

干涉合成孔径声呐复图像配准

张友文, 田 坦, 孙大军

(哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 利用干涉合成孔径声呐技术能够获得海底的三维地貌图, 而干涉合成孔径声呐复图像之间的精确匹配技术是提高合成孔径声呐干涉测量精度的关键之一. 首先讨论了干涉合成孔径声呐复图像配准过程中所要考虑的问题, 然后给出了一种复图像配准方法, 在该复图像配准过程中, 使用的是基于窗口区域的图像配准方法, 并把复图像中相应配准窗口之间的相关系数作为评估配准精度的标准, 使用该方法能够获得子像素级的配准精度. 最后把该数据处理方法应用到了仿真和消声水池试验数据的干涉处理之中, 最终取得了令人满意的结果.

关键词: 合成孔径; 声呐; 干涉测量; 图像配准

中图分类号: TP721.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7043(2005)01-0075-05

Registration of interferometric synthetic aperture sonar complex images

ZHANG You-wen, TIAN Tan, SUN Da-jun

(School of Underwater Acoustical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: It is well established that interferometric synthetic aperture sonar (InSAS) can be used to perform seabed elevation mapping. Among the factors critical to mapping accuracy is the registration of InSAS complex images. Some challenges needed to be considered in the process of the registration of InSAS complex images are discussed first. Then a method for registering InSAS complex images was proposed. When registering complex images, an area-based registration method was used and the correlation coefficient between the corresponding data windows of the complex images was selected to evaluate the registration precision. With this method, InSAS complex images can be co-registered with the precision of sub-pixel. These data processing methods have been applied to the interferometric data of the pool trial and simulated data, and valuable results have been obtained.

Keywords: synthetic aperture; sonar; interferometry; image registration

近年来, 利用合成孔径声呐^[1]进行海底高分辨成像的技术日趋成熟. 合成孔径声呐(SAS)是普通旁扫声呐(SLS)技术的拓展, 而干涉合成孔径声呐(InSAS)^[2]则是该技术的进一步拓展. 它主要是利用在空间上有一定间隔的垂直放置的水听器基阵对同一区域进行成像来获得2幅复图像(包括强度和相位信息), 而这2幅复图像之间的相位差包含了海底目标的高度信息, 从而可以进行三维成像观察. 在干涉合成孔径声呐数据处理中, 2幅复图像的精确配准^[3]技术是提高海底高程测量精度的关键之一. 通常要求把2幅干涉复图像配准到亚像素级精

度. 为了进行干涉测量2个水听器之间必须存在一段间距(称为基线距). 这就使得2幅复图像所对应的海底视角和现场也是不一样的. 鉴于上述情况, 有必要对干涉数据的精确配准问题进行研究. 首先分析了一次通过成像情况下干涉复图像配准中所要考虑的问题, 然后通过对仿真和消声水声实验室的一次通过成像数据的干涉处理给出了一个基于窗口区域的复图像配准方法和相应的配准处理结果.

1 干涉合成孔径声呐复图像配准方法分析

在合成孔径声呐干涉测量中, 配准的关键在于确定2幅复图像之间匹配位置的相对偏移量. 一旦知道了2幅复图像之间每个匹配位置的相对偏移

收稿日期: 2003-05-09.

作者简介: 张友文(1974-), 男, 博士研究生;

田 坦(1938-), 男, 教授, 博士生导师.

