

基于惯性测量系统的合成孔径声呐运动补偿

殷海庭 刘纪元 张春华
(中国科学院声学研究所 北京 100080)

摘要: 运动补偿是实现高分辨率合成孔径声呐(SAS)成像的关键问题之一, 该文研究了基于惯性测量系统的合成孔径声呐运动补偿过程。提出了一种改进的基于实际航迹的逐点补偿成像算法, 该算法解决了传统的逐点延时相加成像算法不能直接应用测量数据进行运动补偿的问题。最后, 通过仿真和湖试实验, 验证了算法的有效性。

关键词: 合成孔径; SAS; 运动补偿; 惯性测量系统

中图分类号: U666.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0063-04

Motion Compensation of Synthetic Aperture Sonar Based on Inertial Measuring System

Yin Hai-ting Liu Ji-yuan Zhang Chun-hua

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Motion compensation is very important for high resolution SAS image. In this paper, the process of motion compensation based on inertial measuring system is discussed in detail, and then an improved point-by-point compensate image algorithm based on actual azimuth track is presented, which solves the problem that the traditional point-by-point image algorithm can't use directly for motion compensation. At last, simulation and lake experiment results confirm the efficiency of the algorithm.

key words: Synthetic Aperture Sonar; SAS; Motion compensation; Inertial measuring system

1 引言

合成孔径声呐(SAS)成像^[1]假设合成孔径期间声呐沿着理想的直线轨迹运动。但在实际中, 拖体的运动轨迹总是与理想的直线轨迹有偏差, 海浪、海风、拖曳系统都会导致拖体偏离预想的运动轨迹。由此造成的声呐位置偏差使得回波信号的延时发生变化。如果不补偿这些误差, 成像质量会显著降低。

SAS 的运动补偿一般分为基于惯性测量系统的运动补偿^[2]和基于原始回波数据的运动补偿^[2,3]两种方法。本文主要讨论的是基于惯性测量系统的运动补偿, 测量系统一般安装在拖体平台上, 实时记录平台的位置和姿态。利用位置和姿态测量数据进行运动补偿的关键点就是根据测量数据计算出阵元相位中心的实际位置, 然后补偿实际位置与假定理想位置之间的偏差。本文研究了基于惯性测量系统的运动补偿过程, 分析了各坐标系之间的关系, “杠杆臂”效应的消除及安装角度误差的影响等, 重点研究了基于惯性测量系统的合成孔径运动补偿算法。

在合成孔径声呐成像算法中, 逐点延时相加成像算法由于其物理意义明确, 模型简单等特点而被广泛使用。传统的逐点延时相加算法成像算法将成像区域投影到二维斜平面坐标系中。这种方法的优点是使得成像算法更为简单清晰,

但是由于斜平面与惯性直角坐标系并不正交, 而由惯性测量系统得到的相位中心实际位置均是相对于惯性坐标系而言的, 因此传统的逐点延时相加成像算法无法直接利用相位中心实际位置进行运动补偿成像。本文在研究传统的逐点延时相加成像算法的基础上对成像模型加以改进, 提出了一种改进的基于实际航迹的逐点补偿成像算法。

最后, 通过对仿真和湖试实测数据进行运动补偿实验, 给出了运动补偿实验的结果, 验证了算法的有效性。

2 基于惯性测量的运动补偿系统

2.1 运动误差分析

合成孔径声呐的运动误差主要包括: (1)沿航迹方向加速度不为零(2)垂直于航迹方向的水平和铅直方向速度不为零(3)存在绕 3 个坐标轴的偏航、俯仰和横滚运动 3 种情况。所有这些偏差都会引入相位误差造成回波多普勒信号畸变, 影响成像质量。其中运动误差第(1)项造成发射脉冲沿航迹方向空间非等间隔分布。(2)和(3)两项造成视线方向的位置误差。

