

文章编号: 1005-3026(2005) 12-1141-04

一种快速二维到来方向估计算法

刘福来¹, 白占立², 汪晋宽¹, 于戈¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 河北师范大学, 河北 石家庄 050031)

摘 要: 讨论了无线网络通信中多径窄带信号的二维到来方向估计算法的特点和性能, 提出了一种基于双平行线阵列结构的二维到来方向估计的快速算法. 与以前的工作相比, 该算法在求解过程中只需要对较小维数的数据矩阵进行特征值分解, 具有较低的计算复杂性, 并且能够解决具有相近的方位角或仰角的入射波束问题. 该算法利用特征值估计二维到来方向, 利用特征向量的对应关系解决二维到来方向的配对问题. 仿真试验表明提出的算法具有较小的估计误差, 对信噪比的变化具有更好的鲁棒性等优点.

关 键 词: 到来方向; 方位角; 仰角; 特征值分解; 信噪比

中图分类号: TN 911.7 **文献标识码:** A

到来方向估计已经成为智能天线、雷达、声纳等领域中的研究热点. 文献[1~3]提出的是一维到来方向(波达方向)估计, 在雷达、声纳中信源定位需要确定二维到来方向(仰角和方位角, 通常简称为2-D DOA). 如今已有大量2-D DOA估计算法, 这些算法主要有两类: 一类是基于MUSIC方法的谱峰搜索方法^[4~6], 该类算法需要很大的计算量; 另一类是ESPRIT类算法^[7~11], 该类算法利用特征值直接求解到来方向, 相对于MUSIC类算法, 在一定程度上降低了算法的计算复杂性. 文献[8]中提出了一种基于L型阵列的2-D DOA估计方法, 该算法估计性能优于其他算法, 它利用阵列结构的特点形成了多个相关矩阵, 然后构造了一个特殊的高维矩阵来进行参数估计. 此算法在处理过程中需要对4M维矩阵进行特征值分解, 存在着计算费时、计算复杂性高和估计偏差较大等缺点. 本文提出的快速算法, 只需要对3M维矩阵进行特征值分解, 有效地降低了算法的复杂性, 提高了算法的估计精度, 增强了算法的鲁棒性.

1 数据模型

考虑如图1所示的双平行线阵列结构, 阵元间距为d, 第一个均匀线阵(ULA)由(M+1)个阵元组成, 第二个ULA由M个阵元组成. 假设

位于远场的具有相同波长的Q个统计独立的窄带信号从二维方向 $\{(\varphi_k, \theta_k), k=1, \dots, Q\}$ 入射到阵列, 其中 φ_k, θ_k 分别代表方位角和仰角. 为处理方便, 分别用图1中所示的 α_k, β_k 代替 φ_k, θ_k , 其中, $\cos \alpha_k = \sin \varphi_k \cdot \cos \theta_k$; $\cos \beta_k = \sin \varphi_k \cdot \sin \theta_k$. 从双平行线结构中构造3个子阵, 其中第一个ULA的前M个阵元和后M个阵元分别组成子阵1和2, 第二个ULA构成第三个子阵3, 分别用 $X(t), Y(t)$ 和 $Z(t)$ 表示子阵1, 2和3在t时刻的观测信号向量, 子阵列1, 2和3输出的噪声分别为 $n_x(t), n_y(t), n_z(t)$, 假设它们为零均值的方差为 σ^2 统计独立的高斯白噪声, 且与信号不相关; 假设信号数目 $Q < M$. 则 $X(t), Y(t)$ 和 $Z(t)$ 可以写为

$$\left. \begin{aligned} X(t) &= A s(t) + n_x(t) \\ Y(t) &= A \Theta s(t) + n_y(t) \\ Z(t) &= A \Phi s(t) + n_z(t) \end{aligned} \right\}. \tag{1}$$

上式中的矩阵和向量具有下面的形式:

$$\begin{aligned} X(t) &= [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T; \\ Y(t) &= [y_1(t), \dots, y_M(t)]^T; \\ Z(t) &= [z_1(t), \dots, z_M(t)]^T; \\ s(t) &= [s_1(t), \dots, s_Q(t)]^T; \\ n_k(t) &= [n_{k,1}(t), \dots, n_{k,M}(t)]^T, k=1, 2, 3; \\ A &= [a(\alpha_1), \dots, a(\alpha_Q)]^T, \end{aligned}$$

