

基于回波信号的一种合成孔径声纳运动补偿方法

刘纪元,唐劲松,孙宝申,张春华,李启虎

(中国科学院声学研究所,北京 100080)

摘 要: 运动补偿是合成孔径声纳(SAS)成像的关键问题,SAS系统一般利用多接收阵回波信号数据的互相关特性进行运动补偿.本文提出一种基于单接收阵和强点目标回波的运动补偿方法,并在推导侧摆误差模型的基础上,进行了计算机仿真.仿真和实测数据实验结果表明该方法的有效性.

关键词: 合成孔径声纳;运动补偿;相关函数;偏离相位中心

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 01-0075-03

A Receiving-Data-Based Motion Compensation Method of Synthetic Aperture Sonar

LIU Ji-yuan, TANG Jin-song, SUN Bao-shen, ZHANG Chun-hua, LI Qi-hu

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

Abstract: Motion compensation is the key technique for synthetic aperture sonar (SAS), and it is normally realized in SAS systems based on multi receiving arrays and their cross correlation. A new motion compensation method based on single receiving array and strong scatterer is presented in the paper. Moreover, computer simulations based on the derived model for sway error are given, and results of simulation and lake test show the validity of the proposed motion compensation method.

Key words: synthetic aperture sonar; motion compensation; correlation function; displaced phase center

1 引言

合成孔径成像在雷达(SAR)领域取得的成功,推动了合成孔径声纳技术的发展.目前国际上已经出现多个SAS实验样机系统.面向军用和商用实用设备的出现,相信并不遥远.SAS在民用领域主要用于海底探测,而军事用途主要是水雷探测.由于合成孔径成像的相似性,SAS可借鉴SAR中的技术成果,SAR中的成像算法可用在SAS中.在SAS研究领域,有两个主要问题被认为影响了SAS技术发展.第一个是水声信道,特别是浅海水声环境条件不理想,同空气中电磁波工作环境相比,是更为“敌意”的媒质.另一个问题是声波传播速度比电磁波慢得多,大大限制装载SAS的拖体的运动速度.这不仅限制了测绘速率的提高,也影响拖体的稳定性.

二十世纪七十年代以来一系列水声成像相干性实验结果表明,水声信道的影响并不像预想的那么严重,尽管水声信道是时变的,SAS回波信号在较短时间内仍具有较好的相干性.

运动误差是影响SAS成像质量的一个关键问题,目前SAS研究的热点为运动补偿和自聚焦等问题.SAS的波长较短(一般在分米量级),高分辨率SAS对运动和姿态测量系统的精度要求很高,相应的设备价格很贵而且工程上有时很难达到要求.因此,SAS运动补偿研究主要集中在利用回波信号

本身提取运动信息方面.

Robert S Raven于1981年申请美国专利,将偏离相位中心(Displaced Phase Center,简称DPC)的方法用于多接收天线合成孔径成像.Robert W Sheriff^[1]通过水槽实验验证了DPC方法修正SAS运动误差的有效性.目前已经有SAS系统采用多接收阵DPC方法^[2,3].

但是,使用多接收阵DPC方法的前提条件是假设海底完全混响,相当于SAR中均匀目标的场合.本文讨论有孤立的强点目标存在时,单接收阵SAS运动补偿问题.

2 基于相关函数的运动误差估计

2.1 侧摆误差数学模型

SAS的运动误差可用六个自由度描述.对于拖曳式SAS,运动误差主要表现为在水平面内的侧摆(sway,海浪引起的较大误差)和偏航(yaw,较小的姿态误差).侧摆一般用DPC修正,而偏航则通过自聚焦解决.

侧摆是拖体平行于航迹的水平运动,产生斜距误差,导致接收信号产生时间上的延迟.若SAS沿X轴运动,坐标用x表示,则时延的大小用 $t_e(x)$ 表示.考虑SAS发射的是chirp信号,可以表示为:

$$s_e(t) = \text{Re} \left\{ \text{rect} \left(\frac{t}{T} \right) \exp(j2\pi f_0 t + j\pi f_1 t^2) \right\}, -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (1)$$

收稿日期:2001-11-13;修回日期:2002-04-15

基金项目:863计划海洋检测主题资助项目(No. 818-04-05)

其中 f_0 为 chirp 信号中心频率, f_r 为调频速率, T 为脉冲宽度.

为简化分析过程,忽略换能器方向性的影响(或认为是等方向性的). 如果一个点目标与 SAS 航迹的最小距离为 r_0 , 沿 X 轴的坐标为 x_0 , 则接收信号为:

$$s_r(t, x) = \text{Re} \left\{ \text{rect} \left[\frac{t - \tau}{T} \right] \exp [j\pi f_r (t - \tau)^2] \exp [j2\pi f_0 (t - \tau)] \right\} \quad (2)$$

正交解调后变为复信号,利用相位驻留原理,脉冲压缩后的信号表示为:

$$s_{rc}(t, x) \approx \alpha \text{sinc} [f_r T (t - \tau)] \exp \{j2\pi f_0 \tau\} \quad (3)$$

其中 α 为常数, SAS 回波信号的时延:

$$\tau = \frac{2}{c} \sqrt{r_0^2 + (x - x_0)^2} \quad (4)$$

这里 c 为声速.