量,就可以对其中的1幅复图像进行插值重采样,完成2幅复图像之间的配准。

对于一次通过干涉测量,当2个接收器的运行轨迹是完全平行时,2幅复图像在方位向上的相对偏移量是一个常数,成像差异表现在斜距向上。从图1中可以看到,重复成像区相对于2个接收器的运动轨迹处于不同的位置。声呐图像的几何特征之一就是近距离压缩,远距离拉伸。图1中 H 表示声呐平台高度, B 表示干涉基线长度, ζ 表示干涉基线 B 与垂直向的夹角。因此,2幅复图像的几何畸变不同,即相同的地区在2幅图像上受到了不同程度的压缩和拉伸。当平台稳定性好、基线距 B 很小且图幅宽度不大时,这种收缩和拉伸效应可以忽略不计,此时斜距向的相对偏移量也可视为常数。因此只要找到2幅复图像的一个局部偏移量就可以配准2幅复图像。但是,当复图像的图幅宽度较大时,则需要在斜距向上确定多个局部偏移量,然后再作线性拟合配准2幅复图像。当基线距较大时,计算每个局部偏移量就必须考虑图像间的收缩和拉伸效应。

这里采用基于窗口的自动匹配技术对干涉合成孔径声呐的复图像进行配准。这是因为用于干涉测量的2幅复图像应当具有很大的相关性,从而适合于作基于窗口的自动匹配。

基于窗口的匹配过程一般是把2幅图像中的一幅作为主图像,另一幅作为辅图像。先在主图像中选定一个局部匹配窗,然后在辅图像中选定一个比匹配窗大的搜索窗,以确保在搜索窗中能够找到一个与匹配窗相匹配的数据窗口。此窗口的确定是通过计算匹配质量指标来进行的。2个相匹配窗口中心位置之间的相对偏移量就是所要寻找的一个局部偏移量。

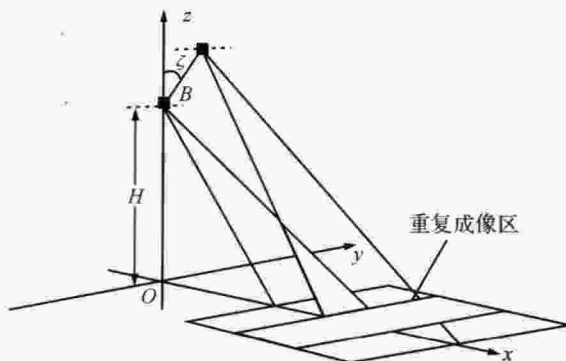


图1 SAS干涉测量成像示意图

Fig.1 Sketch map of SAS interferometry

在干涉合成孔径声呐复图像配准中,必须有一个衡量2个复数窗口匹配质量的指标。考虑用于干涉测量的图像间的相关性,一个合适的指标是2个复数窗口的相关系数

$$\rho = \frac{\langle c_1 \cdot c_2^* \rangle}{\left\{ \langle |c_1|^2 \rangle \cdot \langle |c_2|^2 \rangle \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

式中: c_1, c_2 表示2幅复图像, $*$ 表示复共轭, $\langle \rangle$ 表示数学期望, ρ 为复相关系数,它的模的大小即可作为匹配质量的评价标准,其值越大说明匹配得越好。

干涉合成孔径声呐复图像的配准一般分2步进行。第2步称为粗匹配,它在搜索窗内按行列以不同的整像素偏移量计算匹配窗与对应窗之间的匹配质量评价指标。由此得到的配准精度在一个像素之内。第2步称为精确匹配,它通过对复图像作亚像素插值后再计算匹配指标来进行,或者也可通过对粗匹配的匹配指标值作亚像素的插值得到精确匹配的位置。其精度要求在零点几个像素之内。