$\mathbf{a}(\alpha_k) = [1, \vartheta_k, \dots, \vartheta_k^{M-1}]^T, k = 1, \dots, Q;$
 $\Theta = \text{diag}(\vartheta_1, \dots, \vartheta_Q),$
 $\vartheta_k = \exp\{-j2\pi(d/\lambda)\cos\alpha_k\};$
 $\Phi = \text{diag}(\phi_1, \dots, \phi_Q),$
 $\phi_k = \exp\{-j2\pi(d/\lambda)\cos\beta_k\}, k = 1, \dots, Q.$
 $x_i(t)$ 为子阵 1 中第 i 个阵元的输出; $y_i(t)$ 为子阵 2 中第 i 个阵元的输出; $z_i(t)$ 为子阵 3 中第 i 个阵元的输出; $s_i(t)$ 为第 i 个窄带信号复包络; $n_{k,i}(t)$ 为子阵 k 中第 i 个阵元上的噪声; $(\cdot)^T$ 表示矩阵转置。

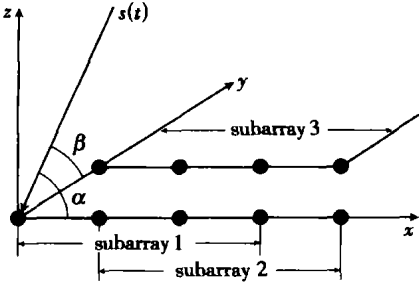


图 1 阵列结构
Fig. 1 Array allocation

2 算法描述

利用数据 (1), 可以得到下列数据矩阵:
 $R_{XX} = E\{X(t)X^H(t)\} = AR_sA^H + \sigma^2I_M;$
 $R_{XY} = E\{X(t)Y^H(t)\} = AR_s\Theta^HA^H + \sigma^2J;$
 $R_{XZ} = E\{X(t)Z^H(t)\} = AR_s\Phi^HA^H;$
 $R_{YY} = E\{Y(t)Y^H(t)\} = A\Theta R_s\Theta^HA^H + \sigma^2I_M;$
 $R_{YZ} = E\{Y(t)Z^H(t)\} = A\Theta R_s\Phi^HA^H;$
 $R_{ZZ} = E\{Z(t)Z^H(t)\} = A\Phi R_s\Phi^HA^H + \sigma^2I_M.$
其中, $R_s = E\{s(t)s^H(t)\}$ 是信源部分的协方差矩阵; $E\{\cdot\}$ 表示均值; I_M 是 M 阶单位矩阵; $J = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I_{M-1} & 0^T \end{bmatrix}$, 0 是 $M-1$ 维零向量; $(\cdot)^H$ 表示矩阵的复共轭转置。

令:

$C_1 = R_{XX} - \sigma^2I_M = AR_sA^H; \tag{2}$ $C_2 = R_{XY} - \sigma^2J = AR_s\Theta^HA^H; \tag{3}$ $C_3 = R_{XZ} = AR_s\Phi^HA^H; \tag{4}$ $C_4 = R_{YY} - \sigma^2I_M = A\Theta R_s\Theta^HA^H; \tag{5}$ $C_5 = R_{YZ} = A\Theta R_s\Phi^HA^H; \tag{6}$ $C_6 = R_{ZZ} - \sigma^2I_M = A\Phi R_s\Phi^HA^H; \tag{7}$

利用式(2)~ 式(7), 构造一个矩阵 C 如下:

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ C_2^H & C_4 & C_5 \\ C_3^H & C_5^H & C_6 \end{bmatrix} = AR_sA^H,$$

其中, $A^T = [A^T \ (A\Theta)^T \ (A\Phi)^T]$.
如果 Q 个信号源在到来方向 α, β 不同时接

近, 则有 $\text{rank}(A) = Q$. 根据文献[12], 可以对矩阵 C 进行特征值分解得到信号子空间 E_s , 并且存在惟一的一个可逆矩阵 T 满足下列关系:

$$E_s = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A\Theta \\ A\Phi \end{bmatrix} T = AT. \tag{8}$$

