

基于双基模型的多接收阵合成孔径声纳 CS 成像算法^①张学波^② 唐劲松 张 森

(海军工程大学水声技术研究所 武汉 430033)

摘 要 针对多接收阵合成孔径声纳(SAS)的传统快速成像方法较难实现高阶空变系统误差补偿的问题,将多接收阵 SAS 看成多个双基地声纳的组合,并利用根式的等价变换和泰勒级数方法,提出了一种充分考虑“停-走-停”近似的多接收阵 SAS 线频调变标成像算法。基于多接收阵 SAS 方位空不变和距离空变特性,在二维空域内研究了距离延迟误差,结果表明,基于双基模型的成像方法能够满足合成孔径高分辨成像。仿真和实测数据处理结果进一步验证了该方法的有效性。

关键词 合成孔径声纳(SAS),多接收阵,双基模型,距离延迟误差,线频调变标算法

0 引言

根据线性系统的观点,多接收阵合成孔径声纳^[1](synthetic aperture sonar, SAS)系统可视为一个线性的滤波系统:输入是照射场景的二维散射函数,输出是接收的回波信号,那么具有精确的解析二维频域系统函数显示表达式就是其快速成像算法^[2-8]的关键,然而斜距历程的双根号特性^[9,10]使得方位向傅里叶变换很难求得闭合解。相位中心近似(phase centre approximation, PCA)方法^[2,4,8]通过补偿掉与收、发阵元间距相关的误差项,使得补偿后的剩余相位只具有收发合置 SAS 回波数据的特点,从而巧妙地避开了双根号积分问题。然而这类方法本质上都是对斜距历程作菲涅耳近似,对于高分辨成像所需的更高次模型,由于方位向频域没有解析式,所以很难得到推广。实际上,多接收阵 SAS 系统的方位向可以分解为脉冲维和阵元维^[4],所以可视为多个双基地声纳^[11,12]的组合。在此基础上,文献[5-7]分别给出了一种处理方法,然而实现起来都较为复杂。此外,文献[5]和文献[6]中的方法均没有考虑“停-走-停”近似的影响,仅适用于近距离成像;而文献[7]中的方法需要在成像前采用数值分析的方法求解方位向驻相点,限制了数据的二维处理点数,降低了算法的实用性和灵活性。本文基

于这种双基模型^[11,12],利用根式的等价变换和泰勒级数展开方法,提出了一种简单且易实现的多接收阵 SAS 线频调变标(chirp scaling, CS)算法。该方法先对各接收阵元数据独立地进行成像处理,然后再将所得到的多幅复图像进行相干叠加,以获得最终的高分辨 SAS 图像。相对 PCA 类处理方法,本文方法可以避免繁琐的预处理操作,同时也没有文献[7]中的数值分析操作,仅需快速傅里叶变换和复乘操作。在二维空域内开展的距离延迟误差分析、仿真实验以及实测数据处理结果验证了该方法的有效性。

1 系统成像几何

多接收阵 SAS 成像几何如图 1 所示。定义 r 轴为距离维, x 轴为方位维,平台在以速度 v 沿 x 轴作匀速直线运动的同时,发射阵元向正侧方向发射一个与平台位置无关的线性调频信号,其复包络为

$$p(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_p}\right) \exp\{j\pi\gamma\tau^2\} \quad (1)$$

其中 τ 为距离向快变时间; T_p 为脉冲宽度;当 $0 \leq \tau \leq T_p$ 时, $\text{rect}(\tau) = 1$; $\tau > T_p$ 时, $\text{rect}(\tau) = 0$; γ 为调频率。

① 国家自然科学基金(61072092,61101205)资助项目。

② 男,1986年生,博士生;研究方向:合成孔径声纳成像与运动补偿;联系人, E-mail: xuebo_zhang@sina.cn
(收稿日期:2012-09-10)