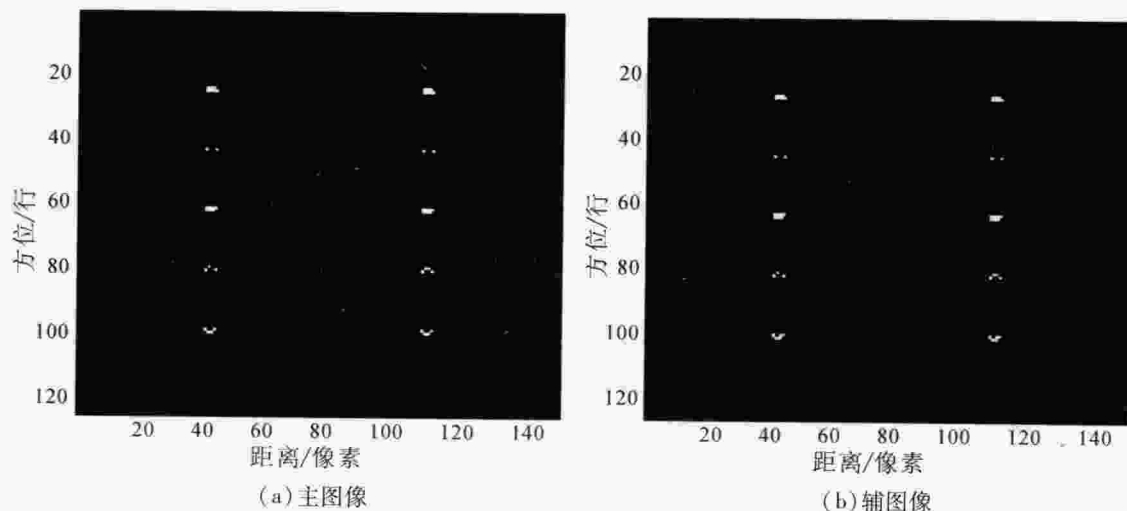


图2 10个点目标仿真成像
Fig.2 Intensity images of ten points

对于一次通过且基线距很小的情况,精确匹配可以按行列进行亚像素搜索进行.对于基线距较大的情况,一般在粗匹配的基础上采用多变量的最优化算法实施精确匹配,即在粗匹配位置周围以不同的 x 和 y 偏移量、比例因子及旋转因子作亚像素的重采样,再计算匹配质量评价指标.当一个变量的值发生变化时就需要进行重采样和计算匹配质量评价指标.多变量最优化算法很多,但是多数都需要计算导数,在此很难操作.1992年Q. Lin等采用了下降的单纯形法来使平均扰动函数最小化.此方法的优点是不必计算导数^[4].

2 仿真和消声水池试验的干涉数据配准

为了进一步理解图像配准过程,给出在处理仿真数据和消声水池试验数据时所采用的配准方法和处理结果.表1给出了仿真和水池试验的参数.仿真计算时采用10个点目标,点目标的反射系数一致,利用波数域算法产生 256×256 像素的2幅复图像,结果如图2所示.其中图2(a)为重构后的仿真图像,图2(b)为图2(a)所有目标沿距离向向远处移3个bin(即3个像素大小)后重构后的图像,方位向未加入偏移量.与仿真计算类似,水池试验时的目标为10个悬浮于水中的乒乓球,它们方位向间隔约为30 cm,距离向间隔为20 cm,排为2行,每行各5个.

由于实验中2个接收基元固定在一个支架上,它们的运动轨迹是平行的,而且在实际数据处理中所取的图幅又比较小,所以采用以 x 和 y 方向的偏移量为变量,以相关系数作为匹配质量评价指标来进行粗匹配和精确匹配.整个配准过程如下:

1)对回波数据用波数域成像算法^[5]进行图像重构,最终生成2幅复图像,截取2幅大致相同的区域来作匹配处理.

2)图像粗配准.将主图像和辅图像划分为较大的几个子窗口,计算对应窗口的相关系数,当相关系数达到最大时的窗口就是与匹配窗达到粗配准的窗口.记下它们中心像素之间的相对偏移量,以此作为精确配准时的初始值.

