT数据的仿真试验表明,本文方法相位误差估计精度优于 1° ,验证了本文方法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 叶恺,禹卫东,徐伟,等.基于柱形抛物面天线的MIMO SAR研究[J].电子与信息学报,2018,40(8):1816-1822. doi: 10.11999/JEIT171105.
YE Kai, YU Weidong, XU Wei, et al. Investigation on parabolic cylinder reflector based MIMO SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(8): 1816-1822. doi: 10.11999/JEIT171105.
- [2] DING Chibiao, LIANG Xingdong, WANG Jie, et al. An novel airborne MIMO-SAR system built in IECAS[C]. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Fort Worth, USA, 2017: 2423-2426. doi: 10.1109/IGARSS.2017.8127481.
- [3] 周建卫,李道京,田鹤,等.基于共形稀疏阵列的舰载外辐射源雷达性能分析[J].电子与信息学报,2017,39(5):1058-1063. doi: 10.11999/JEIT160846.
ZHOU Jianwei, LI Daojing, TIAN He, et al. Performance analysis on airship-borne passive radar based on conformal

- sparse array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1058–1063. doi: [10.11999/JEIT160846](https://doi.org/10.11999/JEIT160846).
- [4] QIN Lilong, VOROBYOV S A, and DONG Zhen. Joint cancelation of autocorrelation sidelobe and cross correlation in MIMO-SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(6): 931–935. doi: [10.1109/LGRS.2017.2688122](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2688122).
- [5] TRIDON D B, BACHMANN M, DE ZAN F, *et al.* Tandem-L observation concept - contributions and challenges of systematic monitoring of earth system dynamics[C]. Proceedings of the 18th International Radar Symposium, Prague, Czech Republic, 2017: 1–9. doi: [10.23919/IRS.2017.8008159](https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008159).
- [6] MA L, LI Z F, and LIAO G L. System error analysis and calibration methods for multi-channel SAR[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 112: 309–327. doi: [10.2528/PIER10120808](https://doi.org/10.2528/PIER10120808).
- [7] LIU Yanyang, CUI Lei, XU Youshuan, *et al.* A novel signal-cancellation-based channel phase bias calibration algorithm for spaceborne multi-channel HR WS SAR in azimuth[C]. 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Singapore, 2015: 494–497. doi: [10.1109/APSAR.2015.7306257](https://doi.org/10.1109/APSAR.2015.7306257).
- [8] LI Zhenfang, BAO Zheng, WANG Hongyang, *et al.* Performance improvement for constellation SAR using signal processing techniques[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(2): 436–452. doi: [10.1109/TAES.2006.1642562](https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1642562).
- [9] LIU Aifei, LIAO Guisheng, XU Qing, *et al.* An improved array-error estimation method for constellation SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 90–94. doi: [10.1109/LGRS.2011.2161262](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2161262).
- [10] YANG Taoli, LI Zhenfang, LIU Yanyang, *et al.* Channel error estimation methods for multichannel SAR systems in azimuth[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 548–552. doi: [10.1109/LGRS.2012.2212873](https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2212873).
- [11] 杨桃丽, 李真芳, 刘艳阳, 等. 两种星载高分辨宽测绘带SAR系统通道相位误差估计方法[J]. *电子学报*, 2013, 41(5): 931–935. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2013.05.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2013.05.016).
- YANG Taoli, LI Zhenfang, LIU Yanyang, *et al.* Two channel phase error estimation methods for spaceborne HRWS SAR system[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(5): 931–935. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2013.05.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2013.05.016).
- [12] 张福博, 刘梅. 基于频域最小二乘APES的非均匀多基线SAR层析成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(7): 1568–1573. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.01184](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.01184).
- ZHANG Fubo and LIU Mei. Uneven multi-baseline SAR tomography base on frequency domain least squares amplitude and phase estimation (APES)[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(7): 1568–1573. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.01184](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.01184).
- [13] 杨桃丽. 星载多通道高分辨宽测绘带合成孔径雷达成像处理技术研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2014: 58–65.
- YANG Taoli. Study on spaceborne multi-channel high resolution and wide swath SAR imaging[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2014: 58–65.
- [14] RINCON R, FATOYINBO T, OSMANOGLU B, *et al.* Development of NASA'S next generation L-band digital beamforming synthetic aperture radar (DBSAR-2)[C]. Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Synthetic Aperture Radar Conference 2016, Hamburg, Germany, 2016: 1–4.
- [15] 范怀涛, 张志敏, 李宁. 基于特征分解的方位向多通道SAR相位失配校正方法[J]. *雷达学报*, 2018, 7(3): 346–354. doi: [10.12000/JR17012](https://doi.org/10.12000/JR17012).
- FAN Huaitao, ZHANG Zhimin, and LI Ning. Channel phase mismatch calibration for multichannel in azimuth SAR imaging based on Eigen-structure method[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(3): 346–354. doi: [10.12000/JR17012](https://doi.org/10.12000/JR17012).
- [16] ZHANG Linjian, GAO Yesheng, and LIU Xingzhao. Fast channel phase error calibration algorithm for azimuth multichannel high-resolution and wide-swath synthetic aperture radar imaging system[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2017, 11(3): 035003. doi: [10.1117/1.JRS.11.035003](https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.035003).
- 潘 洁: 女, 1977年生, 高级工程师, 博士生, 研究方向为稀疏阵列雷达系统.
- 王 帅: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像技术.
- 李道京: 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达系统和雷达信号处理.
- 卢晓春: 女, 1970年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为精密时间信息传输与信息处理.