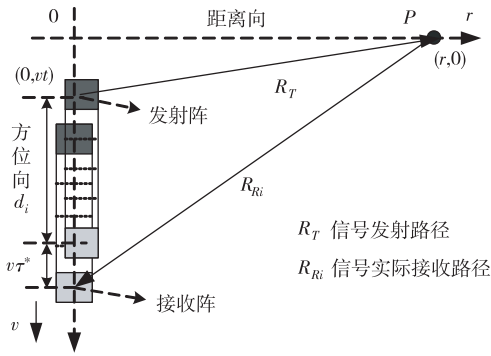


图 1 多接收阵 SAS 成像几何

若点目标的坐标为 $(r, 0)$, 那么经过时间 t (t 为方位向慢时间) 后, 运动到 $v \cdot t$ 位置的发射阵元与此点目标的距离为

$$R_T(t; r) = \sqrt{r^2 + (v \cdot t)^2} \quad (2)$$

在发射信号的双程传播时间 τ^* [13] 内, 接收阵向前运动了 $v \cdot \tau^*$ 的距离, 考虑到这个“停-走-停”近似的影响, 与发射阵相隔 d_i (下标 i 表示以发射阵为参考的第 i 个接收阵元) 的接收阵元收到点目标的散射回波时, 所经历的实际传播距离为

$$R_{Ri}(t; r) = \sqrt{r^2 + v^2 \cdot (t + t_{Ri})^2} \quad (3)$$

其中下标 R 表示接收阵元; $t_{Ri} = \tau^* + \frac{d_i}{v}$, 其物理意义在于相对于发射阵元信号发射时刻, 接收阵元接收到信号时表现在方位向上的时延量; 考虑到 τ^* 的复杂性, 在窄波束条件下, 我们将以 $\frac{2r}{c}$ 来近似 τ^* , 其中 c 为水声声速。

于是, 该接收阵元收到的回波信号复包络可以表示为

$$ss_i(\tau, t; r) = p \left(\tau - \frac{R_T(t; r) + R_{Ri}(t; r)}{c} \right) w_a(t) \cdot \exp \left\{ -j2\pi \frac{R_T(t; r) + R_{Ri}(t; r)}{\lambda} \right\} \quad (4)$$

λ 为对应于中心频率 f_c 的波长; $w_a(t)$ 为方位向窗函数, 与滤波加权及收、发阵元子系统的波束有关。由于合成孔径成像主要是相位处理, 所以后面讨论中将忽略 $w_a(t)$ 的影响。

2 多接收阵 SAS 系统成像处理

2.1 二维频域系统函数

通过对式(1)和式(2)的分析, 与发射阵相隔 d_i

的接收阵和发射阵组成的双基子系统对应的斜距历程具有如下恒等变换:

$$R_i(t; r) = \sqrt{R_T^2(t; r) + R_{Ri}^2(t; r) + 2R_T(t; r) \cdot R_{Ri}(t; r)} \quad (5)$$

在对式(5)作进一步的处理之前, 先对乘积项 $R_T(t; r) \cdot R_{Ri}(t; r)$ 作泰勒近似, 得到:

$$R_T(t; r) \cdot R_{Ri}(t; r) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots \quad (6)$$

其中常数项系数 $a_0 = r^2 + \frac{1}{2}v^2 t_{Ri}^2$; 一次项系数 $a_1 \approx v^2 t_{Ri}$; 二次项系数 $a_2 \approx v^2$ 。

由式(2)、式(3)以及式(5)和式(6)可以得到如下近似的斜距历程:

$$\tilde{R}_i(t; r) = \sqrt{4 \left[r^2 + v^2 \cdot \left(t + \frac{t_{Ri}}{2} \right)^2 \right] + v^2 \cdot t_{Ri}^2} \quad (7)$$