这里, E_1, E_2, E_3 的维数分别等于矩阵 $A, A\Theta, A\Phi$ 的维数。

从式(8)可以得到:

$$E_1 = AT, E_2 = A\Theta T, E_3 = A\Phi T. \tag{9}$$

利用矩阵 Φ, Θ 和 T , 定义两个矩阵如下:

$$\Psi_1 = T^{-1}\Theta T, \Psi_2 = T^{-1}\Phi T. \tag{10}$$

那么通过公式(9), E_2 和 E_3 可以整理为:

$$E_2 = ATT^{-1}\Theta T = E_1\Psi_1 \Rightarrow \Psi_1 = E_1^{-1}E_2; \tag{11}$$
$$E_3 = ATT^{-1}\Phi T = E_1\Psi_2 \Rightarrow \Psi_2 = E_1^{-1}E_3. \tag{12}$$

这里, $E_1^{-1} = (E_1^HE_1)^H E_1^H$. 由定义(10) 知道矩阵 Ψ_1 和 Ψ_2 的特征值分别等于对角矩阵 Θ 和 Φ 的特征值, 并且矩阵 T 的列向量是矩阵 Ψ_1 和 Ψ_2 的特征向量, 这就意味着对角矩阵 Θ 和 Φ 的特征值可以通过对 $E_1^{-1}E_2$ 和 $E_1^{-1}E_3$ 特征值分解得到. 对 $E_1^{-1}E_2$ 和 $E_1^{-1}E_3$ 进行特征值分解之后可以得到:

$$E_1^{-1}E_2 = T_1\Theta T_1^{-1}, E_1^{-1}E_3 = T_2\Phi T_2^{-1}.$$

这里, T_1 和 T_2 是由矩阵 T 的列组成的. 通过比较特征向量矩阵 T_1 和 T_2 的列向量可以决定 2-D DOA (α_k, β_k) 的配对问题[6].

综上所述, 算法步骤总结如下:

- 1 计算数据矩阵 $\hat{R}_{XX}, \hat{R}_{XY}, \hat{R}_{XZ}, \hat{R}_{YY}, \hat{R}_{YZ}, \hat{R}_{ZZ};$
- ④ 计算 \hat{R}_{XX} 的特征值分解, 估计噪声功率 σ^2 , 记为 $\sigma^2;$
- ④ 按照式(2)~ 式(7) 计算数据矩阵 $\hat{C}_1 \dots \hat{C}_6;$
- ¼ 利用 $\hat{C}_1 \dots \hat{C}_6$ 形成矩阵 \hat{C} , 计算 \hat{C} 的特征值分解, 估计信号子空间 $\hat{E}_s;$
- ½ 通过式(11)和式(12), 计算 $\hat{\Psi}_1$ 和 $\hat{\Psi}_2;$
- ¾ 计算 $\hat{\Psi}_1$ 和 $\hat{\Psi}_2$ 的特征值分解, 估计 $\hat{\Theta}, \hat{T}_1$ 和 $\hat{\Phi}, \hat{T}_2;$
- ⑧ 比较 \hat{T}_1 和 \hat{T}_2 的列向量, 完成矩阵 $\hat{\Theta}$ 和 $\hat{\Phi}$ 对角元素的配对, 即完成 2-D DOA 的配对.

在表 1 中比较了提出的算法和以前一些算法

的计算复杂性, 其中 M 在文献[6] 中是位于 u 轴的阵元数目, 在文献[7] 中是位于 Z 子阵的阵元数目, 在文献[8] 中是位于 y 轴的阵元数目. Q 是信号数目, N 是采样快拍数目.

表 1 几种算法的计算复杂性比较	
Table 1 Comparison of several algorithms	
算 法	计算复杂性
文献[6]	$O(M^6)$
文献[7]	$O(3MNQ)$
文献[8]	$O((4M)^3)$
提出的算法	$O((3M)^3)$

3 仿真试验结果

采用图 1 所示的天线阵列, 阵元间距取半波长, 假设 2 个窄带信号分别以二维到来方向(10° , 30°) 和(15° , 20°) 入射到天线阵列, 快拍数 $N = 300$, 每个子阵的阵元数 $M = 4$.

这里均方根误差定义为:

$$\sqrt{E\{(\hat{y}_k - y_k)^2 + (\hat{\varphi}_k - \varphi_k)^2\}}, k = 1, 2.$$

通过 500 次独立试验, 得到了图 2 和图 3 的参数估计误差随信噪比变化的曲线.

