

合成孔径声呐并行实时处理研究¹

刘纪元 李淑秋 李丽英 张春华 李启虎

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

摘 要 该文论述了合成孔径声呐 (Synthetic Aperture Sonar, SAS) 系统的图像重建算法选择、参数选择和并行处理方式, 并提出一种基于 SHARC 信号处理机 SAS 实时成像实现方法。结合自行研制的原理样机中信号处理系统特点, 采用两级流水线: 第一级利用空间采样间隔时间做序贯处理, 完成正交解调、脉冲压缩功能; 第二级采用批 (帧) 处理完成方位聚焦。两级流水线, 仅用一级 (第二级) 的时间开销, 就完成了图像重建。为满足实时性要求, 两级都采用了并行处理。

关键词 合成孔径声呐 (SAS), 实时处理, 声呐成像

中图分类号 TN958.99

1 引 言

水下成像主要采用光学摄像机、激光成像和声呐成像等手段。光学和激光成像图像清晰、好于其它设备成像效果, 但作用距离太近, 一般在几米至几十米之间, 而且不适合混水场合。声成像具有作用距离远、有穿透能力等优点, 因而被广泛用于水下成像。如水下地质地貌勘测、水下丢失物寻找、水雷探测 (含锚雷、沉底雷和泥沙掩埋的沉底雷) 等。水下声成像有主动和被动声呐两种方式, 而侧扫成像式主动声呐应用较广泛, 侧扫声呐方位向的高分辨率通过大的换能器 (方位向) 孔径取得。合成孔径声呐也工作在侧扫方式下, 但它通过小的孔径及其运动形成等效大孔径。与合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 一样, 合成孔径声呐 (Synthetic Aperture Sonar, SAS) 的一个优点是方位分辨率与距离无关^[1]。

SAS 的原理研究从 20 世纪六、七十年代开始, 但 SAS 在应用上存在的一些技术问题制约了它的发展^[2]。首先水声环境 (时变信道) 一般比较恶劣, 不同回波的信号的相干性是个问题; 其次, 水声传播速度慢, 使得信号空间采样率不足; 同时, 受声传播速度慢和方位模糊的限制, SAS 的载体运动速度慢, 姿态不容易稳定。

受 SAR 成功的鼓舞, 进入 80 年代, 欧洲、澳洲、北美一些国家进行了一系列水声环境实验, 结果表明水声信号的相干性能够满足合成孔径成像要求。声传播速度慢导致信号空间采样率低和限制 SAS 载体运动速度等问题可以通过多接收阵的办法来弥补。90 年代以来, 上述一些国家先后研制出 SAS 原理样机^[3,4], 并且性能在不断提高。一些 SAS 系统的作用距离从原来的几十米、几百米到十几公里, 甚至更远; 分辨率也从几米、几分米到厘米甚至更小。

我国在 90 年代开始 SAS 实时成像系统的研制工作, 目前已研制出 SAS 湖试样机, 分辨率在分米量级, 作用距离在百米之内。样机经水下实验, 能实时完成合成孔径成像, 为下一步海试 SAS 实时成像样机的实现打下基础。该 SAS 信号处理系统能完成实时成像、实时显示、实时原始数据存储等功能。SAS 信号处理系统以 Melbourne DSP 板为主要计算单元, 该板是由 Spectrum 公司生产的、以 ADI 公司的 ADSP-21060(SHARC) 为处理器的信号处理板。各 DSP 有独立的程序和数据存储器, 并通过 LINK 口相连。因为每个 SHARC 芯片有 6 个 LINK 口, DSP 间的数据传递, 处理起来比较方便。本系统直接采集带载频的回波信号, 并用 SHARC 在数字域内进行正交解调、脉冲压缩, 然后进行方位处理并得到重建的图像。

SAS 实时成像与 SAR 成像有相似之处, 但也有自身的特点。首先, 声呐的载频较低, 一般采用宽带信号发射, 所以要选用宽带方法图像重建。其次, 水声传播速度低, 信号空间采样率