2.2 拖体坐标系和惯性坐标系

惯性测量系统涉及到两个坐标系问题, 即惯性坐标系和拖体坐标系。惯性坐标系, 又称地理坐标系, 采用由北 x 、东 y 和下 z 3 个正交分量定义的直角坐标系。拖体坐标系原点取在测量系统的惯导质心上, x' 轴取拖体纵轴前向为正向, y' 轴垂直于 x' 并指向拖体的正右方(拖体在地面上正常放置时), z' 轴由右手螺旋定则确定。一般说来, 拖体坐标

系与惯性坐标系是不重合的。惯性坐标系是固定的，而拖体坐标系则会随着拖体运动姿态的变化而改变。在运动补偿时需要考虑拖体坐标系到惯性坐标系的位置转换。得到各阵元相位中心在惯性坐标系中的实际位置。

2.3 “杠杆臂”效应的消除

所谓“杠杆臂”效应是指由于惯导质心到阵元等效相位中心之间存在一定的间距，在拖体运动过程中，各阵元的速度和位移并不等同于惯导质心的速度和位移，两者之间存在某种意义上的“杠杆臂”联系，因此要得到各阵元相位中心的位置，必须消除杠杆臂效应的影响。

每个阵元的相位中心在拖体坐标系中的位置可以预先测量确定。设某个阵元相位中心到惯导质心(即拖体坐标系原点)的距离为 L ，在拖体坐标系的投影角为 (ϕ, φ) 。那么它在拖体坐标系中的位置 (x', y', z') 可以通过式(1)求得

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l \cos \phi \cos \varphi \\ l \cos \phi \sin \varphi \\ l \sin \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.4 参考航迹的确定和安装误差角的修正

理论上,可以选择任何一条直线作为参考的理想航迹,这里选取一条最为接近实际航迹的直线作为参考的理想航迹。如图 1,选择拖体航行方向(即偏航角 heading)的均值作为理想参考航迹方向,所有运动误差均是以此航迹方向为参考计算得到的。

在参考理想航迹确定之后,以 heading 和该航次 heading 的均值之差作为偏航角进行阵元相位中心的位置解算,从而将惯性坐标系的 x' 方向由正北方向转换为参考理想航迹方向, y' 方向为垂直于 x' 方向的水平向右, z' 方向为垂直于 x' 方向的竖直向下。

此外,由于惯性测量系统在安装时存在的角度误差,使得测得的 3 个方向的速度数据与拖体坐标系的 x , y 和 z 方向并不完全正交,导致在 y 和 z 方向的速度有可能存在恒定的线性直流分量,由于在位置解算时需要通过对速度通过积分运算得到位移,因此,即使是很小的速度分量,经过积分后得到的位移可能差别很大。而通过拖体坐标系到惯性坐标系的坐标变换是无法去除这种线性分量的,如果忽略安装误差的影响直接利用速度积分得到的位移将有可能使最终的相位中心位置明显偏离实际位置,从而影响运动补偿精度,因此有必要对安装误差角度进行估计并修正。

在参考航迹确定之后, x 方向为拖体前进方向,而 y 方向和 z 方向的速度均值应为 0,由于安装时的角度误差,使得得到的 y 和 z 方向的速度与 x 方向存在耦合,从而导致 y 和 z 方向的速度均值不为零。因此可以根据测量系统测得速度数据在 x , y , z 3 个方向的均值大小,估计出安装误差角度,并对速度值进行修正,采用修正后的速度进行位置解