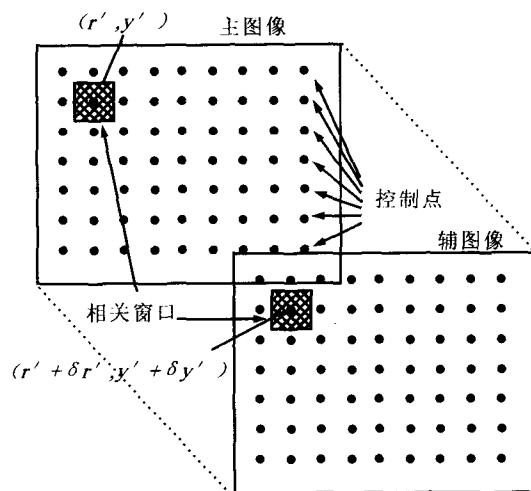


图3 控制点的产生

Fig. 3 Sketch map of generating the control points

表1 消声水池试验参数
Table 1 Parameters of pool trial

参数名称	参数	参数名称	参数
基元几何尺寸/m	0.05	发射器基元个数	1
目标参考距离/m	3	接收器基元个数	4
载频/kHz	120	基线B长度/m	0.15
脉冲宽度/ μ s	60	基线仰角 $\zeta/(^\circ)$	45
采样频率/MHz	1.6		

3)精确配准.将主图像和辅图像划分为多个相对较小的几个子窗口,然后计算对应窗口的相关系数,确定相应各个子窗口的相对偏移量.

表2 仿真数据精确配准时的配准窗口参数

Table 2 Parameters of fine registration windows for simulated data

相关窗口	方位向坐标	距离向坐标	方位向偏移量	距离向偏移量	相关系数
0	27	27	0	2.56	1.00
1	27	56	0	2.56	1.00
2	27	84	0	0.06	1.00
...
48	230	173	0	0.06	0.99
49	230	201	0	0.06	1.00
50	230	230	0	0.06	1.00

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{li} & y_{li} & x_{li}^2 & x_{li}y_{li} & y_{li}^2 \\ & & & \vdots & & \\ 1 & x_{lN} & y_{lN} & x_{lN}^2 & x_{lN}y_{lN} & y_{lN}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{li} + D_i^x \\ \vdots \\ x_{lN} + D_N^x \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{li} & y_{li} & x_{li}^2 & x_{li}y_{li} & y_{li}^2 \\ & & & \vdots & & \\ 1 & x_{lN} & y_{lN} & x_{lN}^2 & x_{lN}y_{lN} & y_{lN}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{li} + D_i^y \\ \vdots \\ x_{lN} + D_N^y \end{bmatrix} \quad (3)$$

4) 确定控制点. 给相关系数确定 1 个门限值 λ . 每一个控制点都对应着 1 个局部的精确偏移量, 将相关系数值大于该门限值 λ 的点作为控制点. 图 3 给出了控制点产生的过程, 主要是通过对从主图

像和辅图像中划分出的 1 对相关窗口进行相关运算求得该窗口对之间的相对偏移量 $\delta r'$ 和 $\delta y'$. 用这些控制点进行二阶多项式拟合确定 2 幅图像中任何 1 个匹配位置的相对偏移量, 即用控制点坐标和相对偏移量 1 确定 2 幅图像之间的缠绕函数的系数. 假设观测方程可以用 2 组二阶多项式表示 $Ax = y$, 即式中: x_{li} 和 y_{li} 是基于主图像的第 i 组控制点 x 轴和 y 轴坐标, $D_i^{x,y}$ 是在上标表示的维上的第 i 个控制点斑块的偏移矢量的系数, $a_0 \sim a_5$ 和 $b_0 \sim b_5$ 为需要拟合的多项式的系数, N 为观测矩阵的行数. 二阶多项式拟合是一个求矛盾方程组的最小二乘解问题, 采用奇异值分解的方法很容易求出拟合系数^[3]. 方程 (2) 和 (3) 的系数的解将构成以下形变函数:

$$W(x, y) = \begin{bmatrix} a_0 + a_1x_1 + a_2y_1 + a_3x_1^2 + a_4x_1y_1 + a_5y_1^2 \\ b_0 + b_1x_1 + b_2y_1 + b_3x_1^2 + b_4x_1y_1 + b_5y_1^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中的 $W(x, y)$ 为形变函数, 它是主图像和辅图像之间的坐标映射关系.