¹ 2002-04-05 收到, 2002-09-30 改回

863 计划 (863-818-04-05, 863-2002AA631110) 资助项目

低,常采用多接收阵处理。我们的 SAS 系统采用两级流水线结构,每级内采用多 CPU 并行处理保证实时性。第一级完成正交解调、脉冲压缩、乒乓存储、转置存储的功能。结合 SAS 空间采样率低的特点,充分利用脉冲信号接收间隙,并行完成第一级运算,在时间上仅延时一个方位信号收发周期。本文结合该 SAS 湖试样机,论述 SAS 图像重建算法和实时并行处理的有关问题。

2 SAS 图像重建算法选择

SAS 图像重建是在 SAR 成像的基础上发展起来的,所以有必要回顾一下 SAR 成像方法。

SAR 成像最简单最基本的方法是时域“二维移变滤波器匹配”方法,可简化为时域“延时相加法”。这是一种“逐点”的运算方法,在早期的 SAR 成像中使用,因为其运算效率很低,现代 SAR 中很少采用。而 RD(Range Doppler),CS(Chirp Scaling)和 Ω K(Range Migration)等“逐线”成像算法,常被现代 SAR 所采用。

RD 算法将二维成像处理过程简化为距离和方位两个一维级联处理。当忽略距离和方位耦合时,成像效率很高,特别便于实时成像。但简单的 RD 算法存在两个缺点:一个是距离徙动较大时(距离和方位耦合较强),图像失真较大。解决办法是增加“距离徙动校正”环节。这不仅使运算量增加,而且并行实时处理时,“距离徙动校正”需要多次转角存储,大大降低了运算效率。RD 算法的另一个缺点是不适合斜视处理,当接收天线波束中心线与航迹不垂直时,条带式 SAR 图像失真增大。解决办法是增加“二次距离压缩”环节。RD 算法的若干改进使其效率大大降低。

90 年代以来,用于地震信号处理的 Ω K 算法引入到 SAR 成像中。 Ω K 法是一种“二维”的处理方法,从理论上较“优化”。但 Stolt 变换需要插值运算,减低了运算效率而且使相位保持特性变差。

CS 算法对 Ω K 算法做了改进和近似处理,避免了插值运算,运算效率大大提高。采用二维处理的 CS 算法同一维的 RD 法相比,对斜视的宽容性好。它虽然比 RD 算法对斜视有更大一些宽容性,但斜视角较大时,仍需要改进。CS 中存在模型近似,斜视时会使近似产生的残差加大。在经典 CS 基础上发展起来的非线性 CS 及其它改进,对斜视成像效果有改善。CS 法目前是高分辨 SAR 成像中较好的方法。

SAR 研究领域除向高分辨率发展外,低频超宽带 SAR 因为较明显的军事背景也成为受到关注的一个方向。超宽带 SAR 成像目前主要采用“延时相加法”(sum-delay 法)和“ Ω K 法”。

SAS 一般为宽带系统,图像重建通常采用 Ω K 法。因为该方法是较优化的二维算法,适合宽带处理,对斜视宽容性好,所以为 SAS 系统普遍采用的方法。如新西兰的 KIWI SAS 和美国的 DARPA SAS 等都采用该算法成像。

延时相加法尽管运算效率低,但在 SAS 中也常采用。SAS 成像时方位采样率和测绘效率都低,实时处理比 SAR 容易实现。另外,延时相加法具有物理意义清晰、数学模型简单、运动补偿直接方便、便于多接收阵成像、对斜视宽容性好等特点,是理论上“最精确”的方法。欧洲的 SAMI SAS 系统就采用该算法成像。

近年来也有人采用“加速的 CS”(Accelerated Chirp Scaling)法进行 SAS 成像。这种改进的 CS 法,运算效率较高。

我们在 SHARC 信号处理机上,采用 Ω K 等并行算法实现了实时成像。

3 并行处理的考虑

3.1 Ω K 算法的并行实现

鉴于声呐信号的载频较低,可以对带载频的回波信号直接采样,然后在数字域内进行正交解调。用 SHARC 进行解调,比模拟方法实现起来方便灵活,精度高。但运算量较大,需要多

