# 频率、二维到达角和极化联合估计的并行算法研究

## 曾庆华 陈天麒

(电子科技大学电子工程系 成都610054)

## Parallel Algorithm of Multi-Parameters Joint Estimation Based on the Parallel Array

ZENG Qing-Hua CEHN Tian-Qi

(Department of Electric Engineering, UEST, Chengdu 610054)

Abstract In this paper, the serial algorithm analysis and parallel implementation of multi-parameters joint estimation are reported. The numerical results under the PVM computer network environment are presented. Compared with the serial results, the advantages of the parallel algorithm are verified.

Keywords Parallel algorithm, Parallel virtual machine, 2-Dimensional angle of arrival, Polarization, Joint estimation

## 1 引言

无线电波的二维到达角和极化参数的联合估计算法受到 广泛重视,并取得了一定的成果,Li<sup>[1]</sup>利用 ESPRIT 算法和交 叉偶极子阵计算二维到达角和极化参数,Hua<sup>[2]</sup>提出一种 pencil-MUSIC 算法估计二维到达角和极化参数。近年来,在 各信号频率不同,且频率未知的信号环境下,多信号多参量联 合估计已成为参量估计领域的重要课题,电子科技大学王建 英<sup>[3]</sup>提出了一种利用平面交叉偶极子阵列和 ESPRIT 算法, 实现频率、二维到达角和极化的联合估计算法,解决了在宽频 段未知信号环境下对信号频率、二维到达角和极化参量同时 联合估计的问题。

由于频率、二维到达角和极化的联合估计问题具有高度 计算复杂性,高速并行计算是解决这一问题的有效方法。然 而,关于频率、二维到达角和极化的联合估计问题的并行研究 尚不多见,本文在分析频率、二维到达角和极化的联合估计问 题的基础上,提出了一种适合于频率、二维到达角和极化的联 合估计的并行算法,并在 PVM (parallel virtual machine,并 行虚拟机)计算机网络环境下予以模拟计算,显示出较好的并 行加速比和计算效率。

#### 2 问题描述



#### 图1 天线阵列结构

考虑图1所示的天线阵列,它由 L×L 交叉偶极子对,即 2L<sup>2</sup>个短偶极子构成。假设在工作频段内有 K 个非相干窄带

\_\_\_\_

平面波信号到达天线阵,其中心频率和到达角分别为( $\omega_{h}, \theta_{h}$ )  $\phi_{k}$ )(k=1,2,...,K)。并假设每个信号有不同的极化状态,以  $(\alpha_i, \beta_i)$ 表示,其中  $\alpha_i$  为椭圆角, $\beta_i$  为椭圆长轴相对于水平轴 的取向角。

对于一个给定的极化,α和β与描述极化状态的两个角 **度**γ和 η之间的关系为:

$$\begin{cases} \cos 2\gamma = \cos 2\alpha \cos 2\beta \\ \tan \eta = \tan 2\alpha \csc 2\beta \end{cases}$$
(1)

按X和Y方向行列的顺序将每对交叉偶极子输出信号写成 矢量形式,可得阵列输出信号模型可表示为:

$$z(t) = As(t) + n(t)$$
(2)

其中A是与上述参数有关的 $2L^2 \times K$ 阶矩阵,z(t),s(t)和 n (t)均为K维信号矢量,z(t)是输出矢量、s(t)是输入矢量和n (t)是均值为零,方差为 o<sup>2</sup>的高斯白噪声矢量。

假设取 N 次快拍,多信号多参量联合估计问题就是在已 知  $z(t_n)(n=1,2,\dots,N)$ 的情况下,估计参量  $\omega_k, \theta_k, \phi_k, \gamma_k, \eta_k$ 其中 k=1,2,…,K.

