第 36 卷 第 2 期
2017 年 3 月

应用声学
Journal of Applied Acoustics

Vol. 36, No.2
March, 2017

◇ 研究报告 ◇

PGA算法在条带式SAS场景目标成像中的应用

段江涛[1,2] 黄 勇[1] 刘纪元[1†]

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 本文针对条带式合成孔径声呐(SAS)对场景目标成像应用中面临的方位向残余相位误差导致成像质量降低的问题，探讨了相位梯度自聚焦(PGA)算法在条带式SAS成像方位向相位误差估计和补偿中的应用方法，通过自适应的选点及窗宽估计处理以提高算法对场景目标的适应性，最后通过对场景目标成像的实际湖试数据进行处理和分析，结果验证了该算法改善条带式SAS对场景目标成像质量的有效性。

关键词 条带式，自聚焦，相位梯度法，自适应

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2017)02-0175-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.02.013

The application of phase gradient autofocus algorithm to stripmap SAS imaging for scene targets

DUAN Jiangtao[1,2] HUANG Yong[1] LIU Jiyuan[1]

(*1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

(*2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract The application of phase gradient autofocus (PGA) algorithm to stripmap synthetic aperture sonar (SAS) imaging for scene targets is discussed. The problem of how to embed PGA in an imaging algorithm of SAS is analysed and the PGA method which could perform the operation of isolated scatter points selecting and windowing in the autofocus steps highly adaptively is proposed for stripmap SAS to improve its adaptability to the scene targets . The method is applied to a lake-trial dataset of scene targets and the result shows that it could improve the imaging quality of stripmap SAS for scene targets.

Key words Stripmap, Autofocus, Phase gradient, Adaptive

2016-03-16 收稿; 2016-10-17 定稿

作者简介: 段江涛 (1985-), 男, 河南荥阳人, 博士研究生, 研究方向: 水声信号处理。

†通讯作者 E-mail: ljy@mail.ioa.ac.cn

1 引言

合成孔径声呐(Synthetic aperture sonar, SAS)是一种水下高分辨率的成像设备。其合成孔径成像可以看成方位向的一维全息过程，一个理想点目标的回波在方位向上的波形是线性调频(LFM)信号；SAS方位向的波束锐化和高分辨率可以看作对这个方位向的回波多普勒信号进行脉冲压缩的结果。在合成孔径声呐成像过程中，载体随机振动和不规则运动、声波传播媒介不稳定等难以避免的因素的干扰会导致接收信号的方位向相位中叠加了未知的相位误差，其中部分误差可以通过运动补偿方法进行修正，但仍然会有相当部分的残余相位误差的存在，使得最终的成像结果在方位向产生散焦和模糊[1−2]。

各种相位误差对条带式SAS成像效果的直观影响可参见文献[3]。对方位向相位误差项进行正交的勒让德级数展开，可以从理论上相对独立地分析出各次相位误差对脉冲压缩成像质量的影响[4]。线性相位误差项只造成整幅图像的偏移，不影响图像的聚焦效果；二次相位误差使得脉冲压缩后的波形主瓣展宽、峰值下降，同时旁瓣升高；三次相位误差会使脉冲压缩的结果产生非对称性畸变，即右侧旁瓣升高、主瓣向左展宽，它和二次相位误差都会使成像结果产生几何失真，分辨率受损；四次相位误差主要使脉冲压缩后的旁瓣对称地升高，而对主瓣影响不大，可以忽略；更高次的相位误差可以近似看成高频正弦相位误差，它在合成孔径时间内变化较快。阵元的相位中心的振动是高频正弦相位误差的主要来源，它主要使得系统冲击响应的旁瓣升高而对主瓣影响不大，在图像中产生成对回波，导致出现虚假目标和重影。