CPU 并行运算才能实现实时处理。同时, 带载频采样时, 采样率较高, 解调后还要做降采样处理。单接收阵的 ΩK 算法并行处理系统如图 1 所示。

图 2 给出了多接收阵时 ΩK 算法并行处理方法, 多通道数据在做合成孔径处理前进行调整和融合, 变成单路复信号。

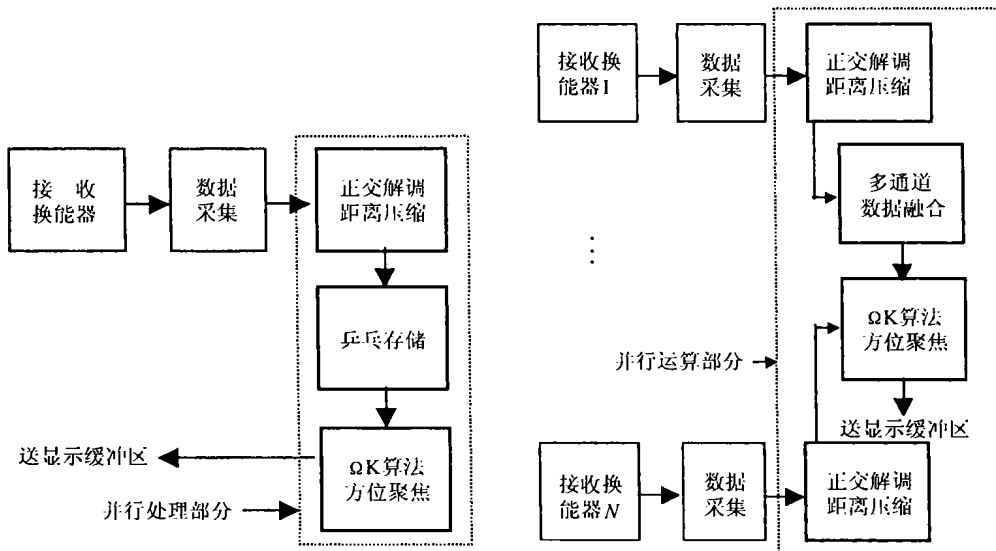


图 1 单接收阵 SAS 信号处理系统框图

图 2 多接收阵 SAR 信号处理系统框图

ΩK 为二维频域成像算法, 需要对矩阵的各行各列分别做 FFT 和 IFFT 变换。在做并行处理时, 需要转置存储。 ΩK 算法并行处理的流程如图 3 所示。

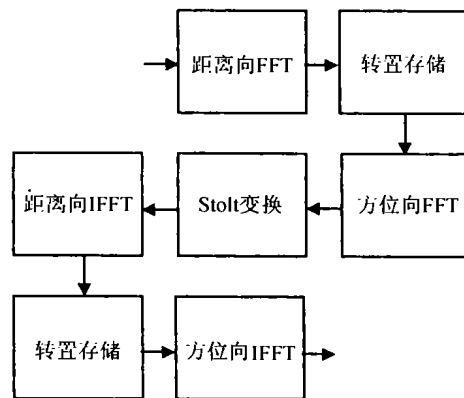


图 3 距离徙动算法并行计算流程图

3.2 延时相加法并行实现

延时相加法是基于“像素” (pixel-based) 的成像方法。对于给定的像素点 P , 计算接收阵在参与孔径合成的各位置上相对 P 点的延时, 不同的像素对应于不同的一组延时。延时相加法对于收发分置和多接收阵的合成孔径处理十分简便: 分别计算各接收阵对应同一成像点的不同

延时, 做延时相加即可。由于“逐点”的时域延时相比“逐线”的二维频域成像效率低得多, 优化并行实时处理的要求就更迫切。其中一种优化的并行任务分配方法是像素点“非等量分配”到并行计算节点上。因为不同距离上的像点对应的有效合成孔径程度不同: 近距离上的点对应的合成孔径短, 成像所需的运算量就小。如图 4(a) 所示, E 和 F 是不同斜距的两个成像点, 与 F 点 (对应的有效合成孔径长度为图中 CD 段) 相比, E 与航迹的斜距大, 对应的有效合成孔径长度 AB 也大, 所以 E 点的合成孔径运算空间采样点数多, 运算量大。图 4(b) 和图 4(c) 分别是并行运算时“等像素分配”和“不等像素分配”示意图, 显然图 4(c) 的任务分配更合理些。