算,从而减小安装误差的影响。

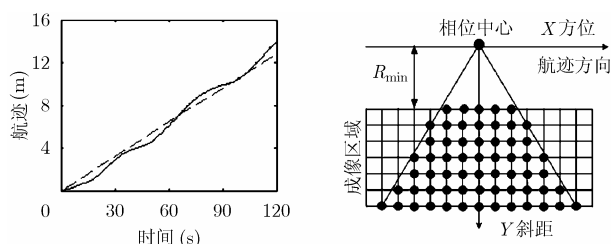


图 1 实际航迹与参考理想航迹 图 2 二维斜平面成像示意图

3 基于惯性测量系统的运动补偿算法

3.1 传统的逐点延时相加成像算法

逐点延时相加成像算法的基本思想是根据目标到每个方位采样点的延时,将信号对齐,然后相干叠加,从而得到每个成像点的成像值。成像区域任何一点 (x_i, y_i) 的成像可以用下式表示。其中 $s(t, u_n)$ 为脉冲压缩信号。

$$I(i) = \sum_n s(\Delta t, u_n) \quad (2)$$

$$\Delta t = \frac{2}{c} \sqrt{(u_n - x_i)^2 + y_i^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I(i) &= \sum_n s s_b(\Delta t, u_n) \exp(j\omega_0 \Delta t) \\ &= \sum_n \frac{aB}{K} \text{sinc}(B(\Delta t - \tau)) \exp(j\omega_0(\Delta t - \tau)) \end{aligned} \quad (4)$$

传统的逐点延时相加算法在做二维成像时,为了方便起见,往往忽略了深度方向,而是将最终图像通过距离投影映射到一个只有方位和斜距的两个方向的二维斜平面坐标系上(图 2),在斜平面坐标系中, X 轴为理想航迹方向, Y 轴为垂直于航迹方向的斜距向。

假设阵元沿着理想水平直线航迹方向运动,在成像时只考虑在方位和斜距两个坐标方向的位置。设阵元相位中心的位置为 $(x_0, 0)$,成像区域中每一点 (x_i, y_j) 到相位中心的距离为 $R = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (R_{\min} + y_j - 0)^2}$,其中 $y_j = R_{\min} + jD_y$, D_y 为距离向的分辨率。

根据停-走-停模型假设,计算出阵元在收发过程中所走过的距离,继而得到采样延时 Δt ,代入式(4)计算得到成像区域中每一点的图像亮度值。对下一个采样位置,采用同样方法计算成像区域每一点的亮度值并叠加到图像上,最终将所有采样位置的图像叠加到一起从而形成最终的合成孔径声呐成像图。

3.2 基于实际航迹的逐点补偿成像算法

在逐点延时相加成像算法中,延时计算采用的是相位中心理想位置与目标之间的延时。而在通过惯性测量系统得到相位中心的实际位置后,可以直接计算相位中心实际位置到目标之间的延时,从而实现对运动误差的补偿。这就是基于实际航迹的逐点补偿成像算法的基本思想。

在传统逐点延时相加成像模型中,二维斜平面坐标系中的斜距方向与惯性直角坐标系中的 Y , Z 方向并不正交,而

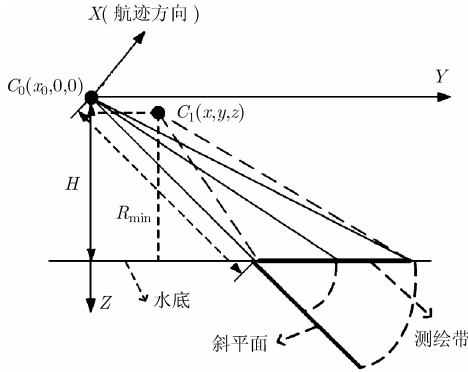


图 3 基于实际航迹逐点成像模型横向剖面图

基于惯性测量系统得到的各阵元实际位置均是相对于惯性坐标系的，由惯性测量系统得到的阵元位置不能直接用到上述成像模型中去，因此，必须对延时相加逐点算法的成像模型进行改进。

