

文章编号: 1000 - 582X(2003)02 - 0036 - 03

# 基于智能天线 DOA 估计方法

张毅<sup>1,2</sup>, 汪纪锋<sup>2</sup>, 罗元<sup>2</sup>

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 南京 210096; 2. 重庆邮电学院自动化学院, 重庆 400065)

**摘要:** 主要研究了基于智能天线的几种 DOA 估计方法, 即旋转不变信号参数估计 (ESPRIT) 算法、多重信号分类 (MUSIC) 算法、加权子空间拟合 (WSF) 算法、最小范数 (Min - norm) 算法等。第三代移动通信已将智能天线技术作为其关键技术之一。通过理论和仿真实验相结合, 将各算法与克拉美 - 罗限 (Cramer - Rao Bound) 比较, 分析了基于智能天线 DOA 估计方法的性能。研究结果不仅有利于智能天线的研究与开发, 而且有利于智能天线在移动通信中的应用。

**关键词:** 智能天线; 来波方向; 克拉美 - 罗限

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

近年来, 由于移动通信业的迅猛发展, 关于智能天线的研究越来越成为移动通信的研究热点, 智能天线是采用数字信号处理技术识别用户信号到达方向, 并在此方向形成天线主波束。智能天线根据用户信号的不同空间传播方向提供不同的空间信道, 等同于信号有线传输的线缆, 有效地克服了干扰对系统的影响<sup>[1-2]</sup>。

智能天线的基本原理是天线接收的信号下变换、模/数变换, 进入专用的数字调谐器, 下变换为窄带信道的零中频 (IF) 复包络信号, 窄带信号经波束形成器处理后, 计算出所需要的信号到达角度, 完成信号的合成。发送信号则可利用接收方向得到的参数, 进行与上述相反的处理过程。

第三代移动通信已将智能天线技术作为其关键技术之一, 国内外不少学者围绕该热门技术, 提出了不少关于 DOA 的新算法。目前用于基于智能天线的 DOA 算法主要有: 旋转不变信号参数估计 (ESPRIT) 算法、多重信号分类 (MUSIC) 算法、加权子空间拟合 (WSF) 算法、最小范数 (Min - norm) 算法等<sup>[3-4]</sup>。

## 1 接收信号处理模型

各类算法研究的自适应天线一般为中心对称型天线阵。假设各阵元为具有各向同性的天线,  $M$  个阵元间距  $d$ , 假设有从不同方向  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k$  的  $k$  个中心频率为  $\omega_0$  的窄带信号入射到天线阵上, 阵列接收到的信

号的复包络可表示为

$$x(t) = \sum_{j=1}^k a(\phi_j) S_j(t) + n(t) \quad (1)$$

其中  $x(t) = [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T$ ,  $n(t)$  为阵列接收到的噪声矢量,  $a(\phi_j)$  为阵列对方向  $\phi_j$  的导向矢量, 即构成阵列的“阵列因子”, 可由测量数据得到, 若阵为均匀线阵 (ULA), 则其表达式为:

$$a(\phi_j) = [1, e^{-2\pi(d/\lambda)\sin(\phi_j)}, \dots, e^{-2\pi(M-1)(d/\lambda)\sin(\phi_j)}]^T \quad (2)$$

其中  $\lambda$  为来波波长。若对于均匀圆阵 (UCA), 其表达式为:

$$a(\phi_j) = [e^{j2\pi(r/\lambda)\cos(\phi_j - \gamma_0)}, e^{2\pi(r/\lambda)\cos(\phi_j - \gamma_1)}, \dots, e^{2\pi(r/\lambda)\cos(\phi_j - \gamma_{M-1})}]^T \quad (3)$$