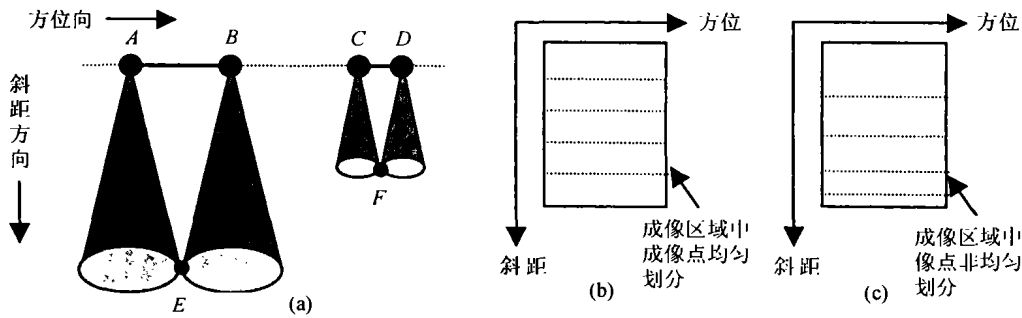


图 4

(a) 不同斜距上点对应的合成孔径照射情况示意图

(b) 成像点沿斜距等间隔划分并行任务 (c) 非等间隔划分并行任务示意图

方位合成孔径处理既可在解调前进行, 也可在解调和脉冲完成后进行。波束形成的理论和实践表明, 采样率在信号上限频率的 8-10 倍时, 才能得到较好的方位处理效果。如果在解调前进行方位处理, 要求有较高的采样率, 运算量也太大。

4 SHARC 信号处理机并行实现

4.1 参数选取

取换能器方位向孔径 $D \approx 0.2\text{m}$ (理论上, 方位分辨率可达 0.1m), 最大作用距离为 $R_{\max} = 75\text{m}$, 则由距离的限制:

$$\text{PRF} \leq C/(2R_{\max}) = 10\text{Hz} \quad (1)$$

其中水声速度取 $C = 1500\text{m/s}$ 。

由方位模糊的限制, 相邻两次接收期间, SAS 的运动不能超过孔径 D 的一半^[3], 则

$$V \leq D \cdot \text{PRF}/2 = 1\text{m/s} \quad (2)$$

采用单接收阵和并行 ΩK 算法实现图像重建。流水线处理时, 距离向取 1024 点, 方位向取 512 点 (方位向数据重叠为 256) 作为一次帧处理。

信号发射为线性调频信号脉冲, 中心频率 20kHz , 带宽 7.5kHz , 脉冲宽度 10ms , 脉冲重复周期 100ms 。信号的采样率为 125kHz , 正交解调后信号按 5:1 降采样, 故在基带上, 等效的信号采样率为 25kHz 。

4.2 并行信号处理机组成

主从式计算机系统, 主机侧结构与通用 PC 机相同, 完成人机交互、DSP 程序加载、成像数据回传及图像显示等功能。从机侧为多节点 DSP 系统, 每个节点由 SHARC 处理器 (ADSP21060) 和与其相连的存储单元组成。不同节点间通过 SHARC 的 LINK 口相连, 用于相互间的通信和数据传递。信号采集、处理和存储单元。多 DSP 节点 SHARC 系统的选用, 主要是基于 SHARC 芯片有 6 个 LINK 口, 并行处理时节点间的连接较方便。

4.3 并行节点的选取

第一级流水线如图 5 所示。节点 1 用于数据流的控制, 接收 AD 送来的数据, 并按 ping (不同方位上的脉冲) 的顺序分别送到节点 2, 3, 4, 5。节点 2, 3, 4, 5 各计算一个 ping (5000 点) 的数据, 并行完成正交解调和脉压。节点 6 用于数据的乒乓存储, 采用双 buffer 存储数据, 供第二级流水线批处理。第二级流水线如图 6 所示。节点 7 完成数据的孔径重叠 (相当于 Circular buffer)、方位 FFT、转置存储等功能, 并沿方位向将数据等分成 4 份, 分别送到节点 8, 9, 10, 11。四个并行节点完成 Stolt 变换、方位向 IFFT 等变换, 并将结果送节点 12, 节点 12 完成转置存储及距离向 IFFT。