当存在侧摆误差时,其对声纳回波的影响是产生一个附加延时,记为 $t_e(x)$, 则

$$s(t, x) \approx \alpha \text{sinc} [f_r T \{t - (\tau + t_e(x))\}] \exp \{-j2\pi f_0 [\tau + t_e(x)]\} \quad (5)$$

式(5)表明, SAS 侧摆误差引起脉压后的复信号中时延和相移的变化.

2.2 基于自相关的延时估计

侧摆引起散射体到 SAS 斜距的变化,这也是回波延时的变化,通过相邻两次回波的互相关函数 (ping 到 ping 的互相关) 可将这个变化估计出来.

在合成孔径成像文献中,还未发现基于相关函数的时延估计方面的严格数学证明. 时延估计是水声阵列处理中一个重要问题, C H Knapp 和 G C Carter^[4] 证明了噪声背景下时延的最佳最大似然估计本质上是一个互相关器,按照相应结论构造的互相关估计器的结构如图 1. 改变延时 τ , 当检测到最大峰值时,对应的 τ 即为估值. 由互相关函数估计回波延时或斜距变化的这种方法在其它领域也有相似用法.

在运动目标成像、ISAR 成像^[5]等领域,经常用到基于相关函数的运动估计问题. 假设 SAS 相邻两次回波分别为 $s_n(t)$ 和 $s_{n+1}(t)$, 则互相关函数:

$$R_n(u) \approx \int s_n(t) s_{n+1}^*(t + u) dt \quad (6)$$

假设相邻两次回波的模值变化很小时, 即 $|s_n(t)| \approx |s_{n+1}(t)|$, 那么:

$$R_n(u) \approx \int |s_n(t)|^2 \exp \{j2\pi f_0 [u - \Delta\tau_n]\} dt \quad (7)$$

其中 $\Delta\tau_n$ 为第 n 次回波 (ping) 和第 $n+1$ 次回波 (ping) 信号的延时差. 当 $u = \Delta\tau_n$ 时, 互相关函数取得最大, 故互相关函数峰值对应的时延就是相邻两 ping 间的时延. 将所有方位上的相邻 ping 相对延时计算出来, 然后沿方位积分, 就得到方位向的延时误差或斜距误差.

2.3 侧摆误差的估计

忽略距离徙动的影响, 当 SAS 沿理想航迹运动时, 将脉冲压缩后所有方位上相邻两 ping 的数据互相关, ping 与 ping 间

无斜距变化, 所以均为 0. 如果存在侧摆引起的斜距误差, 则通过相关估计得到 ping 与 ping 间斜距的变化或微分结果, 通过积分就得到所有 ping 上的斜距误差.

2.4 点目标的距离徙动及互相关估计结果

由于 SAS 距离和方位的耦合, 点目标在不同方位上到 SAS 的距离是变化的, 距离徙动曲线为:

$$R = \sqrt{r_0^2 + v^2 (s - s_0)^2} \quad (8)$$

其中 R 是 s 时刻, 点目标到 SAS 平台的距离. v 为平台运动速度, r_0 为点目标到航迹的最小距离, 对应公式中 $s = s_0$ 时刻 R 的值.

因此, 由于距离徙动的影响, 前述误差估计的直接结果是侧摆误差与徙动距离的和.

2.5 侧摆误差的曲线拟合提取

SAS 运动速度很慢而且方位采用率很低, 在相对较长的方位采样时间内, 海浪等引起的侧摆表现为高频摆动误差, 它叠加在距离徙动函数之上. 因为徙动为一条平滑曲线 (可用二次、四次或更高次多项式逼近), 对互相关法估计的结果做曲线拟合, 将平滑曲线做为徙动曲线估值. 在总估计结果中减去徙动曲线估计, 就得到高频摆动误差的结果.

2.6 采样率问题讨论

在离散傅立叶分析领域, 要求用二倍以上信号上限频率采样即可. 而做时域波形分析时, 采样率的要求常常很高, 有关分析表明, 为正确得到正弦信号的峰值, 采用十倍信号频率的采样率, 平均峰值误差小于 5%. 在声纳阵列处理时域波束形成时, 一般要求 8 至 10 倍信号上限频率的采样率. 在采样率较低时, 可采用内插处理做为补偿. 在 DPC 运动补偿中, 同样需要高采样率及内插处理, 才能取得好的效果.

2.7 运动补偿过程

运动补偿在脉冲压缩后进行. 结合成像过程, 由如下几步组成: (1) 回波信号正交解调、脉冲压缩; (2) 侧摆误差估计, 并进行补偿; (3) 采用距离徙动成像或其它算法成像; (4) 图象域自聚焦 (选做项).

