

· 学术论文与技术报告 ·

基于盲信号分离的分布式目标 DOA 估计方法*

万 群** 杨万麟

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 在分布函数未知或数学形式不同的分布式目标同时存在的情况下, 研究了一种基于盲信号分离的相干分布式目标一维搜索 DOA 估计方法。仿真实验结果表明, 这种分布式目标 DOA 估计方法具有分布参数门限现象, DOA 估计性能对其他信号源的分布参数不敏感。

关键词 相干分布式目标; 角信号分布; 波达方向估计; 盲信号分离

中图分类号 TN971.2

近十多年来, 波达方向(DOA)估计方法的理论日趋完善, 其理论或算法一般是在点目标信号源模型假设下得到的, 而在实际应用中, 不一定都能满足这个假设。在阵列成像、声纳定位、对流层、电离层无线电传播、低仰角雷达目标跟踪、移动通信等目标信号源具有分布特性的情况下, 从窄带点目标 DOA 估计的角度可知, 由于模型误差的影响, 高分辨 DOA 估计方法如 MLM、MUSIC、ESPRIT 等对信号源的分布特性十分敏感, 导致了估计性能严重恶化。

目前, 针对两种分布式信号源模型, 即相干分布(CD)和非相干分布(ICD)信号源模型已发展了需要多维参数搜索的最大似然、DSPE、DISPARE 和广义 MUSIC 等方法^[1-4]。这些方法都假设参数未知的角功率密度函数或角信号分布函数的数学形式已知并且相同, 如都为高斯分布、均匀分布、拉普拉斯分布等。本文在角信号分布函数的数学形式未知的情况下, 利用不同分布式信号源之间的独立性, 通过盲信号分离方法估计分布式目标 DOA, 不需要进行多维参数搜索, 且适用于不同分布式目标的角信号分布函数形式不同的情况。

1 相干分布式目标信号源模型

假设具有 M 个阵元的均匀线阵, 相邻两个阵元间隔 q 不大于 $1/2$ 波长。 q ($q < M$) 个分布式目标信号从不同的方向 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 到达阵列, t 时刻阵列观测的数据矢量 \mathbf{x}_t 为

$$\mathbf{x}_t = \sum_{i=1}^q s_i(t) \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \mathbf{a}(\theta) g_i(\theta, \mathbf{p}_i) d\theta + \mathbf{n}_t \quad (1)$$

式中 以矢量 \mathbf{p}_i 为未知参数的关于 θ 的确定性函数 $g_i(\theta, \mathbf{p}_i)$ 是第 i 个相干分布式目标的角信号分布函数, 具有单峰; \mathbf{p}_i 的元素包括角信号分布函数的峰值位置参数 θ_i , 即分布式目标 DOA 和分布参数; $\mathbf{a}(\theta) = [1, \exp[-j2\pi(d/\lambda)\sin\theta], \dots, \exp[-j(M-1)2\pi(d/\lambda)\sin\theta]]^T$ 为方向矢量, θ 为波达方向, $[\]^T$ 表示转置; $s_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个分布式目标的信号复振幅; \mathbf{n}_t 为加性噪声。假设信号矢量 $\mathbf{s}_i = [s_{i1}(t), s_{i2}(t), \dots, s_{iq}(t)]^T$ 和噪声矢量 \mathbf{n}_t 是互不相关的零均值随机矢量, 其二阶矩为

$$E[\mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^H] = \mathbf{P} \delta(t, k) \quad E[\mathbf{n}_t \mathbf{n}_t^H] = \sigma_n \mathbf{I}_M \delta(t, k) \quad (2)$$

式中 $\delta(t, k)$ 为 Kronecker δ 函数, $\mathbf{P} = E(\mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^H)$ 为信号协方差矩阵, $[\]^H$ 表示共轭转置, \mathbf{I}_M 为 M 阶单位矩阵, σ_n 为噪声方差。