用阵元输出 z(t)构造以下组合阵列信号:

$$\tilde{z}(t) = \begin{bmatrix} z(t) \\ z(t+1) \end{bmatrix} = \tilde{A}s(t) + \tilde{n}(t)$$
(3)

 $\Phi_{\bullet} = diag(e^{\mu_1}, e^{\mu_2}, \cdots, e^{\mu_k})$ 

于是可以得到如下两个自协方差矩阵:  $\mathbf{P} = \mathbf{F} \{ \mathbf{z} (\mathbf{z}) \mathbf{z}^{H} (\mathbf{z}) \} = \mathbf{A} \mathbf{P} \mathbf{A}^{H} + \mathbf{z} \mathbf{I}$ 

$$R = E\{z(t)z^{H}(t)\} = AR_{A}A^{H} + \sigma^{2}I$$
(5)
$$\hat{R} = E\{z(t)z^{H}(t)\} = AR_{A}A^{H} + \sigma^{2}I$$
(6)

$$\mathbf{R} = \mathbf{E} \{ \mathbf{z}(t) \mathbf{z}^{\mathbf{A}}(t) \} = \mathbf{A} \mathbf{R}_{\mathbf{A}} \mathbf{A}^{\mathbf{A}} + \sigma^{2} \mathbf{I}$$
(6)

式中,"E"代表求均值,"H"代表复共轭转置,  $R_t = E\{s(t)s^H\}$ (t)}是空间信号协方差矩阵。

设 ヘ≥ヘ≥~…≥ ヘ≥ ヘ+1=…=σ2是协方差矩阵 R 的特征 值,e1,e2,…,ek,ek+1,…,e2L2是与之对应的特征向量,其中与 K 个最大的特征值对应的特征向量构成信号子空间,E,= [e1,e2,…,e4],其余的特征向量构成噪声子空间。信号子空间 和噪声子空间是正交的,且 E, 与 A 具有相同的列空间。因 此,必然存在唯一的非奇异变换矩阵 T 满足 E,=AT。

同理,  $\mathcal{U}_{\lambda} \ge \lambda_{2} \ge \cdots \ge \lambda_{2} \ge \lambda_{+1} = \cdots = \sigma^{2}$ 是协方差矩阵 R 的特征值, $e'_1$ , $e'_2$ ,…, $e'_h$ , $e'_{h+1}$ ,…, $e'_{2L^2}$ 是与之对应的特征向量,

· 162 ·

同样有 Ê,=[e,,e,,…,e,]=AT。

因此,信号频率 ω,可以这样计算:按照由 A 构成 Â 的形 式将 Ê,划分成两个分块矩阵:

$$\widetilde{\mathbf{E}}_{,} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\bullet \mathbf{1}} \\ \mathbf{E}_{\bullet \mathbf{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \mathbf{T} \\ \mathbf{A} \Phi_{\bullet} \mathbf{T} \end{bmatrix}$$
(7)

而  $E_{-2} = E_{-1} \Psi_{-}$ ,其中  $\Psi_{-} = T^{-1} \Phi_{-} T$ ,可见,只要能够求出  $\Psi_{-}$  的特征值,就得到了  $\Phi_{-}$  的对角元素,因此可以得到各个  $\omega_{+}$  的值。

通过同样的方法可以得到其它各个参数的估计值。最后, 可以归纳出频率、二维到达角和极化的联合估计方法的具体 步骤如下:

1) 协方差矩阵估计:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \tilde{\mathbf{z}}(t_n) \tilde{\mathbf{z}}^H(t_n)$$
(8)

2) 计算R的特征值分解和对应的特征向量;

3) 根据 MDL(Minimal Description Length)准则估计信 号个数;

4) 用总体最小二乘(TLS)法计算各个特征值;

- 5) 根据特征值配对原则进行特征值之间的配对;
- 6) 计算最终的参数估计值。

#### 3 并行算法



图2 粗粒度并行多参量联合估计算法

针对频率、二维到达角和极化的联合估计方法的特点,本 文设计了如图2所示的粗粒度并行算法,粗粒度并行算法是对 参数估计所需计算进行粗粒度的划分。并行机的每个处理器 具有自己的内存,处理器之间通过高速总线或交换机连接,因此,存在通信性能与计算性能不平衡的问题,若对每一个运算均进行并行处理,即细粒度的划分,则可能消耗大量的通讯时间,而抵消掉并行计算所节省的时间,因此只能扩大问题划分的粒度,采用图2的粗粒度划分方式,对联合估计的每一个步骤进行并行处理。