解决上述问题的技术途径之一是用图像自聚焦算法估计出接收回波信号中的残余相位误差，对回波信号进行相应的相位补偿之后再成像，从而使方位向分辨率得到一定程度的改进[1−2,5]。可以说，图像自聚焦技术是SAS成像中解决方位向残余相位误差并最终获得衍射极限级别分辨率的必由之路；辅以中等精度的姿态和位置传感器，自聚焦技术即可在提供精细分辨能力的同时，避免偏移相位中心(Displaced phase centers, DPC)法运动补偿对测绘速度的损失，进而提升系统的整体性价比。条带式SAS的自聚焦算法大致可以分为两类[6]。第一类主要是基于模型的如图像偏移(Map drift)自聚焦算法，一般只对二次相位误差比较有效，如果要估计出更高阶的相位误差需要进行多视处理，它主要是靠估计出一个更加精确的方位线性调频率来提高方位向的成像质量；另一类是无模型的自聚焦算法，它们大都基于相位梯度法(PGA)，不需要对相位误差进行多项式的模型假设。

2 PGA自聚焦算法

2.1 PGA算法中相位误差梯度的估计

2.1.1 相位误差梯度的线性无偏最小方差估计

SAS数据经过粗聚焦后成为带有残余运动误差的聚焦图像。假定相位误差随方位向变化，在距离向不变，设回波信号的幅度为A，$\Phi_e(n)$为方位向的残余相位误差，则方位压缩后的信号表达式为

$$s_e(n)=A\exp\{\mathrm{j}\Phi_e(n)\},\quad 0\leqslant n<N. \tag{1}$$

方位向残余相位误差的存在使图像在方位向散焦，PGA算法的作用就是要补偿这一部分相位误差。对式(1)进行傅里叶变换后为

$$S_e(k)=\sum_{n=0}^{N-1}s_e(n)\cdot\exp\Big(-\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}n\Big),0\leqslant k<N, \tag{2}$$

可得

$$s_e(n)=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}S_e(k)\cdot\exp\Big(\mathrm{j}\frac{2\pi n}{N}k\Big),\quad 0\leqslant n<N, \tag{3}$$

$$s_e(n+1)=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}S_e(k)\exp\Big(\mathrm{j}\frac{2\pi(n+1)}{N}k\Big),\quad 0\leqslant n+1<N. \tag{4}$$

令$d(n)$为$s_e(n)$的一阶差分，那么当满足$|\Phi_e(n+1)-\Phi_e(n)|\ll 1$时有

$$\begin{aligned}d(n)&=\nabla s_e(n)\\&\approx A\exp\{\mathrm{j}\Phi_e(n)\}\cdot\mathrm{j}[\Phi_e(n+1)-\Phi_e(n)]\\&=A\exp\{\mathrm{j}\Phi_e(n)\}\cdot\mathrm{j}\Delta\Phi_e(n),\end{aligned} \tag{5}$$

再根据上述傅里叶变换对式(3)和式(4)，得到

$$d(n)=\nabla s_e(n)=s_e(n+1)-s_e(n)$$
$$=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}S_e(k)\cdot\left\{\exp\left(\mathrm{j}\frac{2\pi(n+1)}{N}k\right)-\exp\left(\mathrm{j}\frac{2\pi n}{N}k\right)\right\}\approx\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}S_e(k)\cdot\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}k, \tag{6}$$

从而得到相位误差梯度 $\Delta\Phi_e(n)$ 为

$$\Delta\Phi_e(n)=\frac{\mathrm{Im}[s_e(n)\cdot s_e^*(n)]}{|s_e(n)|^2}. \tag{7}$$

2.2　相位误差梯度的最大似然估计

式 (7) 适用于较高信噪比的情况，在实际应用中不一定总是满足，故而用它来对相位误差进行估计一般需要多次迭代。文献 [7] 利用特征向量法推导出了相位误差梯度的最大似然估计，并证明了其估计方差达到了 Cramer-Rao 界。当仅用相邻两个方位的数据进行估计时，它们之间的相位梯度的最大似然估计为

$$\Delta\Phi_e(n)=\arg\left\{\sum_{k=0}^{N-1}S_e^*(k-1)\cdot S_e(k)\right\}, \tag{8}$$