经过这样简单的处理之后, 便得到一个类似于传统收发合置 SAS 模型的近似斜距历程。在式(4)中, 用式(7)代替精确的斜距历程两次运用相位驻留原理[14]便可得到方位向驻相点:

$$t_i^* = - \frac{f_t \sqrt{r^2 + \frac{v^2 t_{Ri}^2}{4}}}{\left[\frac{2v}{\lambda} \left(1 + \frac{f_\tau}{f_c} \right) \right]^2 v^2 - v^2 f_t^2} - \frac{t_{Ri}}{2} \quad (8)$$

根据式(8)所示的驻留点, 再经过简单的代数变换, 便可以得到二维频域系统函数的相位表达式:

$$\varphi_i(t_i^*) = \pi f_i t_{Ri} - 4\pi \frac{\tilde{r}}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{f_\tau}{f_c} \right)^2 - \frac{\lambda^2 f_t^2}{4v^2}} \quad (9)$$

其中 $\tilde{r} = \rho_i r$; $\rho_i = \sqrt{1 + \frac{v^2}{4r^2} t_{Ri}^2}$, 其物理意义在于收、发阵元空间的分置以及非“停-走-停”[15]所产生的距离变标因子。

类比传统收发合置 SAS 二维频域系统函数[16], 不难发现多接收阵 SAS 系统中的各双基子系统的信号处理已转换成传统收发合置 SAS 模型下的成像处理问题。

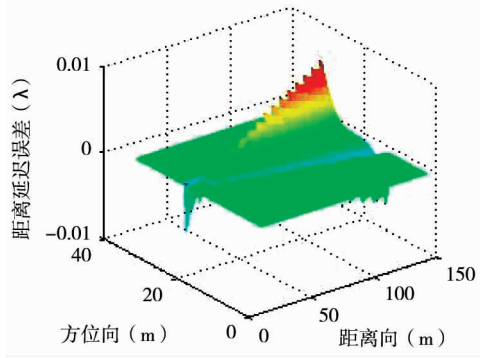
2.2 误差分析

为了获得高分辨 SAS 图像, 回波距离延迟误差不能超过 $\frac{\lambda}{16}$, 不同于文献[15]所采用的距离延迟误差曲线分析方法, 本节将以 τ^* 所对应的精确斜距历程为标准, 在二维空域内研究文献[8]中方法和本文方法的距离延迟误差曲面。

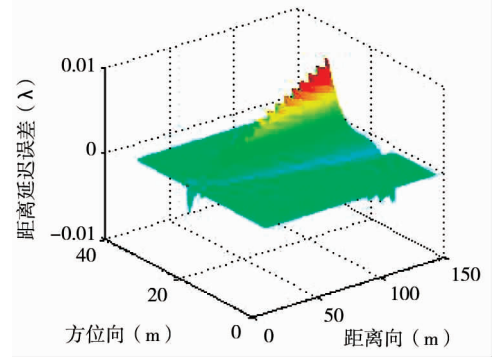
利用多接收阵 SAS 具有方位向空不变和距离向空变的特性,以方位向坐标固定而距离向上空变的一系列点目标为研究对象,不失一般性,我们可以研究合成孔径中心线上的点目标,不妨设其坐标为 $(r, 20\text{m})$ 。再考虑发射阵元与接收阵元最大间距分