根据表面-容积效应,我们提高参量估计算法的划分粒 度,用粗粒度的划分方法来提高算法的效率。粗粒度并行参量 估计算法按整个处理过程来划分任务,每个处理节点分得相 同的已知数据,完成整个参量估计过程,因此所有的处理过程 均可并行地完成。由于每个处理器独立地计算,因而避免了节 点间的通信时间,提高了并行效率。

分析多参量联合估计算法,主要包括矩阵乘法、特征值和 特征向量的求解、矩阵求逆和矩阵转置等运算过程。其中矩阵 乘法、特征值和特征向量的求解占用了80%的运算时间,因此 特征值和特征向量的求解是并行化的主要任务。

对于特征值和特征向量的求解,过去通常使用的雅可比 (Jacobi)迭代方法在并行计算时通信量大、效率不高,本文给 出的并行块消去迭代算法特别适合于并行计算,可以充分发 挥并行计算机的潜力。

对于矩阵特征值问题

 $A x = \lambda x$ 

其中 A 是 n×n 的矩阵,λ是特征值,x 是对应的特征向量。并 行块消去迭代算法表示如下:

1) 划分 A 为块矩阵:

 $A = (A_{ij}), i, j = 1, 2, \cdots, s$ (10)

假定n可以被s整除,Aij都是n/s阶的方阵;

2)按照一定次序进行消去迭代,例如以分块数 s=8,处 理器个数为4时,并行计算的7次并行变换为:

1(1,2)(3,4)(5,6)(7,8)	
2(1,3)(2,4)(5,7)(6,8)	
3(1,4)(2,3)(5,8)(6,7)	
4(1,5)(2,6)(3,7)(4,8)	(11)
5(1,6)(2,5)(3,8)(4,7)	
6(1,7)(2,8)(3,5)(4,6)	
7(1,8)(2,7)(3,6)(4,5)	

其中(i, j)表示采用常规的 QR 方法解决子问题,子问题的矩阵由 A<sub>ii</sub>,A<sub>ij</sub>,A<sub>j</sub>,A<sub>j</sub>,A<sub>j</sub>,道成。计算的结果是 A<sub>ij</sub>,A<sub>j</sub>,化为零,A<sub>ii</sub>, A<sub>j</sub>,化为对角矩阵。

3)计算误差	
$off(\mathbf{A}) = \sum_{i \neq j} \ A_{ij}\ ^2$	(12)
I develop by the second	

其中范数定义为:

$$\|\mathbf{A}\|^{2} = \sum_{i,j} |a_{ij}|^{2}$$
(13)

如果 off(A)≤δ则停止迭代;否则,继续迭代直到满足给定的精度控制参数δ。

根据上述算法过程,每次变换的运算量如下:解子问题40  $(n/s)^3$ ,矩阵乘积4 $(s-2)(n/s)^3$ ,特征向量累积2 $n^3/s$ 。一次扫描有s(s-1)/2次,因此一次扫描的运算量为2 $s(s-1)(16+2s+s^2)n^3/s^3$ (FLOP)。通常用四次扫描可以使计算达到很高的精度,以s=4,9,16为例,算法的工作量分别相当于 QR 算法的9.6,9.8和10.6倍。可见,该算法不是一个好的串行算法,但是一个好的并行算法,特别适合于并行实现。

• 163 •

#### 4 计算机模拟

我们采用以太网连接的网络并行计算环境进行了多参量 的并行联合估计,整个并行计算环境的系统参数:

- ·机型:PC兼容机和 SUN SPARC20工作站
- •网络:10Mbps 以太网

•操作系统:LINUX 和 SUN Solaris

### ·并行环境:PVM3.3.11

设单个信号为 S<sub>k</sub>(t) = (100, 30°, 20°, 45°, 5°), 信噪比 SNR 从0dB 开始每增加2dB 作200次 Monte Carlo 实验,图3 所示是快拍次数 N 为100时各参量的标准差和偏差随 SNR 的变化曲线。