用式 (8) 来进行计算时更为容易处理，在实际中获得了更为广泛的应用。

2.3　用于聚束模式的经典相位梯度法

经典的相位梯度自聚焦算法 [8] 的运算步骤如下 [8]：

(1) 选点和圆移：先在每个划分的距离单元之内选择出一个强散射点，有利于保证相对较高的信噪比及信杂比；然后用圆移操作使所选的强点目标居中，从而去除点目标位置带来的信号频谱相位中的线性项。

(2) 加窗：对圆移之后的数据进行方位向加窗。加窗操作可以进一步提高所选择的强点目标的信杂比。

(3) 相位误差估计：按照式 (8) 计算相位误差梯度。

(4) 求和计算相位误差：计算出全部的相邻方位上的相位误差后，用离散求和来得到整个孔径上的方位向相位误差；聚束模式下可认为所有的距离单元内的相位误差相同，可以对多个距离单元估计出的结果进行算术平均作为一次估计的结果。

对以上 4 步做迭代，每次迭代的窗宽逐渐减小，以提高目标的隔离度，最终完成相位误差的估计和校正。

这样进行处理的原因是一个适当解斜 (Dechirp) 后的点目标的方位向 (和距离向去耦合后) 的信号是单频的正弦波，它的频率和压缩后的目标方位向位置成正比。解斜后目标的平均频率可以通过 FFT 得到。这样，可以从解斜后的数据中除去该平均频率，而将残余相位项看成是相位误差。去除平均频率后，能得到相邻采样之间的相位 (即频率的积分加上初相位) 增量，理想情况下每个采样上的相位增量应该为零，其在特定相位历程段的相位零偏就是需要校正的相位。

2.4　条带式和聚束式自聚焦的差异

经典的 PGA 算法最早是针对聚束式合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 提出的 [8]。对于聚束模式而言 [9]，发射波束一直照射在某一恒定的成像区域，此区域内所有点目标叠加进来的相位误差是相同的，其形式为方位的一维函数；回波数据的空间频谱和相位误差是相乘的关系。而实际上，几乎所有的 SAS 都工作在条带模式下。在条带模式下，波束先后扫射过的测绘带里，不同方位目标叠加进来的相位误差存在差异，回波信号的空间频谱与相位误差表现为卷积的关系。

因此，经典的 PGA 算法不能直接用于条带模式的 SAS，需要做相应的调整。应用于条带式合成孔径成像的 PGA 算法主要有两种：第一种是将标准的 PGA 算法流程进行改进使之适用于条带模式的合成孔径成像 [10]；第二种是将条带式下合成孔径回波数据进行相应变换，使其一定程度上具有与聚束模式下相似的特性 [5,11]，然后利用标准 PGA 算法，其中文献 [11] 较为详细地介绍了这种方法在实际系统上的应用。为此，本文针对第一种思路进行改进研究。

3　PGA 算法与具体成像算法的结合

PGA 自聚焦具体实现时需要在估计相位误差中不断迭代，因此必须嵌入到具体的成像算法中才能发挥作用。为此需要解决在成像处理进行中如何得到 PGA 所需要的输入数据，即已经对齐的去除

了距离向和方位向耦合的距离压缩相位历史域的数据，这是整个处理流程中非常关键的一环。针对SAS系统，因为距离多普勒(RD)算法一般只适合波束开角较小的情况，在声呐成像中应用的较少，这里主要对ω-k和CS(Chirp scaling)算法进行分析。