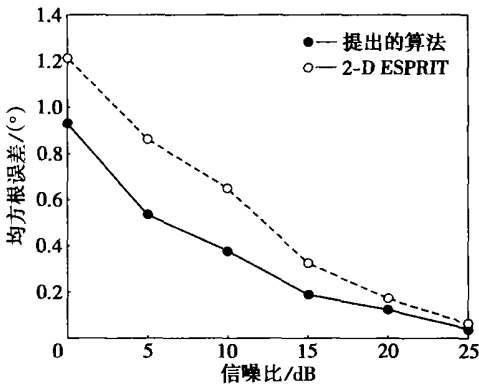


图 2 第一个信号 2-D DOA 估计的均方根误差
Fig. 2 RMSE of 2-D DOA estimation on from the first source

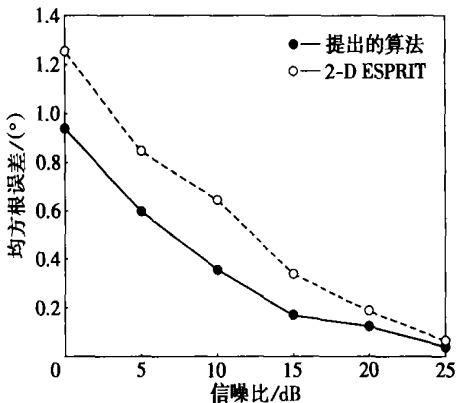


图 3 第二个信号 2-DDOA 估计的均方根误差
Fig. 3 RMSE of 2-D DOA estimation on from the second source

图 2 和图 3 中的虚线分别是 2-D ESPRIT 算法[8] 在信噪比从 0 dB 变化到 25 dB 时估计第一个和第二个信号源的 2-D DOA 的均方根误差曲线; 实线是本文提出的算法对第一个和第二个信号源估计的情况. 可以看出, 新算法的估计精度比文献[8] 中的 2-D ESPRIT 方法的估计精度高.

4 结 语

在高斯白噪声的情况下, 利用双平行线阵列, 构造了一个较低维数的求解矩阵, 使得算法具有较低的复杂性. 理论分析和仿真试验表明了所提算法的有效性; 同时此算法能够解决角度兼并问题, 即方位角或者仰角接近的问题, 另外也解决了估计参数的配对问题.

参考文献:

[1] 汪晋宽, 刘志刚, 薛延波, 等. 4 阶量算法在盲波束形成上的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(9): 900- 902.
(Wang J K, Liu Z G, Xue Y B, et al. Applications of fourth-order cumulant algorithm to blind beamforming[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2003, 24(9): 900- 902.)

[2] 汪晋宽, 薛延波, 刘志刚, 等. DOA 估计方法探讨[J]. 控制与决策, 2003, 18(3): 57- 59.
(Wang J K, Xue Y B, Liu Z G, et al. Study on DOA estimation methods[J]. Control and Decision, 2003, 18(3): 57- 79.)

[3] 刘福来, 汪晋宽, 于戈. OS-ESPRIT 算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2004, 25(11): 1058- 1060.
(Liu F L, Wang J K, Yu G. OS-ESPRIT algorithm[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2004, 25(11): 1058- 1060.)

[4] Chen Y M, Lee J H, Yeh C C. Two-dimensional angle-of-arrival estimation for uniform planar arrays with sensor position errors[J]. IEE Proceedings F, 1993, 140(1): 37- 42.

[5] Chen Y M, Lee J H, Yeh C C. Estimating two-dimensional angles of arrival in coherent source environment[J]. IEEE Trans on Acoust, Speech, Signal Process, 1989, 37(1): 153- 155.

[6] Chen Y H, Lian Y T. 2-D multitarget angle tracking algorithm using sensor array[J]. IEE Proc Radar, Sonar, Navig, 1995, 142(4): 158- 161.

[7] Wu Y T, Liao G S, So H C. A fast algorithm for 2-D direction-of-arrival estimation[J]. Signal Processing, 2003, 83(8): 1827- 1831.

[8] 董轶, 吴云韬, 廖桂生. 一种二维到来方向估计的 ESPRIT 新方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2003, 30(5): 569- 573.
(Dong Y, Wu Y T, Liao G S. A novel method for estimating 2-D DOA[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2003, 30(5): 569- 573.)

[9] Kuroda T, Kikuma N, Inagaki N. DOA estimation and pairing method in 2D ESPRIT using triangular antenna array[J]. Electronics and Communications in Japan, 2003, 86(6): 1505- 1513.

[10] van der Veen A J, Ober P B, Deprettere E F. Azimuth and elevation resolution in high resolution DOA estimation[J]. IEE Trans on Signal Processing, 1992, 40(7): 1828 -

1832.