可将阵列的观测数据式(1)改写为

2000年2月13日收稿

* 国家国防科技重点实验室试点项目

** 男 29岁 博士生

$$\mathbf{x}_i = \sum_{t=1}^q s_i(t) \mathbf{b}_i(\mathbf{p}_i) + \mathbf{n}_i \quad (3)$$

式中 $\mathbf{b}_i(\mathbf{p}_i)$ 定义为广义方向矢量

$$\mathbf{b}_i(\mathbf{p}_i) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \mathbf{a}(\theta) g_i(\theta, \mathbf{p}_i) d\theta \quad (4)$$

由式(2)和式(3)可得观测数据矢量的协方差矩阵为 $\mathbf{R} = E(\mathbf{x}\mathbf{x}^H) = \mathbf{B}\mathbf{P}\mathbf{B}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_M$, 其中 $\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1(\mathbf{p}_1), \mathbf{b}_2(\mathbf{p}_2), \dots, \mathbf{b}_q(\mathbf{p}_q)]$ 。其特征值分解为

$$\mathbf{R} = \mathbf{B}\mathbf{P}\mathbf{B}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_M = \mathbf{U}_s \Lambda_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \Lambda_n \mathbf{U}_n^H \quad (5)$$

式中 q 阶对角矩阵 $\Lambda_s = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_q^2)$, $M-q$ 阶对角矩阵 $\Lambda_n = \text{diag}(\sigma_n^2, \sigma_n^2, \dots, \sigma_n^2)$, 特征值由大到小排列为 $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_q^2, \sigma_n^2$, \mathbf{U}_s 和 \mathbf{U}_n 的列矢量分别由 $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_q^2$ 和 σ_n^2 对应的特征矢量构成。用 \mathbf{U}_n^H 和 \mathbf{U}_n 分别左乘和右乘式(5)第2个等号的两边, 可得 $\mathbf{U}_n^H \mathbf{B}\mathbf{P}\mathbf{B}^H \mathbf{U}_n = 0$ 。假设信号源的协方差矩阵 \mathbf{P} 非奇异, 即不同的分布式目标信号源不完全相干, 则有 $\mathbf{U}_n^H \mathbf{b}_i(\mathbf{p}_i) = 0$, $i = 1, 2, 3, \dots, q$ 。于是, 分布式目标条件下的 MUSIC 型空间谱估计为 $f(\mathbf{p}) = [\mathbf{b}_i^H(\mathbf{p}) \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{b}_i(\mathbf{p})]^{-1}$ 。

假设参数矢量 \mathbf{p}_i 包括两个元素: 一个是角信号分布函数的峰值位置参数, 即分布式目标 DOA; 另一个是描述角信号分布宽窄的分布参数^[4,5]。由式(5)可知, 广义方向矢量 $\mathbf{b}_i(\mathbf{p}_i)$ 也由这两个参数决定。在各个分布式目标的角信号分布函数 $g_i(\theta, \mathbf{p}_i)$ 的数学形式已知而且相同的条件下, 由 MUSIC 型空间谱估计, 通过二维参数谱峰搜索, 可以得到分布式目标 DOA 估计。实际上一般无法预先确定角信号分布的数学形式, 且不同分布式目标的角信号分布函数的数学形式可能不同。因此, 应先估计角信号分布函数 $g_i(\theta, \mathbf{p}_i)$, 再由其峰值位置估计分布式目标 DOA。

2 基于盲信号分离的分布式目标 DOA 估计方法

基于四阶矩的盲信号分离分两步完成, 第一步为白化, 第二步为对角化。由式(5)可得

$$\mathbf{B}\mathbf{P}\mathbf{B}^H = \mathbf{U}_s (\Lambda_s - \sigma_n^2 \mathbf{I}_q) \mathbf{U}_s^H = \mathbf{U}_s \Lambda \mathbf{U}_s^H \quad (6)$$

式中 $\Lambda = \Lambda_s - \sigma_n^2 \mathbf{I}_q$, \mathbf{I}_q 为 q 阶单位矩阵。重新构造一组新的 q 阶数据矢量 \mathbf{y}_i 为

$$\mathbf{y}_i = \Lambda^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U}_s^H \mathbf{x}_i = \sum_{t=1}^q s_i(t) \Lambda^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U}_s^H \mathbf{b}_i(\mathbf{p}_i) + \Lambda^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U}_s^H \mathbf{n}_i \quad (7)$$