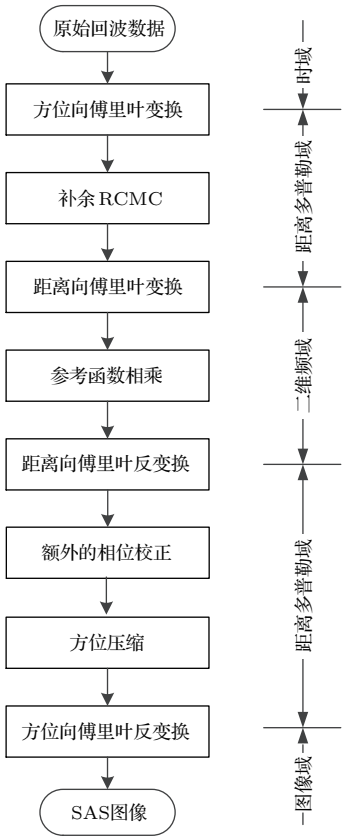

图1 CS算法流程图

Fig. 1 CS algorithm flow-process diagram

ω-k算法(也称RMA算法)是一种集精确和高效于一体的波数域算法[6]，在合成孔径声呐成像中得到了很好的应用[12−13]，但其由于自身的特点，它难以直接与PGA算法结合起来[14−16]。即使对于合成孔径雷达里聚束式的ω-k算法成像，也需要进行数据调整，如进行必要的预处理进行数据对齐、归一化等[17]。因此，有一些带自聚焦功能的实际SAR系统，采用容易进行自聚焦处理的PFA(Polar format algorithm)或RD成像算法来完成自聚焦[18]中的相位误差估计，在去除相应的相位误差后，再用ω-k算法来进行最终成像。在这些已经公开发表的文献中，对ω-k算法成像中如何嵌入PGA自聚焦算法做了有益的尝试，但它们主要是针对SAR系统的，和条带式SAS系统存在一定的差异，如文献[18]中认为存在交叠在一起的方位向的相同相位误差，相位对齐也主要对此而言，而对条带式SAS，这种假设是不成立的。因此，以上提到的几种PGA和ω-k结合的方法对于条带式SAS是否适用和有效，有待进一步的分析和验证。

同样作为一种高效的频域聚焦算法，CS算法可以很好地应用于条带式SAS的成像处理中[19]，和PGA等自聚焦算法相结合，在SAR中已有了应用[20]。因此，本文的PGA自聚焦算法将嵌入到CS成像算法中进行使用，由CS算法为条带式SAS自聚焦中的相位梯度估计输出距离压缩和距离徙动校正后、方位压缩前的距离多普勒域的回波信号，如图1所示。同时因为CS算法属于频域类成像算法，实际应用中要考虑多子阵情况下的非均匀采样问题和对方位向非均匀速度适应性问题。本文采用基于NFFT方法[21]的CS算法，它的运算效率略低，但它可以适应多接收子阵的非均匀采样问题，并对载体平台的速度不均匀有一定的宽容性。

具体实施如图2所示，先将粗聚焦后的图像数据在距离向和方位向上纵横交错的进行分块，保证

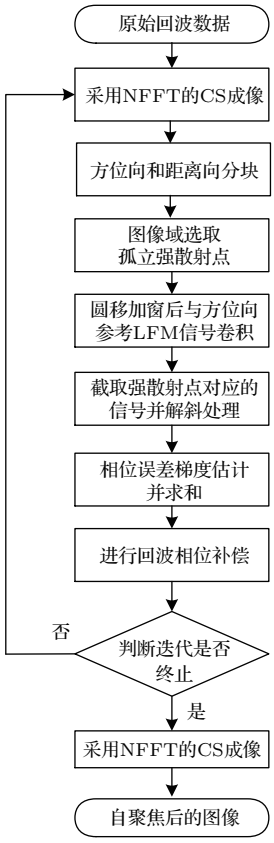

图2 嵌入CS算法的条带式下PGA方法流程图

Fig. 2 PGA algorithm flow-process diagram for strip map SAS embedded in CS algorithm

所分的各个块内相位误差的空变性尽量小；然后在图像域中选取强散射点，这样可以避免传统选点方法需先将信号从图像域变换到方位压缩前的 FFT 等复杂运算；接着通过圆移操作使得各强散射点居中，按照一定的准则进行加窗后再跟方位向的参考 LFM 信号进行卷积，从而得到该强散射点在方位压缩前的信号 [10]；接下来在数据中从强点目标原来的位置向两边各截取半个合成孔径长度并做解斜处理，然后再按照式 (8) 对相位误差的梯度进行计算，最后对多个强点处的相位误差的梯度进行求和得到方位向的相位误差；之后将估计出的相位误差对回波数据进行补偿并重新成像；迭代进行以上过程，直到相位误差低于一定的阈值即可停止迭代。

