

MUSIC 算法在分布式并行处理机上的实现研究

郭元曦, 桑恩方, 王继胜

(哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 介绍了一种基于分布式并行处理平台的并行 MUSIC 实现方法。在实现过程中, 针对 MUSIC 算法运算量大难以实时实现的特点, 采取了有效减少计算量的措施。并根据 MUSIC 算法各个子任务的不平衡性, 提出了一种基于软件流水的并行任务划分方法。经仿真试验证明, 经过上述并行处理后可有效加快算法的完成时间, 在工程实践中具有广泛的实际意义。

关键词: 并行算法 分布式并行处理 MUSIC

信号源测向及波达方向 (DOA) 估计是阵列信号处理的主要研究方向, 是声纳、雷达、通信等许多领域的重要任务之一。以 MUSIC 算法^[1]为代表的超分辨算法提供了超过以往任何一种测向体制的测向分辨力。它具有对入射波达方向估计的渐进无偏特性和超分辨特性, 其估计精度接近 Cramer-Rao 方差下限。然而, 该算法运算量大, 需要进行特征值和特征向量分解的特性限制了其在实际系统中的实时应用。在现有信息处理能力下, 并行处理系统的开发和并行算法的实现是解决复杂运算实时性问题的一个有效途径。通过适当的并行处理算法, 能够使系统的处理速度、可靠性和灵活性都有所提高。

1 MUSIC 算法的实现

MUSIC 算法的实现可大致分为以下三个步骤:

(1) 进行接收数据相关矩阵的估计。假设接收信号的各态历经性, 采用数据的时间平均代替集平均, 若 X 为接收阵列数据矩阵, L 为快拍数, 则相关矩阵为:

$$\hat{R} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X X^H \quad (1)$$

(2) 对 \hat{R} 进行特征分解, 并将特征向量空间分成信号和噪声子空间。

(3) 根据信号子空间和噪声子空间的正交性由下式进行谱峰搜索:

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\alpha^H(\theta) \times \hat{U}_N \times \hat{U}_N^H \times \alpha(\theta)} \quad (2)$$

式中, \hat{U}_N 是对 \hat{R} 进行特征分解得到的噪声子空间特征矢量矩阵, $\alpha(\theta)$ 是对应于 θ 角度的导向矢量, 上标“H”表示矩阵的共轭转置运算。

在上述算法中, 协方差数据矩阵估计的运算复杂度和谱峰搜索的运算复杂度都为 $O(N^2)$; 特征向量分解的运算复杂度为 $O(N^3)$ 。可见, 随着 N 的增加, MUSIC 算法的运算量呈非线性快速增长。

2 运算的简化及优化

2.1 相关矩阵的估计及快拍数

在理论上,要求采用无穷多次快拍数来确定输入信号的相关矩阵 R 。显然这在实时信号处理中是无法实现的。在实际的处理系统中采样时间有限,并且随着信号采样时间的延长,过旧的数据通常不能真实反映当前信号的状态。这里引入遗忘因子 α 并在每次迭代中通过指数平均的方法进行相关矩阵 \hat{R} 的估计,以代替(1)式中仅用当前 L 次快拍数进行相关矩阵的估计。具体如下:

$$\hat{R}(n+1)=\alpha\hat{R}(n)+(1-\alpha)\{x(n+1)x^H(n+1)\} \quad (3)$$

另外,阵列输出数据的相关矩阵 R 为 Hermit 矩阵,可利用该性质使运算得到简化。即仅计算 R 主对角线以上(含主对角线)的元素,其他元素可利用 Hermit 矩阵的性质通过映射而得到,这样 \hat{R} 的运算可减少近一半。

2.2 特征值及特征向量的计算

对于一般形式的矩阵 A ,多采用一系列相似变换将 A 转化为特殊形状的矩阵来间接求解。其经典方法包括 Jacobi 方法、三对角的 Householder 方法以及 QR 方法等。然而这些经典算法大都是以实矩阵为对象进行求解,在实际工程应用中要面对的则是复矩阵。因此需要将复矩阵转换为实矩阵进行运算。利用相关矩阵的 Hermit 特性,将 n 阶复 Hermite 矩阵 R 表示成实数矩阵和虚数矩阵两个部分:

$$R=A+iB \quad (4)$$

式中, A 、 B 均为实数矩阵。由 $R=R^H$ 的特性可知: $A^T=A$, $B^T=-B$ 。

同样,设特征值为 λ 对应的特征向量为 $U+iV$,其中 U 和 V 均为 n 维实数列向量,则根据特征向量的定义有:

$$(A+iB)(U+iV)=\lambda(U+iV) \quad (5)$$

由于 R 的特征值为实数,因此(5)式可以写成:

$$\begin{bmatrix} A & -B \\ B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过上述变换,即可将求复数 Hermite 矩阵的特征值转换成求实数矩阵的特征值。在进行上述变换之后,参考文献^[3]提出了一种求解 Hermite 矩阵特征值和特征向量的改进方法。在综合比较各种经典算法优缺点的基础上,采用将实 Hermite 矩阵转换成三对角阵后求其特征值和特征向量的方法,具有速度快、精度高、鲁棒性好的特点。