暂不考虑噪声, 由式(6)和式(7)可得 \mathbf{y}_i 的协方差矩阵为 $E(\mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^H) = \Lambda^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U}_s^H \mathbf{R} \mathbf{U}_s \Lambda^{-\frac{1}{2}} = \mathbf{I}_q$ 。

假设不同的分布式目标信号源之间相互独立, 即信号源的协方差矩阵 \mathbf{P} 为对角矩阵, 记为 $\text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_q^2)$, 则 $\Lambda^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U}_s^H \mathbf{B}\mathbf{P}\mathbf{B}^H \mathbf{U}_s \Lambda^{-\frac{1}{2}} = \sum_{i=1}^q \mathbf{c}(\theta_i) \mathbf{c}^H(\theta_i) = \mathbf{I}_q$, 其中

$$\mathbf{c}_i = \sigma_i \Lambda^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U}_s^H \mathbf{b}_i(\mathbf{p}_i) \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, q$ 构成了一组 q 阶正交矢量, 作为盲信号分离的第一步。第二步是对角化二次加权协方差矩阵 $\mathbf{R}_y = E(|\mathbf{y}_i|^2 \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^H)$ 。将式(7)改写为 $\mathbf{y}_i = \sum_{t=1}^q \alpha_i(t) \mathbf{c}(\theta_i)$, 其中 $\alpha_i(t) = \frac{s_i(t)}{\sigma_i}$ 。由于 \mathbf{c}_i 相互正交,

$|\mathbf{y}_i|^2 = \sum_{k=1}^q |\alpha_k(t)|^2$, 所以 $|\mathbf{y}_i|^2 \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^H = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^q |\alpha_k|^2 \alpha_i \alpha_j^H \mathbf{c}_i \mathbf{c}_j^H$ 。利用 $\alpha_i(t)$ 之间的相互独立性, 经过运算

化简, 可得矩阵 \mathbf{R}_y 的对角化形式为 $\mathbf{R}_y = \sum_{i=1}^q (\mu_i + q - 1) \mathbf{c}_i \mathbf{c}_i^H$, 其中 $\mu_i = E(|\alpha_k(t)|^4)$ 为 $\alpha_i(t)$ 的四阶矩^[6]。

因为 $\mathbf{c}_i, i = 1, 2, \dots, q$ 构成了一组 q 阶正交矢量, 所以是矩阵 \mathbf{R}_y 的特征向量。当各信号源的四阶矩都不相等时, 上述对角化形式是唯一的。

在噪声条件下，由于 $\alpha_i(t)$ 之间的相互独立性条件不再满足， $\alpha_i(t) \neq s_i(t)/\sigma_i$ ，因此 c_i 不再是矩阵 R_y 的特征向量。为了抑制高斯噪声，考虑 q 阶累积量矩阵为^[7,8]

$$\tilde{R}_y = [r_{i,j} = \sum_{k=1}^q \text{cum}(y_i(i), y_i'(j), y_i(k), y_i'(k))]_{i,j=1,2,\dots,q} \quad (9)$$

利用累积量的性质有 $\tilde{R}_y = C\Lambda C^H$ ，其中， $C = [c_1, c_2, \dots, c_q]$ ， Λ 为对角矩阵 $\text{diag}(v_1, v_2, \dots, v_q)$ ， v_i 为第 i 个分布式信号的四阶累积量原点值，即峰态，其值为

$$v_i = \text{cum}(\alpha_i(t), \alpha_i(t), \alpha_i'(t), \alpha_i'(t)) = E(s_i^2 s_i'^2) / \sigma_i^4 - 2 \quad i=1,2,\dots,q$$