别为 0.5m 和 3m 两种情况,其他参数见 3.1 节。当收、发阵元最远距离为 0.5m 时,两种方法的距离延迟误差(误差单位为波长 λ)如图 2 所示。

图 3 给出了收、发阵间距为 3m 情况时的距离延迟误差。

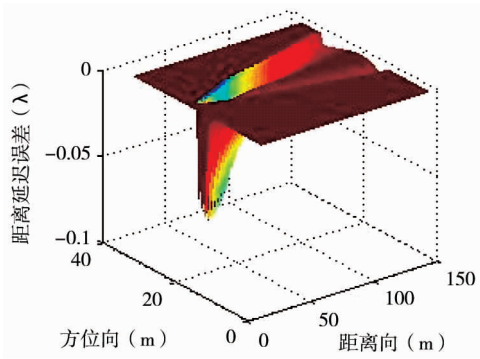


(a) 文献[8]方法距离延迟误差

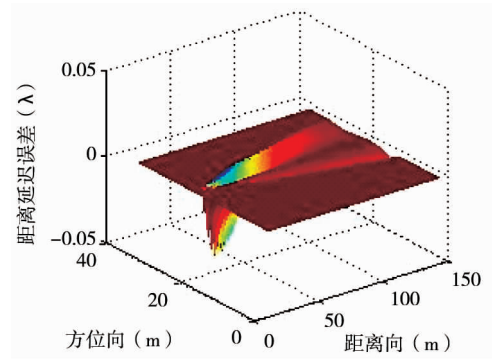


(b) 本文中方法距离延迟误差

图 2 收、发阵最远间距为 0.5m 时所对应的距离延迟误差



(a) 文献[8]方法距离延迟误差



(b) 本文中方法距离延迟误差

图 3 收、发阵最远间距为 3m 时所对应的距离延迟误差

从图 2 和图 3 中可以看出:距离延迟误差曲面呈现出楔形状,这是由于合成孔径长度的距离向空变性所导致;另外,由于距离向的不连续采样,距离延迟误差曲面还呈现出图 2 所示的锯齿形状。对比两种方法的误差曲面图可见,在收发阵最远间距较小时,两种方法所产生的距离误差基本相同,但当收发阵最远间距较大时,本文方法所产生的平均误差更小,仅相当于文献[8]中方法距离误差的一半。

2.3 CS 成像算法

CS 成像算法^[17]基于 Papoulis 提出的 Scaling 原理,通过对线性调频信号进行频率调制来实现信号的尺度变换,因而可以通过相位相乘替代时域插值来完成随距离变化的距离徙动校正。这里将以该算法为例,介绍其具体的成像处理过程。对于第 i 个双基子系统,文中方法的成像处理流程如图 4 所示。

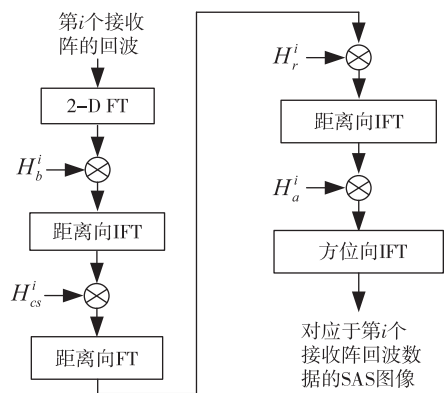


图 4 第 i 个双基子系统 CS 成像算法流程

对于每个双基子系统的成像处理,共有 6 次时频变换和 4 次相位相乘操作,具体步骤如下:

(1) 通过两次傅里叶变换(FT)将各双基子系统

的回波数据变换到二维频域。

(2) 在二维频域内完成各双基子系统收发分置相位项的补偿:

$$H_b^i = \exp\left\{-j\pi f_t \frac{d_i}{v}\right\} \quad (10)$$

(3) 在距离向进行反傅里叶变换 (IFT), 将数据变换到距离 - 多普勒域。

(4) 与式 (11) 所示的 CS 相位函数相乘, 实现距离向变标操作, 使所有目标的距离徙动轨迹一致化:

$$H_{cs}^i(\tau, f_t; r_{\text{ref}}) = \exp\left\{j\pi\gamma(f_t; r_{\text{ref}})C_s\left(\tau - \frac{2r(f_t; r_{\text{ref}})}{c}\right)^2\right\} \quad (11)$$

其中 r_{ref} 为参考距离; $\gamma(f_t; r_{\text{ref}}) = \frac{1}{\left[\frac{2r_{\text{ref}}}{cf_c}\left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\beta^3}\right) + \frac{1}{\gamma}\right]}$, 表示考虑二次距离压缩的距

离向调频因子; $\beta = \sqrt{1 - \frac{c^2 f_t^2}{4v^2 f_c^2}}$; CS 因子为 $C_s = \frac{1}{\beta} - 1$; 参考距离处的徙动曲线表达式为 $r(f_t; r_{\text{ref}}) = r_{\text{ref}} \cdot (C_s + 1)$ 。