在计算过程中,处理机台数为4台和8台,程序执行结果如 表1。

AI 多多重联合估计开行并否则数值则试结本			
处理器数量	计算时间(秒)	加速比	效率
1	25	1	100%
2	19	1.32	66 %
4	11	2. 27	57%
8	7	3.57	45%

**事时人从从长行行从数位测试体系** 

从上表可以看出,采用4台处理机和8台处理机使运行时 间减少1倍以上,可以达到联合估计的实时性要求。

在粗粒度并行算法中,每个节点完成不同的参量估计,随 着节点数 p 的增加,即问题的规模增加,因此可用 Gustafson 定律来分析加速比和效率。由 Gustafson 定律,加速比为:

$$S = \frac{W_{.+} + pW_{.}}{W_{.+} + W_{.}} = (f + p(1 - f))/(1 + \frac{W_{.}}{W})$$
(14)  
其中 p 为并行系统中处理器的个数,Ws 为算法中的串行计算

分量, $W_p$ 为可并行计算分量( $W_s + W_p = W$ ), $W_s$ 为并行处理 的额外开销;f为串行分量在总计算量中的比例( $f = W_s/W$ ), 1-f 为并行分量的比例。由于在该算法中串行计算分量为0,因 此(14)式可改写为

$S = p/(1+p \frac{W_{\bullet}}{W})$	(15)
并行效率为:	

(上接第178页)

的权力限制在一个最小的范围,同时又不影响系统使用。这样 大大降低了系统被攻破后可能产生的危害,提高了系统的安 全性,且结果也基本符合 B2级的最小特权要求。

参考文献

- 1 Department of Defense, America. TRUSTD COMPUTER SYS-TEM EVALUATION CRITERIA CSC-STD-001-83. 15 Aug. 1983
- 2 Chuang Shaw-Cheng, Wernick' P. A Gredibility-based Model of

$$\mathbf{E} = \frac{S}{P} = 1/(1+P\frac{W_e}{W}) \tag{16}$$

从(15)式与(16)式可以看出,虽然问题的出发点不同但 影响结果的因素都是相同的,即并行开销,因此减小并行开销 W.,是提高并行效率的关键所在。

结语 经过以上并行模拟计算分析,可以看出本文提出 的频率、二维到达角和极化的联合估计并行算法,不仅有较高 的并行加速比和并行效率,而且计算时间也远小于相应的串 行估计方法,将是今后无线电波联合估计时的一种有效而可 行的方法。

## 参考文献

- 1 Li J. Two-dimensional Angle and polarization estimation using ES-PRIT Algorithm. IEEE Trans. on AP, 1992, 40(5), 550~555
- 2 Hua Y. A pencil-MUSIC algorithm for finding two-dimensional angles and polarizations using crossed-dipoles. IEEE Trans. on AP, 1993, 41(3): 370~375
- 3 王建英,陈天麒、频率、二维到达角和极化联合估计。电子学报, 1999.27(11).74~76
- 4 林洪. PVM 与网络并行计算.小型微型计算机系统, 1995, 16(2): 53~58
- 5 王建英,陈天麒,用四阶累积量实现频率、二维到达角和极化的联 合估计,中国科学(E辑),2000,5:424~429

Computer System Security. In: Proc. of the UCLA conf. on New Security Paradigms Workshops, 1996

- 3 Aslam T. A Taxonomy of Security Faults in The UNIX Operating System: [thesis for master degree]. Purdue university, 1995
- Ferraiolo D F, Cuginiand J, Kuhn D R. Role Based Access Control Features and Motivations. In Proc. of the 11th Annual Conf. on Computer Security Applications, 1995
- IEEE. IEEE POSIX. 1e Draft Standard for Information Technology: Portable Operating System Interface (POSIX): Protection, Audit, and Control Interface. IEEE Computer Society Press
- 6 陈爱民,于康友,管海民,等. 计算机的安全与保密. 电子工业出 **版社**,1992

164 •