其中  $r$  为圆阵圆心到阵元的距离, 即圆阵半径,  $\gamma_i$  为第  $i$  个阵元的方位角。

对阵的输出取  $N_s$  个抽样快拍, 进一步简化阵列接收矢量  $X(t)$  表达式 (1)

$$X = A(\phi)S + N \quad (4)$$

其中  $X$  和  $N$  为  $M \times N_s$  矩阵,  $A(\phi)$  为  $M \times K$  矩阵,

$$X = [x(t_1), \dots, x(t_{N_s})] \quad (5)$$

$$N = [n(t_1), \dots, n(t_{N_s})] \quad (6)$$

$$A(\phi) = [a(\phi_1), a(\phi_2), \dots, a(\phi_k)] \quad (7)$$

$S$  为  $k \times N_s$  矩阵,

$$S = [s(t_1), \dots, s(t_{N_s})] \quad (8)$$

收稿日期: 2002 - 09 - 02

基金项目: 重庆市科委项目 (2001 - 6808)、重庆邮电学院科研基金项目 (A2001 - 38)、重庆市移动通信重点实验室开放课题基金资助。

作者简介: 张毅 (1969 - ), 男, 重庆潼南县人, 博士, 主要从事第三代移动通信无线定位技术和智能天线技术的研究。

对来波的方向估计问题就是从  $N_s$  个阵输出的抽样中估计源的方向  $\phi_1, \dots, \phi_K$ 。

### 2 基于智能天线的主要几种 DOA 估计方法比较分析

基于智能天线 DOA 估计方法主要有：旋转不变信号参数估计 (ESPRIT) 算法、多重信号分类 (MUSIC) 算法、加权子空间拟合 (WSF) 算法、最小范数 (Min - norm) 算法等。针对以上几种方法，并对其估计性能进行分析比较。

高分辨 DOA 估计精度通常与克拉美 - 罗界 (Cramer - Rao Bound) 比较。CRB 是由最大似然估计器得出的。最大似然估计器是最优的方位估计器，可以用来衡量其它算法估计结果的渐近无偏性和有效性，同时也可以比较不同算法的估计性能。

DOA 估计的 CRB 早在 1989 年已由 P.Stoica 和 A. Nehorai 等人详细讨论过，并推导出任何满足下列假设条件的无偏估计器的 CRB，即：接收阵的阵元数  $M$  大于入射信号源个数  $d$ ；各阵元附加噪声为均值是 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声，且阵元间两两互不相关；信号协方差矩阵  $R$  是一个非奇异矩阵 (半正定)。

设  $d$  个人射信号源方位为  $\phi_1 \dots \phi_d$ ，记  $\Theta = [\phi_1, \dots, \phi_d]^T$ 。令  $\hat{\Theta}$  是  $\Theta$  的无偏估计，则  $\hat{\Theta}$  的 CRB 的表达式为：

$$CRB_{\hat{\Theta}} = \frac{\sigma^2}{2} \left| \sum_{i=1}^K \text{Re} X^H(t) D^H (I - A(A^H A)^{-1} A^H) D X(t) \right|^{-1} \tag{9}$$

式中： $(\cdot)^H$  表示求共轭转置； $K$  表示快拍数； $X(t) = \text{diag}[x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]$ ， $x_k(t)$  表示  $t$  时刻第  $k$  个阵元的输出， $D = \begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial \phi_1} & \frac{\partial A}{\partial \phi_2} & \dots & \frac{\partial A}{\partial \phi_d} \end{bmatrix}$ ， $I$  为  $M$  维单位阵； $A = [a(\phi_1), a(\phi_2), \dots, a(\phi_d)]$  为阵列流形。

对于很大的快拍数  $K$ ，CRB 可近似表示为：

$$CRB(\hat{\Theta}) = \frac{\sigma^2}{2K} \{ \text{Re} [ D^H (I - A(A^H A)^{-1} A^H) D \odot R^T ] \}^{-1} \tag{10}$$

其中： $\odot$  表示 Hadamard 积 (直积)；

$$R = E[x(t) \cdot x^H(t)], \\ x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T。$$