因为 $c_i (i=1,2,\dots,q)$ 构成了一组 q 阶正交矢量，所以是累积量矩阵 \tilde{R}_y 的特征向量。

由式(9)通过盲信号分离可以估计 c_i 。由于广义方向矢量 $b_i(p_i)$ 位于信号子空间，由 c_i 的估计并利用式(8)可以得到 $b_i(p_i)$ 的估计， $b_i(p_i) = U_s \Lambda^{1/2} c_i$ 。由式(4)可知， $b_i(p_i)$ 与角信号分布函数 $g_i(\theta, p_i)$ 之间存在傅里叶变换关系，故由 $b_i(p_i)$ 的逆傅里叶变换可以得到 $g_i(\theta, p_i)$ 的估计，由其峰值位置可以估计分布式目标 DOA。

3 数值结果

考虑由相邻间隔为1/2波长的16个阵元组成的均匀线阵，假设不同分布式信号源的四阶矩不相等，噪声为高斯分布的白噪声，方差为 σ_n ，定义信噪比为各个阵元信噪比中的最大值。

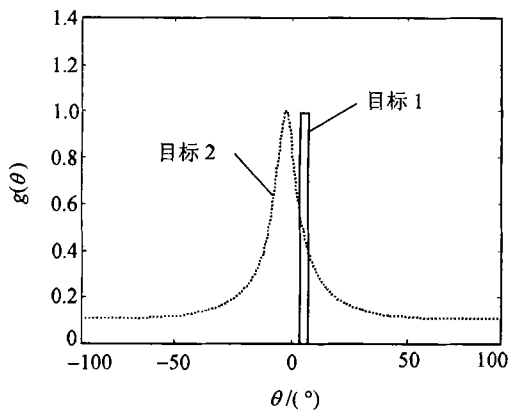


图1 形状不同的角信号分布函数

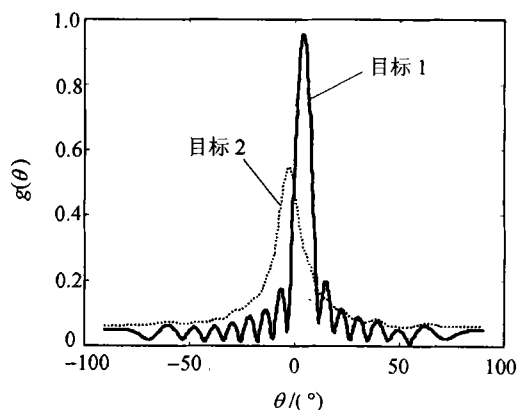


图2 角信号分布函数的估计

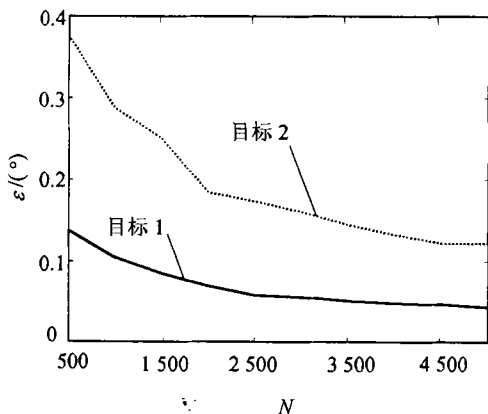


图3 快摄数对 DOA 估计的影响

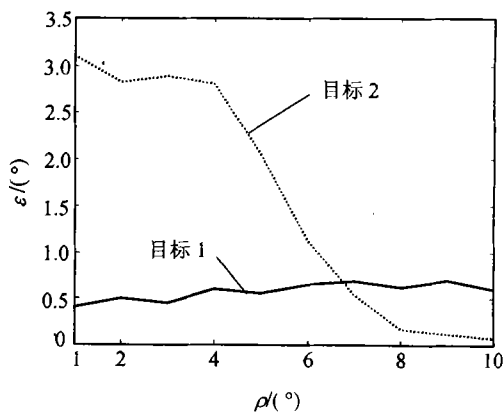


图4 分布参数对 DOA 估计的影响

图1给出了 $g_1(\theta, p_1) = \begin{cases} 1 & |\theta - \theta_1| \leq \Delta_1 \\ 0 & |\theta - \theta_1| > \Delta_1 \end{cases}$ (目标1)和 $g_2(\theta, p_2) = 1/\{1 - \rho_2 \exp[-j(\theta - \theta_2)]\}$ (目标2)的