经过改进后的成像模型横向剖面图如图 3 所示，假设阵元相位中心在理想航迹中的坐标为 $C_0(x_0, 0, 0)$ ，而通过惯性测量系统得到的相位中心实际位置为 $C_1(x, y, z)$ ，其中 x, y, z 为惯性直角坐标系下的位置(航迹方向为 x 方向)，阵元距水底的深度为 H ，设距离向的分辨率仍为 D_y ，在惯性坐标系中， y 方向实际测绘带长度为

$$L_y = \sqrt{(R_{\max}^2 - H^2)} - \sqrt{(R_{\min}^2 - H^2)}$$

其中 R_{\min} 、 R_{\max} 分别对应于最小成像距离和最大成像距离。则在 Y 方向的分辨率： $d_y = L_y / N_y$ ，其中 $N_y = (N_R C) / (2 f_s D_y)$ 为距离向的像素点数， N_R 为采样点数， C 为水中声传播速度， f_s 为采样频率。

从而，对成像区域中的某一点 $S(x_i, y_j)$ (采用的是惯性直角坐标) 而言， $y_j = R_{\min} \sin A + j d_y$ ，其中 $\sin A = \sqrt{1 - (H/R_{\min})^2}$ 。

则 $S(x_i, y_j)$ 到相位中心实际位置 C_1 的距离为：

$$R = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_j - y)^2 + (H - z)^2}$$

根据停-走-停模型假设，计算出阵元在收发过程中所走过的距离，继而得到采样延时 Δt ，由式(4)计算得到成像区域中每一点的图像亮度值。对下一个采样位置，采用同样方法计算成像区域每一点的亮度值并叠加到图像上，最终将所有采样位置的图像叠加到一起形成最终的合成孔径声呐成像图。经过改进后的成像模型可以实现以由惯性测量系统得到的阵元相位中心实际位置 $C_1(x, y, z)$ 代替理想航迹位置 $C_0(x_0, 0, 0)$ 进行逐点成像。只要姿态测量数据足够精确，这样的成像处理将可以很好的补偿运动误差的影响。

4 仿真及湖试实测数据运动补偿实验

为验证基于惯性测量系统的运动补偿算法的有效性，进行了仿真和湖试实测数据运动补偿试验。

4.1 仿真数据运动补偿试验

仿真试验系统参数如表 1 所示。

表 1 中惯导质心位置是惯性测量传感器质心安装位置，阵元质心位置是发射阵在拖体坐标系下的起始位置。

表 1 仿真试验系统参数

中心频率	信号带宽	脉冲频率	脉冲宽度	采样频率
7kHz	4kHz	3.3Hz	10ms	50kHz
阵元个数	孔径长度	收发间距	惯导质心	阵元质心
8	0.16m	0.32m	(0,0,0)	(0,0,0)

设置目标区域有 4 个强点反射目标。首先是在无运动误差情况下，即拖体沿理想直线航迹前进。由于无运动误差，采用传统逐点延时相加成像算法进行成像，由于成像结果图像较大，因此这里只把有目标区域的图像单独提取出来如图 4 所示。

理想无误差情况下成像结果为 4 个聚焦的强点目标。在理想航迹基础上加入运动误差，所加运动误差为在 y 和 z 方向均增加幅度为 0.3m，周期为 76.8s 的正弦并叠加均值为 0，方差为 0.01m 的高斯随机运动误差，如图 5 所示。

对加入运动误差后的仿真数据，分别采用无运动补偿的传统逐点延时相加成像算法和基于实际航迹的逐点补偿成像算法得到图像如图 6 和图 7 所示。从成像结果可以明显看出：无补偿的逐点成像算法假设拖体沿理想直线航迹运动，由于运动误差的影响，实际航迹已经偏离理想航迹，所得到的图像存在明显的散焦现象。而基于实际航迹的逐点补偿算法，采用阵元相位中心的实际位置代替理想位置成像，得到的图像结果聚焦良好。