(5) 在距离向进行 FT, 将数据变回到二维频域。

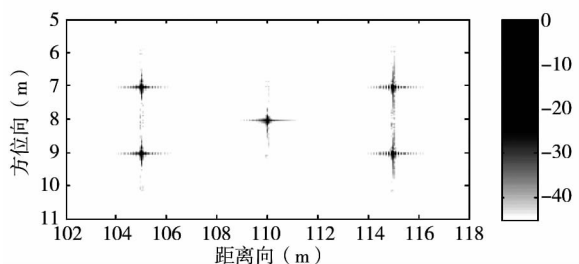
(6) 通过与式 (12) 所示的相位参考函数相乘, 以同时完成距离压缩、二次距离压缩和一致距离徙动校正:

$$H_r^i(f_t, f_\tau; r_{\text{ref}}) = \exp\left\{j\pi \frac{f_\tau^2}{\gamma(f_t; r_{\text{ref}})(1 + C_s)}\right\} \cdot \exp\left\{j\frac{4\pi r_{\text{ref}} C_s}{c} f_\tau\right\} \quad (12)$$

(7) 通过距离向 IFT 将数据变换到距离 - 多普勒域。

(8) 与随距离变化的匹配滤波器进行相位相乘, 实现方位压缩; 此外, 还需要补偿步骤 (4) 中 CS 操作所产生的残余相位和式 (9) 中剩下的方位向目标走动项。这个相位补偿函数为

$$H_a^i(\tau, f_t; \tilde{r}) = \exp\left\{j4\pi \frac{\tilde{r} f_c}{c} \beta\right\} \cdot \exp\{-j\Theta_i(f_t; \tilde{r})\}$$



(a) 文献[8]方法成像结果

$$\cdot \exp\left\{-j2\pi f_t \frac{\tilde{r}}{c}\right\} \quad (13)$$

其中 $\Theta_i(f_t; \tilde{r}) = \frac{4\pi}{c^2} \gamma(f_t; r_{\text{ref}})(1 + C_s)C_s(\tilde{r} - r_{\text{ref}})^2$,

表示 CS 操作后的残余相位。

(9) 在方位向进行 IFT 将数据变回到二维时域, 即可获得第 i 个双基子系统所对应的 SAS 复图像。

对每个双基子系统的回波数据分别作类似的处理, 便可得到 N (N 为参与成像的阵元数目) 幅复图像, 最后再将这 N 幅复图像进行相干叠加, 就得到了最终所需的高分辨 SAS 图像。

3 仿真实验和测试结果

3.1 仿真实验

为了验证本文方法的有效性, 本研究设计了仿真实验, 其仿真参数为: 信号中心频率 (150kHz), 信号带宽 (20kHz), 脉冲重复周期 (0.2s)。发射阵元方位向实孔径为 0.08m; 接收阵为一条由 25 个阵元组成的线阵, 其方位向实孔径为 1m; 平台设计运动速度为 2.5m/s。合成孔径声纳场景为 5 个理想点目标, 其空间分布如图 5 所示。

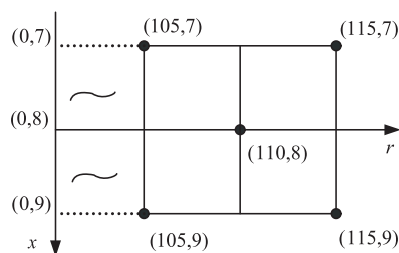
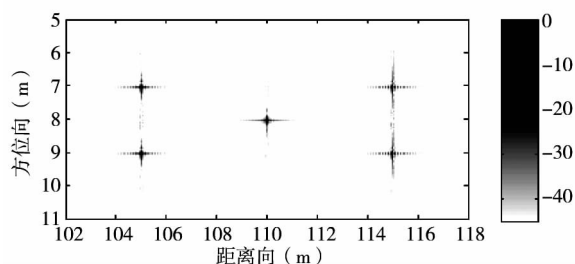