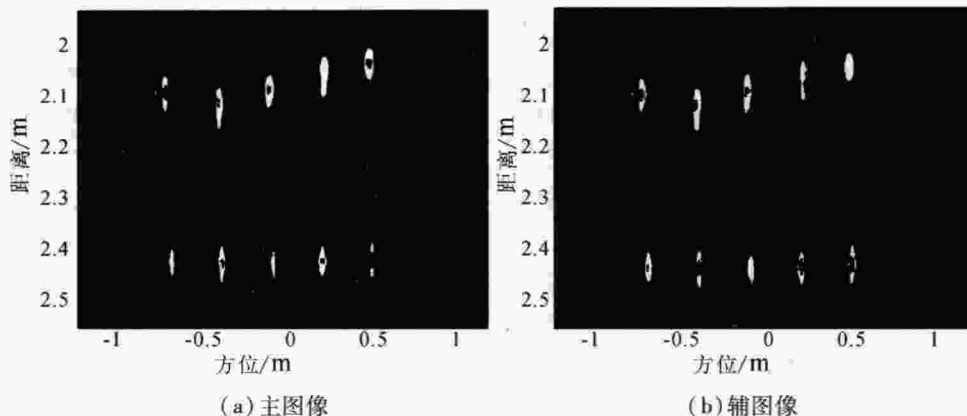


图 4 10 个乒乓球成像

Fig. 4 Intensity images of ten balls

5) 根据上一步得到的形变函数用双线性插值法对辅图像作插值重采样, 至此完成配准操作.

上述算法可以在时间域或频率域中实现. 在仿真数据处理中, 没有加入噪声和其它干扰, 所以配准窗口的相关值都非常高 (如表 2). 粗配准时偏移量为 (0, 0). 在精确配准时, 由表 2 可以看出所有配准窗口的方位向的偏移量为 0, 这与实际情况相符, 因为我们并没有加入方位向的偏移量. 包含点目标的窗口的偏移量在 2.50 ~ 3.0 个像素值之间, 而没有包含点目标配准窗口的偏移量却很小 (基本上都在 0.06 左右徘徊), 这是由于没有强点目标的缘故. 总的配准误差小于等于 0.5 个像素值 (配准精度大于 83%), 配准精度是非常高的.

在试验水池利用上下 2 个接收基元进行了数据

采集. 图 4 给出了根据获得的数据得到的 300×800 像素的 2 幅复图像强度图. 其中图 4(a) 为上接收基元合成孔径成像结果 (主图像), 图 4(b) 为下接收基元合成孔径成像结果 (辅图像). 由于水池较小, 2 幅图像极为相似. 在粗配准时所选的配准窗口为 5 个, 每个窗口大小为 128×256 像素. 得到的初始偏移量为 (-1, 4), 该偏移量将作为精确配准的初始值. 在精确配准时, 设定配准窗口为 32×32 像素, 总共有 51 个配准窗口. 选取相关系数的门限值为 $\lambda = 0.5$, 表 3 给出了其中 51 个匹配窗中心像素的位置、粗配准和精确配准时的相关系数以及精确配准后的局部偏移量 (由于窗口数较多, 只节选了部分数据). 从表中可以看出, 经过精确配准后相关系数都比粗配准时有了很大的提高.