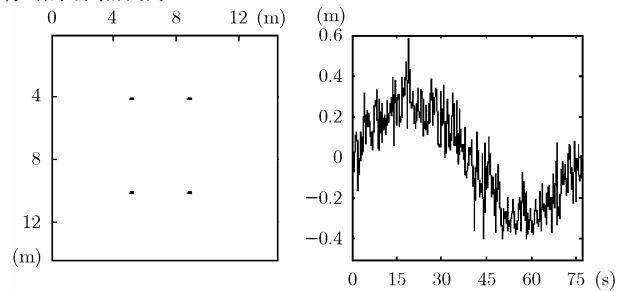


图 4 无误差逐点延时相加成像

图 5 运动误差

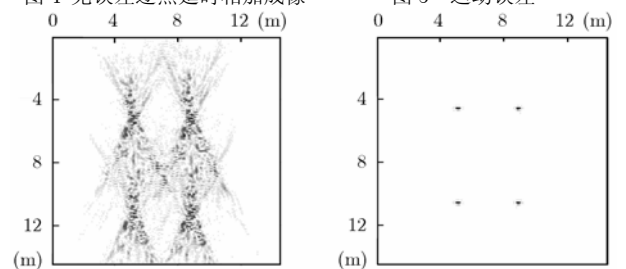


图 6 有误差无补偿逐点成像

图 7 基于实际航迹的逐点补偿成像

4.2 湖试实测数据运动补偿试验

低频合成孔径声呐于 2004 年 12 月 15 日至 2005 年 1 月 10 日在浙江千岛湖水域完成了湖上实验，此次湖试的主要目的是检验 4-9kHz 低频合成孔径声呐成像用于探测掩埋物体的可行性，探测性能及用于目标识别的可能性。本次实验中使用了基于惯性测量的运动补偿系统。

图 8 为湖试中声呐基阵及目标布放横剖面示意图，基阵沿工作船侧面导轨入水，入水深度 2.4m。基阵波束中心线与水平面的夹角为 40° 。发射换能器，以及八通道接收换能器

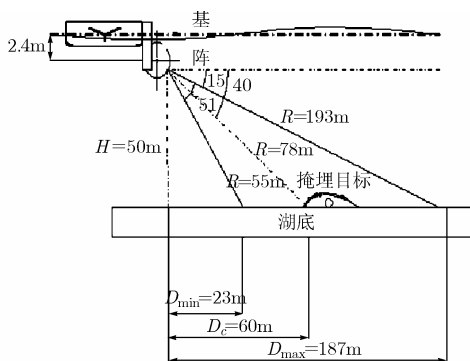


图 8 声呐及目标布放位置剖面图

安装在不锈钢基阵架上；前放电子罐也靠近接收换能器，安装在基阵架上。为减少流噪声，收发换能器及基阵架外套装导流罩。

惯性测量系统主要由 Octans1000 光纤罗经及运动传感器和多普勒速度计程仪 ADL 组成，Octans 1000 测量拖体的 3 个姿态角，即偏航角 heading(精度为 0.1°)、俯仰角 pitch(精度为 0.01°)和横滚角 roll(精度为 0.01°)；ADL 测量拖体的 3 个方向的速度(精度均为 0.005m/s)。惯性测量系统固定安装在工作船上，惯导质心到基阵阵元质心的相对坐标位置在安装时测定。

发射信号由计算机软件生成，经 D/A 转换为模拟信号。通过功放，阻抗匹配后驱动发射换能器。实验参数如表 2 所示：

表 2 湖试实验系统参数

中心频率	信号带宽	脉冲频率	脉冲宽度	采样频率
7kHz	4kHz	3.3Hz	10ms	50kHz
阵元个数	孔径长度	收发间距	惯导质心	阵元质心
8	0.16m	0.32m	(0,0,0)	(11.8,2.4,1.6)

回波声信号被八通道接收换能器接收，并转换为电信号。回波电信号通过前放，再经带通滤波，放大，达到合适电平；A/D 转换为数字量后存盘。供后处理程序读出数据，进行合成孔径成像处理。惯性测量传感器数据通过串口传送到计算机，经过与回波数据时间戳同步之后存盘，以便进行运动补偿处理。