图 5 仿真点目标场景图

点目标成像处理结果如图 6 所示, 其中图 6(a) 为文献 [8] 方法成像处理结果, 图 6(b) 为本文方法处理结果。



(b) 本文中方法成像结果

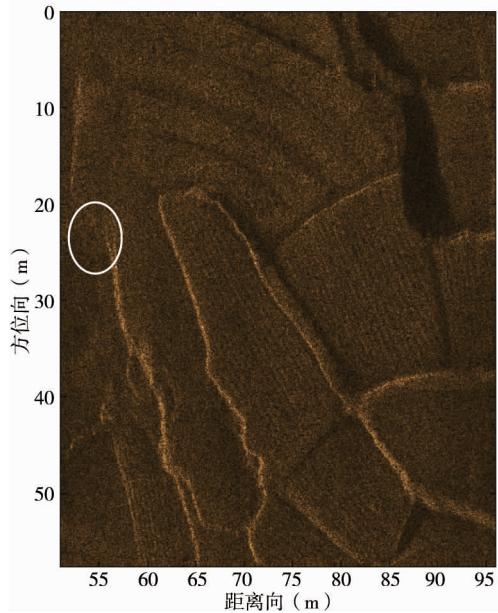
图 6 点目标成像结果

从图 6 中可以看出本文方法能够取得与文献[8]中方法一致的成像结果。

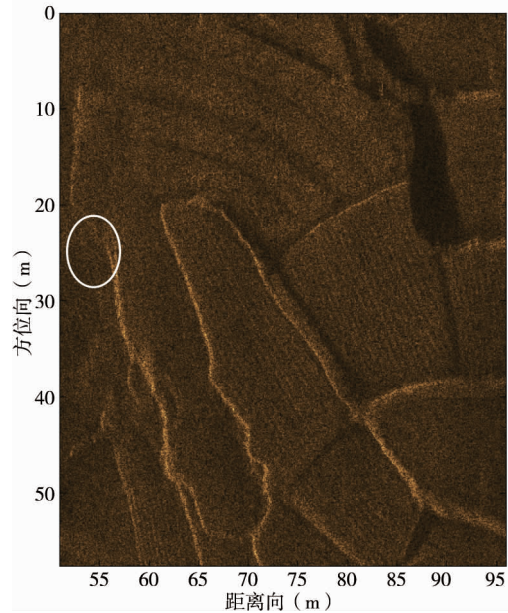
3.2 测试结果

本研究采用 2010 年千岛湖试验过程中获得的数据进一步测试本文方法的可靠性。试验参数为:信号中心频率(150kHz),信号带宽(20kHz),脉冲重复时间(0.32s);接收阵为一条 48 个阵元组成的线阵,其方位向孔径长度为 1.92m;平台拖曳速度为

2.5m/s。在数据处理前,先完成各接收阵数据的两两叠加处理,即 $1+2, 2+3, \dots$ 。成像结果如图 7 所示,其中图 7(a)为文献[8]方法处理后的成像结果,图 7(b)为本文方法处理后的成像结果。对比两种方法的成像结果,图 7(b)在图中标注的区域内具有更加细腻和清晰的纹理,由此可以看出本文方法是有效的。



(a) 文献[8]方法成像结果



(b) 本文中方法成像结果

图 7 实测数据成像结果

4 结 论

本研究以每个接收阵和发射阵组成的双基地 SAS 为基础,分别对各双基子系统进行成像处理,然后再通过相干叠加的方式获得最终所需的高分辨率图像。相对于传统基于相位近似的成像方法,本文方法在近距离成像和高分辨情况下高阶相位误差补偿方面有较大的应用和发展空间;相对于其他基于双基模型的成像方法,本文方法原理简单,操作性强。另外,本研究还将传统的距离误差曲线拓展为二维空域内的距离延迟误差曲面,使得误差的分析更加直观化。仿真数据及试验结果验证了文中方法的有效性。