为了对各种方法的性能与 CRB 有一个直观的对照，利用统一的仿真模型对 WSF、MUSIC、MiniNorm、ESPRIT 等 DOA 估计方法进行仿真，并对它们的估计精度和分辨率进行比较。

仿真模型为 8 阵元均匀线阵，阵元间隔与入射波长比为 1/2。假设接收噪声为各向同性且阵元间互不相关的高斯白噪声。已知两目标源位于  $3^\circ$  和  $-3^\circ$ ，间隔约为主波束宽度的 1/2。两目标源互不相关，功率相同，初

始相位均设为  $0^\circ$ 。

对每种方法进行 100 次独立运算，每个独立运算中使用 100 次快拍。图 1 给出各种方法估计精度相互比较结果，图 2 为它们的分辨率比较结果。

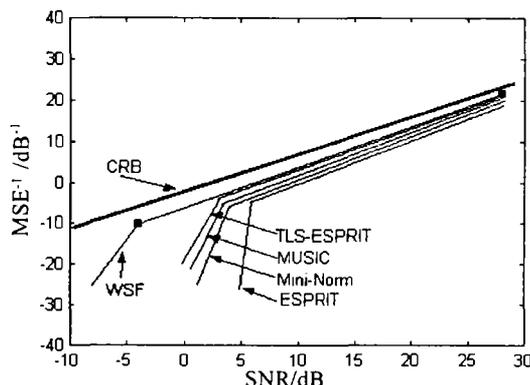


图 1 各种方法估计精度相互比较结果

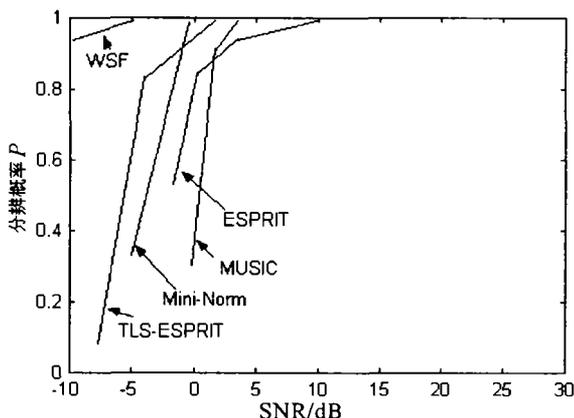


图 2 各种方法分辨率比较结果

从两幅图中可以看到：1) 以上方法在高信噪比下都是无偏估计；2) 以上方法的估计精度由高到低依次为 WSF、MUSIC、MiniNorm、ESPRIT；3) 以上方法的分辨率由高到低依次为 WSF、MiniNorm、ESPRIT、MUSIC。

在工程应用中，实用性是对理论付诸实践的根本要求。要把高分辨定向方法应用于实际的系统中，必须满足以下条件：1) 高分辨方法的估计性能要优于目前所使用的方法性能，并能够相互配合使用，对原方法进行补充和改善；2) 算法简便可靠，中间环节少，运算量小，便于进行实时处理；3) 稳健性强，对阵列误差、环境误差等各种误差因素不敏感；4) 方法的参数设置方便，容错性好；5) 判别方位的准则应简单可靠<sup>[5-6]</sup>。

按照以上要求，并参照图 1、图 2 可以看到，对上述几种典型方法比较结果：1) 从估计精度上比较，WSF 具有比其它方法更高的性能，它们在较低信噪比情况下仍具有很高的估计精度和极小的方差，其次是：MUSIC、MiniNorm，它们的分辨率和估计精度适中，参数设定简单，因此具有较好的应用前景；2) 从分辨率