表3 试验数据精确配准时的配准窗口参数

Table 3 Parameters of fine registration windows for trial data

相关窗口	方位向坐标	距离向坐标	方位向偏移量	距离向偏移量	相关系数
0	28	27	5.56	10.56	0.11
1	28	191	-0.19	-3.56	0.43
2	28	354	-0.12	-3.62	0.52
...
48	358	443	5.56	10.69	0.67
49	358	606	1.31	1.62	0.91
50	358	770	-6.50	-3.62	0.69

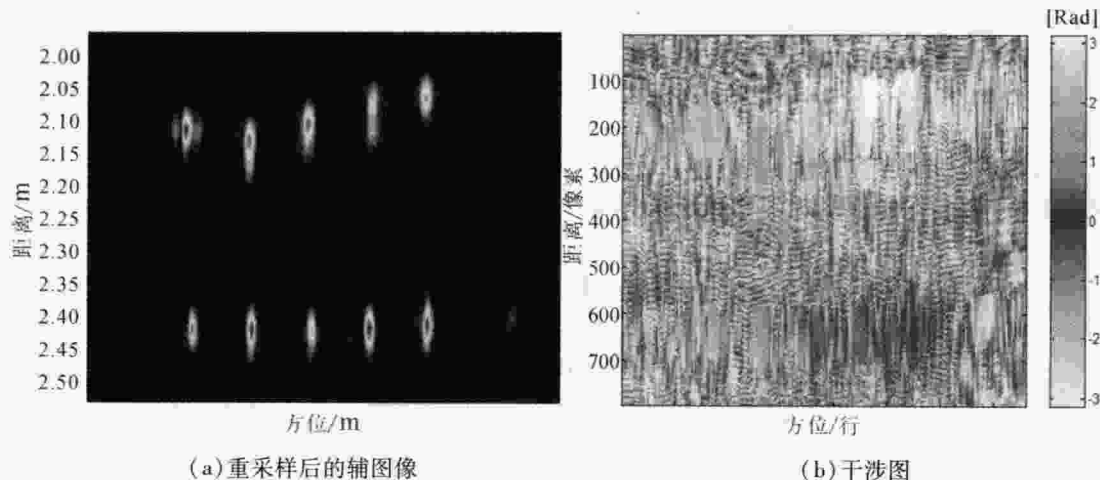


图5 辅图像重采样后的强度图和干涉图

Fig. 5 Intensity image of resampled slave and Interferogram

所采用的配准方法可以方便地处理大部分干涉复图像的配准问题. 在2幅复图像精确配准后, 可以生成一幅重要的图件干涉纹图. 图5(a)是辅图像以形变函数 $W(x, y)$ 为变换关系重采样后的图像. 图5(b)为将主图像和重采样后的辅图像对应像素进行复共扼相乘后得到的干涉纹图.

3 结束语

利用仿真和消声水池干涉数据研究了干涉合成孔径声呐复图像的精确配准问题. 通过仿真, 验证了所提出的算法的可行性及精确性, 从而为实验数据的处理提供了理论依据. 从仿真数据可知, 利用给出的配准方法能够把大多数的干涉复图像配准到亚像素级的精度, 满足了干涉测量的要求. 利用所述方法对水池试验数据进行了处理, 结果令人满意. 与此同时, 还获得了干涉图, 为提高后续的相位解缠^[6]和海底数字高程模型重建的精度提供了保证.

参考文献:

[1] GOUGH P T, HAWKINS D W. A short history of synthetic

aperture sonar [A]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. [S.l.], 1998.

[2] RICHARDS M A, MCCLELLAN J H, et al. Interferometric height estimation of the seafloor via synthetic aperture sonar in the presence of motion errors [A]. Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings [C] [S.l.], 2000.

[3] JAKOWATZ C V, WAHL D E. Spotlight mode synthetic aperture radar: a signal processing approach [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.

[4] LIN Q, VESECKY J F. New approaches in interferometric SAR data processing [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1992, 30(3): 560-567.

[5] CAFFORIO C, PRATTI C. SAR Data focusing using seismic migration Techniques [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electromagnetic Systems, 1991, 27: 199-207.

[6] GHIGLIA D C, ROMERO L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods [J]. Journal of the Optical Society of America, 1994, 11(1): 107-117.

[责任编辑: 郑可为]