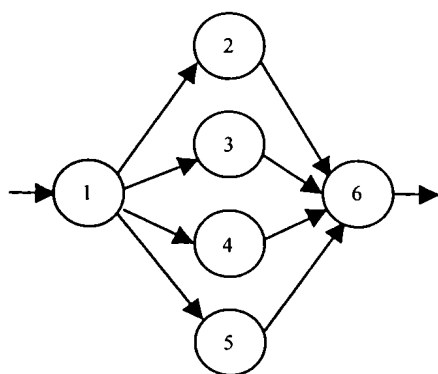


图 5 第一级流水线

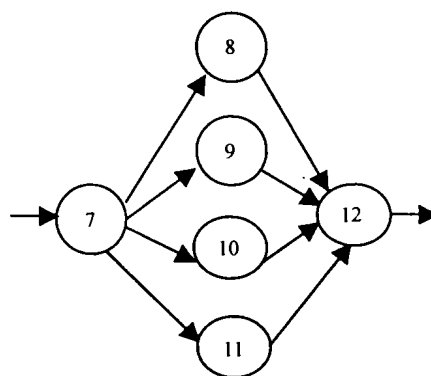


图 6 第二级流水线

数据采集和实时存储部分的讨论这里从略。

4.4 提高运算效率的措施

为提高运算效率, 采取了以下措施降低运算量:

(1) 降采样与相关运算相结合, 大大降低低通滤波运算时间

正交解调含三角函数相乘和低通滤波两步, 在基带经 5 取 1 降采样。其中低通滤波采用输入数据与低通滤波器脉冲响应卷积来实现, 在卷积计算中, 每隔 5 点做一次计算, 相当于只计算了降采样后留下的点, 略去其它点, 节约了 4/5 的运算量。

(2) 脉冲压缩在频域进行, 并直接进行方位向 FFT

脉冲压缩既可以在时域又可以在频域进行。因为在频域处理可以采用快速傅里叶变换, 一般运算速度比时域处理快。同时, ΩK 算法成像在二维频域内进行, 脉压后的结果一般先做距离向 FFT, 然后方位向 FFT 进入二维频域。因此, 在频域内做脉冲压缩时, 保持结果在频域内, 直接做方位向 FFT。这样就省去了距离向各脉冲的一次 FFT 和一次 IFFT。

4.5 二维行列处理时数据传递结构

图 7 是一种硬件上节省的并行二维处理结构, 左侧各并行节点完成分块的距离向处理, 然后经 LINK 口转置并分块到右侧并行节点, 转置存储和并行任务分配同时进行。但是大量的矩阵数据, 使 LINK 口通信排队、虚拟通路的使用等变得复杂, 有可能出现阻塞。故本系统采用图 8 的方式完成二维行列处理。因为增加了一个中间级节点 O , 使得通信的控制变得简洁, 转