4　适用于场景目标成像的 PGA 算法

前述的 PGA 算法实施步骤中的选点和加窗操作非常关键。采用何种准则选定强点目标，窗函数的宽度如何确定，这些问题都直接影响着 PGA 算法的聚焦性能及收敛速度。此前的很多条带式 SAS 中的 PGA 应用都侧重于孤立的点目标 [1,5]，其成像场景不是很复杂，对选点和加窗的要求不是很高；但对于一些复杂的场景目标的成像，由于存在大量离散的强散射源，导致回波信号的成分更加复杂，以致于基本 PGA 算法的适用性较差。表现在选点和窗宽选择时所使用的参数难以与处理数据匹配，使得算法对误差估计的准确度降低以及迭代次数的增加，有时甚至会导致更大的相位误差 (算法发散)。

针对这种情况，本文采用的 PGA 自聚焦算法在选点及加窗操作时，选点的门限和窗口的大小能依据粗聚焦的数据实现一定程度的自适应调整，以使算法在处理复杂成像场景数据时也能准确地估计出相位误差，从而使算法的聚焦性能更加稳定，同时可以降低迭代次数。

4.1　自适应的选点

将所分割出的距离单元内数据幅度的平均值作为门限时，点扩展函数超过此门限的部分所对应的宽度可视为点扩展函数展宽的宽度，对孤立的强散射点而言，此宽度可作为点扩展函数的宽度，该宽度的周围主要是一些比较弱小的杂波。而对那些非孤立的强散射点来说，存在多个强点目标的主瓣和旁瓣且彼此间交互叠加，波形呈现为许多个窄波。这种情形下，幅度最大的像素点所在的窄波与均值门限切割决定的宽度内所包含散射点能量不完全，附近依然存在很多较强的信号，因此要进行一定的统计建模后再确定最佳的门限。

在大范围的声呐成像中对杂波幅度进行统计分析时，可以用 Weibull 分布或更复杂的 K-分布来建模 [22]。这里选用 Weibull 分布，其概率密度函数为

$$W(A)=\frac{\delta}{\beta}\Big(\frac{A}{\beta}\Big)^{\delta-1}\exp\Big\{-\Big(\frac{A}{\beta}\Big)^{\delta}\Big\},\quad A\geqslant 0, \tag{9}$$

其中，β 为尺度参数，δ 表示形状参数。Weibull 分布相对于一般的 Rayleigh 模型能提供更强的适应性，其中的尺度参数和形状参数通过输入图像数据后用最大似然估计法求得 [21]，具体实现可参考 Matlab 里的 wblfit 函数。

根据实际情况，取杂波幅度超过门限 $A_{\rm th}$ 的概率最大值为 P_0，

$$1-\int_0^{A_{\rm th}} W(A)\mathrm{d}A\leqslant P_0, \tag{10}$$

则由式 (10) 可求出所需要的幅度阈值 $A_{\rm th}$。

综上，自适应选点的流程如下：(1) 先对扩展函数的宽度进行估计，求出分块单元内的数据幅度的算术平均值，对分块单元内最大值点的方位向位置进行记录，接着在最大值位置的两边分别找到首个幅度低于算术平均值的图像点 s_1 和 s_2，两者的间隔当作点扩展函数的宽度。(2) 然后由分块单元内图像数据幅度计算 Weibull 分布尺度参数和形状参数的最大似然估计，并根据经验或现场测算设定杂波幅度超过门限的概率 P_0，进而由式 (10) 求出幅度阈值 $A_{\rm th}$。(3) 最后统计 s_1 和 s_2 两点外幅度值超过阈值 $A_{\rm th}$ 的像素个数，当其占统计样本总数的比例低于 P_0 时，判定此强点是孤立的散射点，否则属于非孤立的散射点，不作为备选点。

4.2　自适应的加窗窗宽确定

由于受到各种相位误差的干扰，导致经解斜处理后的窄脉冲信号波形产生严重的非对称性，此时不易找出合适的加窗宽度。用二阶差分求包络可以一定程度地改善该问题。

本文所采用的确定窗宽的过程如下：(1) 先通过二次差分求出波形的包络。波形的包络一般较原脉冲信号更加平滑，更有利于进行窗宽的确定。通过连接波形的一次差分值中的正负转变点可得到