2.3 导向矢量的计算

基本思想如下:对于均匀布放的阵列,能否找到其导向矢量的运算规律,并利用该规律使计算得到简化。基于以上思想并以均匀线列阵为例,进行以下推导:

设阵元间距为 d 的 N 元均匀线列阵的入射方向角 θ 在 $[-\pi, \pi]$ 范围内,则方向矢量 $\alpha(\theta)$ 可表示如下:

$$\alpha(\theta)=[1, \exp(-j2\pi d\sin\theta/\lambda), \dots, \exp(-j2\pi(N-1)d\sin\theta/\lambda)]^T \quad (7)$$

令 $0<\theta<\pi/2$,则 $-\pi/2<-\theta<0$,于是存在如下映射关系:

$$\alpha(-\theta)=[1, \exp(j2\pi d\sin\theta/\lambda), \dots, \exp(j2\pi(N-1)d\sin\theta/\lambda)]^T \quad (8)$$

由此可以得出, $\alpha(\theta)$ 与 $\alpha(-\theta)$ 互为共轭的关系。通过这种关系可以有效地减少导向矢量的运算量。

3 MUSIC 算法的并行实现

通过上述方法就可以在单片数字信号处理器上完整地实现 MUSIC 算法,但是由于单片处理芯片处理速度的限制很难实时完成该算法的处理任务。如果将一个应用任务分解成多个独立的子任务并采用多片数字信号处理器并行完成处理任务,则可以大大节省处理所花费的时间。

3.1 基于 DSP 的分布式并行处理系统

本文提出的并行处理方法是在基于 DSP 的分布式并行处理系统上进行的。多处理器并行系统按照其内部的信息传递机制可分为基于共享存储的紧耦合系统和基于消息传递机制的分布式存储的松耦合系统。与紧耦合系统相比,分布式存储的松耦合系统具有扩展能力强、支持处理结点数量多、可构成各种拓扑结构的特点。图 1 给出了硬件系统的具体结构图。

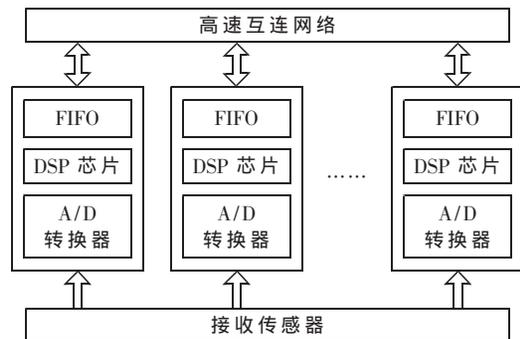


图 1 基于 DSP 的分布式并行处理系统

3.2 MUSIC 算法的并行划分

算法的高速实现是一个较为复杂的问题,除了依赖所采用的芯片性能外,还依赖于对算法本身的理解和实现步骤。通过前面的分析可知,MUSIC 算法的主要处理任务包括:相关矩阵 R 的计算、相关矩阵 R 的特征分解及谱峰搜索三个部分。三部分的任务并不均衡,如果简单地按照任务对并行算法进行划分,将造成负载的不均衡,严重影响并行算法的加速度比和效率。因此如何对算法的各个子任务进行合理的划分,将成为开发 MUSIC 并行算法的重要问题。

这里采用一种基于软件流水的并行任务划分方法。软件流水是一种重要的指令调度技术,它通过并行执行连续启动的循环体来加快循环程序的执行速度。本文将 MUSIC 算法的各个处理任务分阶段地并行执行,以此实现各个处理器间的流水线迭代。如图 2 所示,以三处理结点为例,对该并行划分方法加以详细的说明。