[11] Hua Y B, Sarkar T K, Weiner D D. An L-shaped array for estimating 2-D directions of wave arrival[J]. *IEEE Trans on Antenna Propagation*, 1991,39(2): 143- 146.

[12] Richard R. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques [J]. *IEEE Trans on Acoustics and Signal Processing*, 1989,37(7): 984- 995.

Fast Algorithm for 2-D DOA Estimation

LIU Fu-lai¹, BAI Zhan-li², WANG Jin-kuan¹, YU Ge¹
(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Hebei Normal University, Shijiazhuang 050031, China. Correspondent: LIU Fu-lai, E-mail: fulailiu@126.com)

Abstract: Proposes a fast algorithm for two-dimensional (2-D) direction-of-arrival (DOA) estimation of multipath narrow-band sources impinging on the far field of a twin parallel uniform linear array (ULA), analyzing the features and performance of the 2-D DOA estimation algorithms in wireless network communication environment. Compared with the previous work, the proposed algorithm requires a lower computational complexity because the relevant eigenvalue decomposition needed is just for smaller size matrices, and it is available to get the incident beams to which the different azimuth or elevation angles are close with each other. It utilizes the eigenvalues to estimate 2-D DOAs and their corresponding eigenvectors to solve the pairing problem of the estimated 2-D DOAs. Simulation results showed the effectiveness of the proposed algorithm, such as smaller estimation error and higher robustness to SNR.
Key words: DOA(direction of arrival); azimuth angle; elevation angle; eigenvalue decomposition; SNR(signal-to-noise ratio)
(Received December 10, 2004)

待发表文章
摘要 预 报

NGI 中一种基于粒子群优化的 QoS 单播路由算法

王兴伟, 王军伟, 吴铁艳, 黄 敏

针对满足多个约束条件的服务质量 QoS(Quality of Service)单播路由的特点,提出了一种下一代互联网 NGI(Next Generation Internet)中基于粒子群优化 PSO(Particle Swarm Optimization)的 QoS 路由算法.给出了 QoS 单播路由问题模型及其数学描述,对所考虑的带宽、延迟、延迟抖动和出错率等 QoS 参数进行模糊处理,在此基础上基于 PSO 算法进行路径寻优,并在多个实际的和虚拟的网络拓扑上进行了仿真实验与性能评价.仿真结果表明,提出的算法是可行和有效的.

基于移动代理的分层式网络管理模型

郑洪方, 国 峰, 袁增强, 王光兴

针对传统 SNMP 集中式网络管理的不足,提出了一种基于移动代理的分层式网络管理模型.模型在网络管理中融入移动代理技术,提出了移动中层管理站的概念,解决了传统网络管理中资源占用和动态扩展性差的问题,提高了网络管理的效率.详细阐述了模型系统的构成,并与传统的 SNMP 网络管理进行比较,得出了其具备带宽占用小,灵活性高的特点.最后通过仿真模拟比较两种网络管理的工作过程,结果验证了模型的优越性.

子带分解在 ESPRIT 算法中的应用

薛延波, 汪晋宽, 刘志刚

ESPRIT 算法是一种用于信号到来角(DOA)估计的直接求解方法,其性能在低信噪比(SNR)和信号相关时会严重削弱.基于此提出了一种多分辨率 DOA 估计算法——基于子带分解的 ESPRIT 算法(SB-ESPRIT),通过对全带信号进行子带分解,并对每个子节点分别应用 ESPRIT 算法,最后通过映射算法将估计所得的 DOA 映射到全带信号.对于子带分解后旋转不变性的证明为其应用提供了理论依据.仿真结果证明,SB-ESPRIT 不仅提高了特征子空间方法的分辨率,而且在子带划分适当的情况下,具有一定的信号去相关能力,并且其均方误差(RMSE)小于 ESPRIT 算法.

矿体阶段开采顺序的选择及数值模拟

李元辉, 刘 炜, 解世俊

利用 2D-σ 程序对深部矿体不同开采顺序的应力场和位移场进行数值模拟.研究结果表明,采用上行式阶段开采顺序,采场顶板破坏度、位移值和垂直方向应力值均小于下行式开采,在矿床开采末期,地表的沉陷范围及各阶段顶板和边帮的位移均小于下行式开采.因此,采用上行式阶段开采顺序有利于改善采场的稳定性及减轻或避免深部硬岩开采诱发的岩爆灾害,从回采工艺过程方面分析,更有利于实现矿山的无废开采,具有显著的经济效益和社会价值.