例子，未知参数矢量分别为 $p_1 = [\theta_1, \Delta_1] = [4.0^\circ, 2.0^\circ]$ 和 $p_2 = [\theta_2, \rho_2] = [-2.5^\circ, 0.8]$ 。图2给出了在信噪比为10 dB、相互独立的快摄数为100的条件下，基于盲信号分离的角信号分布函数估计的一个典型结果。由此可见，角信号分布函数估计虽然与真实形状的差别较大，但是其峰值位置是

一致的。在相同条件下,图3给出了快摄数对分布式目标 DOA 估计性能的影响。在小快摄数条件下,样本的独立性质并不明显,故盲信号分离的算法误差较大。图4给出了在快摄数为500时,第2个目标的分布参数 ρ_2 的变化对 DOA 估计性能的影响。由此可见,第1个分布式目标 DOA 估计结果对 ρ_2 的变化不敏感,但第2个分布式目标 DOA 估计结果表现出分布参数门限效应。这主要是因为第2个分布式目标的广义方向矢量各元素幅值的动态范围随分布参数 ρ_2 变小而变大,各阵元间的信噪比变化较大。由于本文定义的信噪比为各阵元信噪比中的最大值,故分布参数门限效应与信噪比门限效应虽不一样,但却密切相关。

4 结 论

本文研究的基于盲信号分离的相干分布式目标 DOA 估计方法与其他基于已知参数化模型的相干分布式目标 DOA 估计方法有以下几点不同:1) 无须假设角信号分布函数的数学形式已知;2) 求需要多维参数谱峰搜索;3) 适用于不同分布式目标的角信号分布函数的数学形式不同的情况。仿真实验结果表明,这种高分辨的分布式目标 DOA 估计方法的估计性能对其他信号源的分布参数不敏感,而分布参数门限现象需进一步研究。本文只利用了信号四阶累积量的部分信息,计算简便,能改善盲信号分离的统计性能。

参 考 文 献

- 1 Meng Y, Wong K M, Wu Q. Estimation of the direction of arrival of spread source in sensor array processing. Proc-ICSP, 1993,10: 430~434
- 2 Valaee S, Champagne B, Kabal P. Parametric localization of distributed sources. IEEE Trans on Signal Processing, 1995,9(43): 2 144~2 153
- 3 Meng Y, Stoica P, Wong K M. Estimation of the direction of arrival of spatially dispersed signals in array processing. IEE Proc-F, 1996,143(1): 1~9
- 4 Lee Y U, Choi J, Song I, Lee S R. Distributed source modeling and direction-of-arrival estimation techniques. IEEE Trans on Signal Processing, 1997,4(45): 960~969
- 5 Jantti T P. The influence of the extended sources on the theoretical performance of MUSIC and ESPRIT method: Narrow-band sources. Proc-ICASSP, San Francisco, 1992,3(II): 429~432
- 6 Cardoso J F. Source separation using higher order moment. Proc-ICASSP, 1989: 2 109~2 112
- 7 Cardoso J F, Souloumiac A. Blind beamforming for non-Gaussian signals. IEE Proc-F, 1993,10,140(5): 362~370
- 8 丁 齐, 肖先赐. 基于四阶累积量的子空间测向方法研究. 电子科技大学学报, 1998,27(1): 33~38

DOA Estimation of Distributed Sources in Noise Based on Blind Signal Separation

Wan Qun Yang Wanlin

(College of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract By using blind signal separation rather than resort to multidimensional search, an algorithm for DOA estimation of coherently distributed signals is given, which is applicable for circumstance where coherently distributed sources with different angular signal density coexist and is not limited to uniform linear array. Numerical results show that performance threshold of distributed parameter is present and performance of DOA estimation is insensitive to distributed parameters of other sources.

Key words coherently distributed source; angular signal density; direction of arrival estimation; blind signal separation