参考文献

- [1] Gough P T, Hayes M P. Synthetic aperture sonar: a review of current status. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009, 34(3): 207-224

- [2] Bonifant W W, Richards M A, McClellan J H. Interferometric height estimation of the seafloor via synthetic aperture sonar in the presence of motion errors. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2000, 147(6): 322-330
- [3] Gough P T, Hayes M P, Wilkinson D R. An efficient image reconstruction algorithm for multiple hydrophone array synthetic aperture sonar. In: *Proceedings of the 5th European Conference on Underwater Acoustics (ECUA 2000)*, Lyon, France, 2000. 413-418
- [4] Gough P T, Hayes M P. Fast Fourier techniques for SAS imagery. In: *Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2005 Conference*, Brest, France, 2005. 563-568
- [5] Callow H J, Hayes M P, Gough P T. Wavenumber domain reconstruction of SAR/SAS imagery using single transmitter and multiple-receiver geometry. *IET Electronics Letters*, 2002, 38(7): 36-338
- [6] Jiang X K, Sun C, Feng F. A novel image reconstruction for synthetic aperture sonar with single transmitter and multiple-receiver configuration. In: *Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2004 Conference*, Kobe, Japan,

2004. 1940-1944
- [7] Yang H L, Tang J S, Li Q H, et al. A robust multiple-receiver range-doppler algorithm for synthetic aperture sonar imagery. In: Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2007 Conference, Aberdeen, UK, 2007. 1-5
 - [8] 杨海亮, 张森, 唐劲松. 宽测绘带多接收阵合成孔径声纳成像处理方法. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1424-1428
 - [9] Samarah A, Ortiz A M, Nies H, et al. A bistatic point target reference spectrum for general bistatic SAR processing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 517-521
 - [10] Wang F, Li X. A new method of deriving spectrum for bistatic SAR processing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3): 483-486
 - [11] LePage K D, Schmidt H. Bistatic synthetic aperture imaging of proud and buried targets from an AUV. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(3): 471-483
 - [12] Geng X P, Yan H H, Wang Y F. A two-dimensional spectrum model for general bistatic SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(8): 2216-2223
 - [13] 唐劲松, 张春华, 李启虎. 多子阵合成孔径声纳逐点成像算法. 1999 年青年学术交流会, 北京, 中国, 1999. 235-239
 - [14] Raney R K. A new and fundamental Fourier transform pair. In: Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Houston, USA, 1992. 106-107
 - [15] 杨海亮, 唐劲松, 张森. 基于非停走停及方位非均匀采样的多接收阵合成孔径声纳 CS 成像算法. 高技术通讯, 2009, 19(9): 939-945
 - [16] Bamler R. A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 706-713
 - [17] Raney R K, Runge H, Bamler R, et al. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-799

A chirp scaling algorithm for multi-receiver SAS imagery based on bistatic model

Zhang Xuebo, Tang Jinsong, Zhang Sen

(Institute of Underwater Acoustics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

Abstract

In view of the problem that it is hard for conventional fast imaging algorithms for multi-receiver synthetic aperture sonar(SAS) systems to compensate for high-order and space-variant system errors, a new chirp scaling(CS) imaging algorithm for multi-receiver SAS, which fully considers the influence of the “stop-and-hop” approximation, was proposed based on the regarding of a multi-receiver SAS as a combination of many bistatic sonars and the usage of the equivalent transformations of the radical function and Taylor series. By using the SAS characteristics of space-invariance in azimuth dimension and space-variance in range dimension, the range propagation delay error was studied in two-dimensional space domain. The error analysis results show that the presented method fully meets the requirements for the high-resolution synthetic aperture image formation. Further, simulated and real data were used to validate the presented method.

Key words: synthetic aperture sonar(SAS), multi-receiver, bistatic model, range propagation delay error, CS algorithm