置存储也简单方便。在中间级节点 O 上实现了转置存储, 再从该节点上将数据分配到并行节点上。

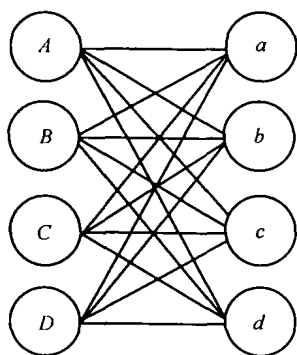


图 7 用 LINK 接口传递二维矩阵
并行处理数据的一种方法

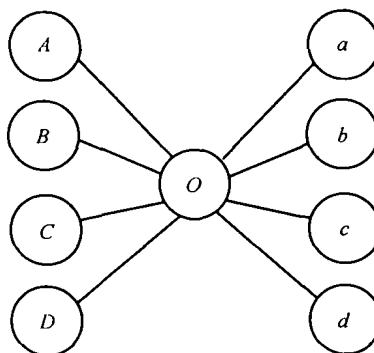


图 8 用 LINK 接口传递二维矩阵
并行处理数据的另一种方法

5 水下实验结果

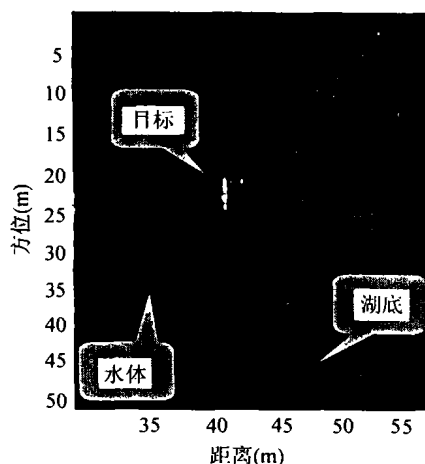


图 9 L 形强散射体的 SAS 成像

在浙江千岛湖完成了多次水下实验, 对特定的水下悬浮目标、沉底目标进行了合成孔径成像, 同时还得到了人工湖建成前的新安江旧河道及两侧石头河堤的图像。

图 9 是 L 形强散射体的 SAS 图像。实验地点在千岛湖猴岛附近, 水深约 60m, 拖体入水 20m, 运动速度 0.87m/s。L 形强散射体 (每个臂长度约 2.5m, 且每个臂上装有两个煤气罐), 用 10m 长的钢绳将目标与铁块连在一起, 沉入水中, 目标距水底 40m。

6 结束语

本文讨论了 ΩK 和延时相加两种 SAS 算法的并行实现, 包括并行处理任务分配、节点间数据通信等问题。结合 SAS 的特点, 采用两级并行流水线, 其中一级序贯处理、一级批处理来完成实时成像。水下实验表明, 该方法正确可行, 能满足实时成像、实时存储等要求。

采用 LINK 口数据传递, 控制上虽然很方便, 但 SAS 图像重建时, 大量的二维处理, 特别是转置存储, 容易使 LINK 口数据交换出现瓶颈。如果部分节点采用大的共享存储器, 比单纯

的 LINK 口数据交换可能要快捷些。另外, 采用重叠子孔径法成像, 第二级流水线批处理时各节点运算负荷及存储量都会大大降低、节点间传递数据流也会显著减小。

参 考 文 献

- [1] M. P. Hayes, P. T. Gough, Broad-band synthetic aperture sonar, IEEE J. of Oceanic Engineering, 1992, 17(1), 80-94.
- [2] P. T. Gough, D. W. Hawkins, Imaging algorithms for a strip-map synthetic aperture sonar: minimizing the effects of aperture errors and aperture undersampling, IEEE J. of Oceanic Engineering, 1997, 22(1), 27-39.
- [3] A. E. Adams, M. A. Lawlor, V. S. Riyait, O. R. Hinton, B. S. Sharif, Real-time synthetic aperture sonar processing, IEE Proc.-Radar, Sonar and Navigation, 1996, 143(3), 169-175.
- [4] V. S. Riyait, M. A. Lawlor, A. E. Adams, O. H. Hinton, B. Sharif, Real-time synthetic aperture sonar imaging using a parallel architecture, IEEE Trans. on Image Processing, 1995, IP-4(7), 1010-1019.

STUDY ON REAL-TIME AND PARALLEL IMPLEMENTATION OF SYNTHETIC APERTURE SONAR SIGNAL PROCESSING

Liu Jiyuan Li Shuqiu Li Liying Zhang Chunhua Li Qihu

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

Abstract Reconstruction algorithms for Synthetic Aperture Sonar (SAS) are discussed, and choice of SAS parameters and parallel structures are studied in this paper. A SHARC-based real-time processing system for SAS imaging is presented. Two pipelines are used in the system. The first pipeline makes full use of pulse repetition interval and proceed data sequentially, and the second one focuses image data in frame. Therefore, SAS image is reconstructed with only one stage time-consumption though two stages are used. Moreover, parallel processing are used in both stages to meet real-time requirement.

Key words Synthetic Aperture Sonar(SAS), Real-time processing, Imaging sonar

刘纪元: 男, 1963 年生, 教授, 主要研究方向为雷达与声纳信号处理及实时信号处理等。
李淑秋: 女, 1963 年生, 研究员, 主要研究方向为水声工程及实时信号处理等。
李丽英: 女, 1977 年生, 研实员, 主要研究方向为水声工程及实时信号处理等。
张春华: 男, 1962 年生, 研究员, 主要研究方向为水声信号处理和声纳成像等。
李启虎: 男, 1939 年生, 研究员, 中科院院士, 主要研究方向为水声信号处理和声纳系统的设计等。