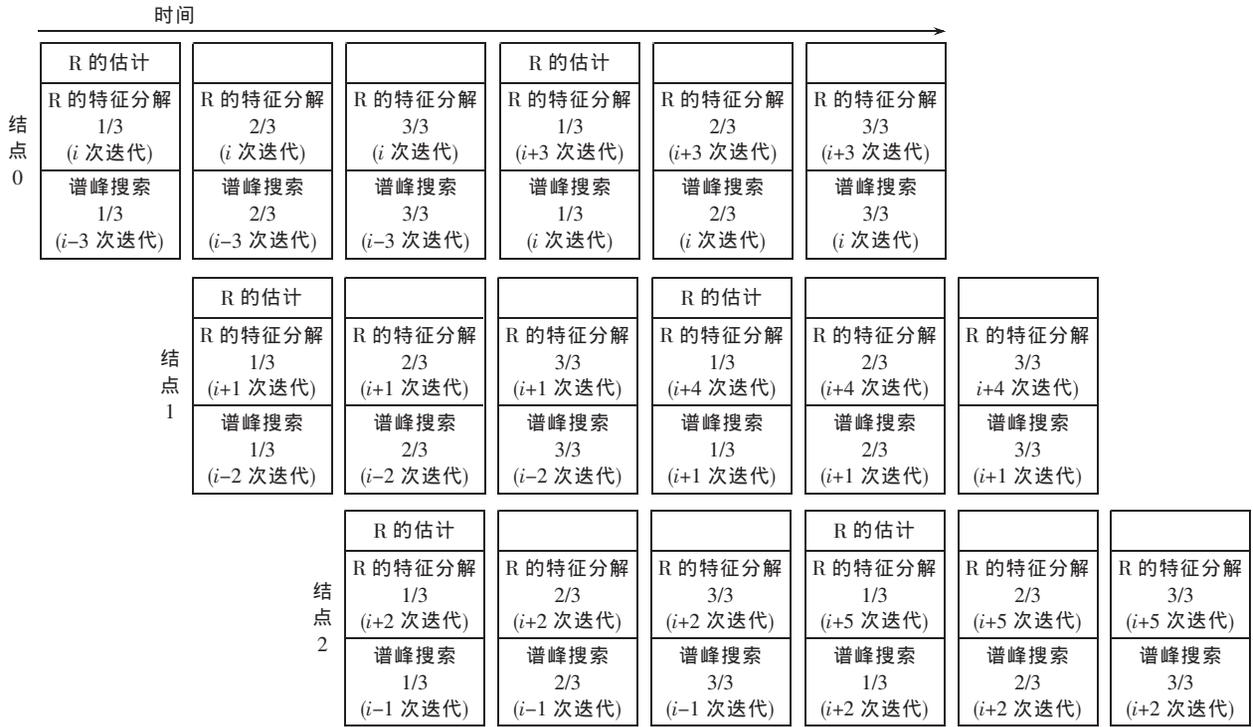


图2 MUSIC算法并行实现的任务划分方法(3结点)

采用图2所示的任务划分方法能够实现各个处理器之间的任务均衡,但是在并行算法的启动过程中需要进行流水线的软件填充及排空。流水线的填充需要 $N-1$ 个单结点运算时间(N 为结点数),这将消耗部分时间,一旦流水线被填充,各个结点之间的迭代将连续地进行。

4 实验结果及效率分析

为了证明以上方法的可行性,进行了模拟仿真试验。试验选取TI公司的TMS320C6711 DSP作为仿真平台,并以7个阵元的均匀线阵为仿真模型,4个独立窄带远场信号的入射方向分别为 -60° 、 -45° 、 -30° 、 45° ,阵元间距 $d=\lambda/2$,数据长度选为256个点。图3即为上述模型在CCS仿真环境下的仿真结果图。图3中的纵轴以分贝的形式给出,横轴以离散的数字形式给出,映射成角度为 $-90^\circ\sim 90^\circ$ 。

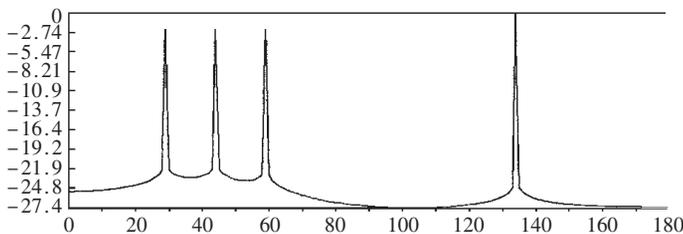


图3 模拟仿真试验结果图

另外,以3个处理结点为例,在TMS320C6711 DSP上进行了运算周期数的测试。其中运算周期通过CCS仿真环境的剖析时钟(Profile)工具进行测试,通信周期

数通过EDMA传输进行测试,其结果如表1所示。

表1 各处理子任务需要的运算指令周期

| R的估计 | R的特征分解 | 谱峰搜索 | 通信(EDMA) | 总计 |
|--------|--------|--------|----------|---------|
| 18 880 | 78 720 | 26 400 | 6 375 | 156 775 |

以TMS320C6711的主频100MHz加以计算,可知3结点分布式并行处理进行单次MUSIC算法需要12.5ms,较单片TMS320C6711进行单次MUSIC算法所需的22.2ms,其加速度比在1.77左右。

参考文献

- [1] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans, 1986, 34(3): 276-280.
- [2] WILKINSON J H. The algebraic eigenvalue problem[M]. Oxford: Oxford University Publishing Company, 1965: 24-30.
- [3] 李小波,薛王伟,孙志勇.一种求解复 Hermite 矩阵特征值的方法[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(4): 403-406.
- [4] 李文龙,陈彧,林海波,等.三种提高软件流水有效性的算法:比较和结合[J]. 软件学报, 2005, 16(10): 1822-1832.
- [5] GEORGE A D, GARCIA J, KIM K, et al. Distributed parallel processing techniques for adaptive sonar beamforming[R]. High-performance computing and simulation (HCS) research laboratory. Department of Electrical and Computer Engineering, 2000.

(收稿日期:2006-07-10)