3 实验结果

3.1 仿真实验

参数选取: 线性调频信号中心频率 25kHz, 带宽 7.5kHz, 发射信号脉冲重复频率 10Hz (方位采样率), 接收信号采样频率 125kHz. 拖体运动速度 0.5 米/秒, 采用单发射阵和单接收阵, 接收阵的方位向开角 20°. 在 SAS 运动轨道上引入 3 个周期、峰值为 6 厘米的正弦变化斜距误差.

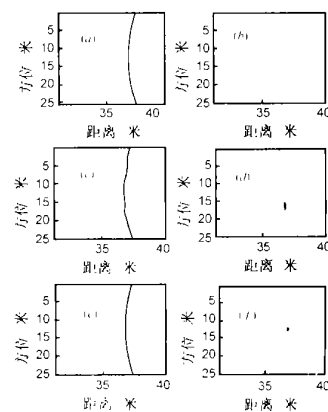


图 2 点目标脉压和成像结果

图 2 中 (a) 和 (b) 分

别为点目标在无运动误差时脉冲压缩和最后成像结果,(c)和(d)分别为有运动误差时脉冲压缩和最后成像结果,(e)和(f)分别为经过 DPC 运动补偿后脉冲压缩和最后成像结果.存在运动误差时的图象明显变坏,经运动补偿后图象效果变好.

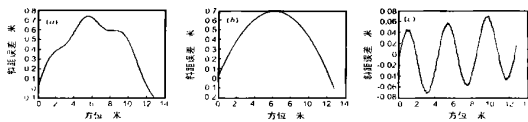


图 3 基于相关函数的误差估计

图 3 给出斜距误差估计结果.其中(a)是叠加在距离徙动函数之上的斜距误差估计,(b)为通过曲线拟合得到的距离徙动估计,这里采用的是二次多项式拟合,(c)为减去拟合函数影响后的斜距误差估计,也就是运动误差的估计.

3.2 水下实验结果

图 4(a)为千岛湖水下实验强散射体 SAS 成像结果,而图 4(b)经本文中的 DPC 修正的结果.经修正后的图象,对强散射体的像点有锐化效果.

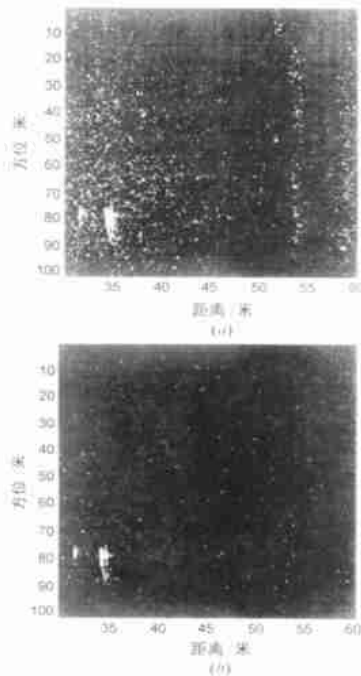


图 4 水下实验结果:(a)强散射体 SAS 图象;(b)运动补偿后的图象

4 结论

传统的利用多接收阵对水底完全混响回波运动补偿方法,当存在强散射体时,侧摆估值的误差较大.本文利用单接收阵及单个强散射体回波提取误差信息,进行运动补偿.但该过程相对复杂些,需要进行强点散射体距离徙动的估计,以便将其与侧摆估计分开.同时,当存在多个强散射

体时,需要根据脉压后的图象,确定孤立的强散射点.强散射点散射需足够强,在脉冲压缩图象中应存在可辨别的徙动曲线.

参考文献:

- [1] Robert W Sheriff. Synthetic aperture beamforming with automatic phase compensation for high frequency sonars[A]. Proc of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicles[C]. June 1992. 236 - 245.
- [2] Dennis Garrod, Norm Lehtomaki, Mark Neudorfer, Andrew Palowitch. Synthetic aperture sonar: An evolving technology- Radar technology used for underwater mine hunting and unexploded ordnance location[J]. Sea Technology, June 1999, (6): 17 - 23.
- [3] W W Bonifant Jr, M A Richards, J H McClellan. Interferometric height estimation of the sea floor via synthetic aperture sonar in the presence of motion errors[J]. IEE Proc Radar, Sonar and Navigation, December 2000, 147(6): 322 - 330.
- [4] C H Knapp, G C Carter. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Trans on ASSP, 1976, 24(4): 320 - 327.
- [5] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999. 258 - 317.

作者简介:



刘纪元 男,1963 年出生于辽宁,博士、教授,主要研究方向为雷达与声纳信号处理及实时系统.

唐劲松 男,1964 年出生于湖北,研究员,主要研究方向为雷达与声纳信号处理、声纳成像等.

孙宝申 男,1944 年出生于天津,研究员,主要研究方向为声学信号处理、声成像等.

张春华 男,1962 年出生于河南,研究员,博士生导师,主要研究方向为水声信号处理、声纳成像等.

李启虎 男,1939 年出生于浙江,中科院院士,研究员,博士生导师,长期从事水声信号处理研究和声纳系统的设计等工作.