信号的包络。当方位向的相位误差较大时，可以进一步通过二次差分得到更平滑的包络来确定窗宽。(2) 然后寻找所得的包络构成采样样本中极大值两边首个呈现相对缓慢起伏的样本点来确定包络的宽度，该宽度可以作为所选择的加窗的宽度。在实际计算时，假设在包络的最高点即极大值的一侧有(a, b, c, d)4 个相邻的采样点，a 是靠近最高点的一端；若满足 $|b-c| < 0.1(a-b)$ 且 $|2c-b-d| < 0.1b$，则判定点 b 是包络的该侧第一个起伏缓慢的点，作为所寻找窗口在此侧的端点，用于后续的窗宽确定。

5 对场景目标数据的自聚焦性能验证

为了验证上述 PGA 自聚焦算法对条带式 SAS 场景目标成像数据的自聚焦性能，特选取了一段实际的湖试数据进行验证，其成像的场景目标是浙江省境内的千岛湖水域下的一处在数十年前修建水库时废弃的民居，位于水深约 75 m 处。

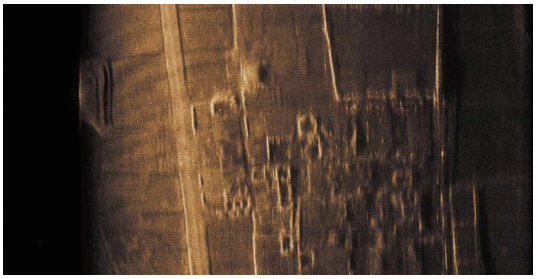

图 3 未采用 PGA 自聚焦的成像结果

Fig. 3 Imaging result without PGA

图 3 是湖试数据只用 DPC 运动补偿 (不用前述的 PGA 自聚焦算法) 处理后的成像结果，图 4 是 DPC 运动补偿后进一步用前述的 PGA 算法进行自聚焦处理 5 次迭代后的结果。图像纵向对应的实际长度为 70 m，分辨率为 5 cm；横向对应的距离为 200 m，分辨率为 4 cm。根据对实际数据的测试，将式 (10) 中杂波幅度超过门限的概率 P_0 实际取为 0.2。从对湖试的场景目标数据的自聚焦前后的成像结果对比可以看出，能够自适应地进行选点及窗宽估计的 PGA 算法对条带式 SAS 下的场景目标成像具有一定的适应性；经过 PGA 自聚焦处理后，成像目标信噪比有较大提高，多个不同方位和距离块内目标的方位向的纹理细节较自聚焦前更加清晰，部分重影和方位向的模糊得到有效抑制，从而提高了 SAS 图像的可判读性，有利于后续目标分割和识别工作。

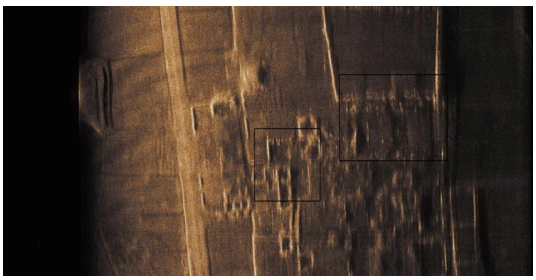

图 4 采用 PGA 自聚焦后的成像结果

Fig. 4 Imaging result with PGA

6 结论

对于条带式 SAS 系统，可以将 PGA 自聚焦算法嵌入到 CS 成像算法中进行迭代估计相位梯度误差。为解决场景目标成像时的适应性和稳健性问题，本文尝试将自适应选点及窗宽估计的 PGA 算法应用于条带式合成孔径声呐成像中。通过实际湖试数据的处理和分析，证明了该算法可以一定程度上改善条带式 SAS 对场景目标的成像质量。

参 考 文 献

[1] HAYES M P, GOUGH P T. Synthetic aperture sonar: A review of current status[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(3): 207–224.