上看,WSF、MiniNorm 分辨率较高,在较低信噪比情况下仍具有很高的分辨率,其次是 ESPRIT、MUSIC;3) 从计算量上考虑,MiniNorm 和 TLS - ESPRIT 比较突出,仅有其他算法运算量的一半以下,而 WSF 和 JADE 技术都是迭代算法,运算量很大,MUSIC 计算量适中;4) 从参数设置上讲,各种方法对运行参数都有不同程度的依赖,其中 MUSIC 和 MiniNorm 对参数的少量偏差不敏感,而其它方法,尤其是 WSF、ESPRIT、JADE 技术等对所设参数有较高要求,少量的误差会导致算法的失败。

WSF 运算过程中参数设定的影响因素较多,有待进一步解决。5) 从解相干源能力上看,WSF 本身可以解相干,MUSIC、MiniNorm、利用空域平滑技术也可以解决相干源问题。

综合以上分析结果,认为 MUSIC、MiniNorm 更接近实际应用,具有较好的应用前景,而 WSF、JADE 技术等具有较高的理论研究价值,其实用性有待进一步开发和研究。主要几种 DOA 算法性能比较见表 1。

表 1 主要几种 DOA 算法性能比较

算法	采用阵列结构	对来波数的限制	算法复杂度	估计精度	抗多径性能
阵元空间 MUSIC	UCA/ULA	小于阵元数	较简单	较好(好于 ESPRIT)	不能
	ML	UCA/ULA	复杂	好	不能
特征矢量结构	UCA/ULA	小于阵元数	较简单	一般	不能
	TLS - ESPRIT	ULA	较简单	较差	不能
ESPRIT	波束空间 ESPRIT	UCA/ULA	简单	较差	不能
JADE 技术	UCA/ULA	小于阵元数乘以采样数	很复杂	较好	能
	WSF	UCA/ULA	复杂	好	能
最小范数算法	ULA	小于阵元数	简单	较好(小于 MUSIC)	不能

### 3 结论

对基于智能天线的 DOA 估计方法的几种性能进行了比较,其结果表明 MUSIC、MiniNorm 更接近实际应用,具有较好的应用前景,而 WSF、JADE 技术等具有较高的理论研究价值,其实用性有待进一步开发和研究。

#### 参考文献:

- [1] KARASALO I A. high-resolution post-beamforming method based on semidefinite linear optimization [J]. IEEE Trans. Acoust, Speech, Signal Processing, 1990,38:16 - 22.
- [2] THORVALDSEN T. Maximum entropy spectral analysis in antenna spatial filtering[J]. IEEE Trans. Antennas Propagate, 1991, AP

- 28(99):556 - 562.

- [3] MCCLELLAN J H. Multidimensional spectral estimation [J]. Proc. IEEE, 1982,70:1 029 - 1 039.
- [4] LANG S W, MCLELLAN J H. Spectral estimation for sensor arrays. IEEE Trans [J]. Acoust, Speech, Signal Processing, 1983, ASSP - 31:349 - 358.
- [5] NAGATSUKA M, ISHII N, KOHNO R, et al. Adaptive array antenna based on spatial spectral estimation using maximum entropy method[J]. IEICE Trans. Commun., 1994, E77 - B: 624 - 633.
- [6] WAX M, SHAN T J, KAILATH T. Spatio-temporal spectral analysis by eigenstructure methods[J]. IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Processing, 1984, ASSP - 32:817 - 827.

## Estimation Methods for DOA Based on Smart Antenna

ZHANG Yi<sup>1,2</sup>, WANG Ji-feng<sup>2</sup>, LUO Yuan<sup>2</sup>

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Smart antenna is one of the key technique in the third generation mobile telecommunication system. Main estimation methods for DOA (direction of arrival), i. e. ESPRIT, MUSIC, WSF, Mininorm, etc., are researched, the performances for DOA estimation based on smart antenna are analyzed by the research of theory, simulation experiment and the contrast algorithms between and Cramer-Rao Bound. The research results aren't only propitious to research and develop for smart antenna, but also for the application of smart antenna in mobile telecommunication.

**Key words:** smart antenna; direction of arrival; cramer-rao bound

(责任编辑 吕赛英)