用于验证系统性能的目标物为一工业用煤气罐，将煤气罐用沙袋包裹严实，再用帆布包封，沉入约 50m 深的湖底，以作为人工布放的掩埋目标。

以下为某航次实测数据的运动补偿实验结果。

图 9 和图 10 为与该航次回波采样数据对应的由 ADL 和 Octans1000 测得的拖体速度和姿态数据经过安装误差角修正、参考理想航迹选取、杠杆臂效应的消除和拖体坐标系到惯性坐标系的坐标转换后得到的拖体在惯性坐标系中的 Y 方向(垂直于理想参考航迹方向的水平方向)和 Z 方向(垂直于理想参考航迹方向的竖直方向)的运动误差位移曲线。

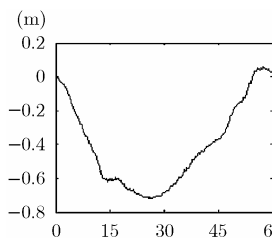


图 9 Y 方向运动误差

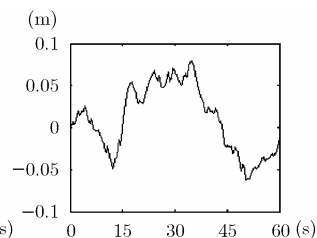


图 10 Z 方向运动误差

对该航次回波数据分别进行无补偿传统逐点延时相加成像和基于实际航迹的逐点补偿成像。如图 11 为不经过运动补偿而直接对原始回波数据采用传统逐点延时相加成像结果；由于掩埋目标是由包封在沙袋内的气罐钢瓶组成，沉底后，沙包中的空气逃逸，受包裹的帆布阻隔，聚集在顶部。这会增强对声波的散射能力。由于实际声呐测绘带长度和宽度比较宽，图像很大，因此这里不能将整幅声呐图像全部显示出来，而只给出了掩埋目标区域的图像；图 12 为利用基于实际航迹的逐点补偿成像算法所得到的图像。可以看出经过运动补偿后的图像对比度提高，聚焦效果明显。

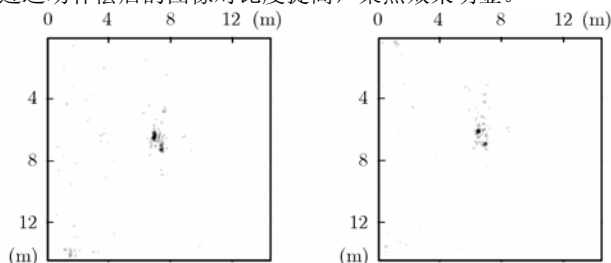


图 11 传统逐点延时相加成像

图 12 基于实际航迹的逐点运动补偿成像

5 结束语

为了得到较高的图像质量，合成孔径声呐必须进行运动补偿，而当测量精度和数据速率满足要求时，可以利用惯性测量系统进行运动补偿。本文研究了基于惯性测量系统的运动补偿系统，在传统的逐点延时相加成像算法的基础上，对成像模型加以改进，提出了一种基于实际航迹的逐点补偿成像算法。通过仿真和湖试实验验证了算法的有效性。基于惯性测量系统的运动补偿可以和基于回波的运动补偿及自聚焦结合使用，从而进一步提高成像效果。

参考文献

- [1] 张澄波. 综合孔径雷达. 高等教育出版社, 1988: 1-3 章.
- [2] Cook A, Christoff T, and Fernandez E. Motion Compensation of AUV-based synthetic aperture sonar. MTS/IEEE Oceans2003 Proceedings, San Diego CA, 2003: 2145-2148.
- [3] Raven R S. Electronic stabilization for displaced phase centers systems. U. S. Patent 4244036, January 1981.

殷海庭: 男, 1982 年生, 硕士, 研究方向为合成孔径声呐成像。
 刘纪元: 男, 1963 年生, 教授, 研究员, 主要研究方向为雷达与声呐信号处理、声呐成像等。
 张春华: 男, 1962 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为水声信号处理、声呐成像等。