[2] 刘纪元, 唐劲松, 孙宝申, 等. 合成孔径声呐成像自聚焦方法研究 [J]. 声学学报, 2003, 28(2): 151–154.
LIU Jiyuan, TANG Jinsong, SUN Baoshen, et al. On the autofocus of synthetic aperture sonar[J]. Acta Acustica, 2003, 28(2): 151–154.

[3] COOK D A, BROWN D C. Analysis of phase error effects on Stripmap SAS[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(3): 250–261.

[4] 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.

[5] 张友文. 条带式合成孔径声呐相位梯度自聚焦算法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(5): 156–160.
ZHANG Youwen. Phase gradient autofocus algorithm applied to Stripmap SAS[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(5): 156–160.

[6] CUMMING I G, WONG F H. Digital processing of synthetic aperture radar data: Algorithms and implementation[M]. Boston: Artech House, 2005.

[7] JR C J, WAHL D E. Eigenvector method for maximum-likelihood estimation of phase errors in synthetic aperture radar imagery[J]. Opt. Soc. Am. A, 1993, 10(12): 2539–2546.

[8] EICHEL P H, GHIGLIA D C , JAKOWATZ C V . Speckle processing method for synthetic-aperture-radar phase correction[J]. Opt. Let., 1989, 14(1): 1–3.

[9] JAKOWATZ C V, WALH D E, EICHEL P H, et al. Spotlight-mode synthetic aperture radar: A signal processing approach[M]. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1996.

[10] WALH D E, JAKOWATZ C V, THOMPSON P A, et al. New approach to strip-map SAR autofocus[J]. Digital Signal Processing Workshop IEEE, 1994: 53–56.

[11] GONZÁLEZPARTIDA J, ALMOROXGONZÁLEZ P, BURGOSGARCÍA M, et al. SAR system for UAV operation with motion error compensation beyond the resolution cell[J]. Sensors, 2008, 8(5): 3384–3405.

[12] 刘维, 刘纪元, 张春华. 多子阵合成孔径声纳波数域算法不均匀采样问题研究 [J]. 声学学报, 2009, 34(3): 203–210.
LIU Wei , LIU Jiyuan, ZHANG Chunhua. Research on non-uniform sampling problem when adapting wave number algorithm to multiple-receiver synthetic aperture sonar[J]. Acta Acustica, 2009, 34(3): 203–210.

[13] 江泽林, 刘维, 李保利, 等. 基于集群的高频合成孔径声纳并行处理方法 [J]. 应用声学, 2011, 30(3): 167–176.
JIANG Zelin, LIU Wei, LI Baoli, et al. A parallel processing method for high-frequency synthetic aperture sonar based on clusters[J]. Applied Acoustics, 2011, 30(3): 167–176.

[14] CHO K M. Efficient phase correction scheme for range migration: U.S, 6670907[P]. 2003-12-30.

[15] CHO K M. Estimation and correction of phase for focusing search mode SAR images formed by range migration algorithm: U.S, 6781541[P]. 2004-08-24.

[16] CHO K M. Efficient stripmap SAR processing for the implement of autofocus and missing pulse restoration: U.S, 7183965[P]. 2007-02-27.

[17] van ROSSUM W L, OTTEN M P G, van BREE R J P. Extend PGA for range migration algorithms[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2006, 42(2): 478–488.

[18] CHO K M, LUI L H. Efficient autofocus method for swath SAR: U.S, 030025[P]. 2007-07-05.

[19] 刘维, 张春华, 刘纪元, 等. 一种多子阵合成孔径声纳 CS 成像算法 [J]. 声学技术, 2008, 27(5): 636–641.
LIU Wei, ZHANG Chunhua, LIU Jiyuan, et al. A multiple-receiver synthetic aperture sonar CS imaging algorithm[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(5): 636–641.

[20] 孟大地. 机载合成孔径雷达运动补偿研究 [D]. 北京: 中科院电子所, 2006.

[21] DUTT A. Fast Fourier transforms for nonequispaced data[D]. New Haven, Conn.: Yale University, 1993.

[22] MIGNOTTE M, COLLET C, REZ P, et al. Three-class Markovian segmentation of high-resolution sonar images[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 76(3): 191–204.