

一种分布式信号源的参数估计算法

彭涛, 唐斌

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】在信号源具有分布特性时,使用点源模型进行参数估计会产生较大误差,而广义的高分辨率算法又带有较大的运算复杂度,难以满足实时性很高的要求,且都需要预先知道角度分布的具体函数。该文提出了基于天线阵列的特殊结构,采用阵列之间互相关算法对相干分布式信号源的各项参数进行估计,极大地减小了运算量,同时分析了信号源到达方向的模糊性问题。仿真结果证明该方法对相干式分布源参数估计的有效性。

关键词 分布式信号源; 相关; 参数估计; 模糊性问题

中图分类号 TN971.⁺1 文献标识码 A

An Approach on Parameters Estimation about Distributed Source

PENG Tao, TANG Bin

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

Abstract During parameters estimation of the distributed source, there are many errors if it is modeled as a point case in space. The generalized high resolution algorithms, estimating the distributed source parameters, normally demand complex computation, and the angular distributed function is known. To reduce the computational complexity greatly, the correlation algorithm is proposed for the coherent distributed source parameters estimation using the special geometry structure of signal receiving antenna array, and the ambiguity of DOA estimation is also analyzed. Computer simulation testifies the validity of this algorithm.

Keywords distributed source; correlation; parameters estimation; ambiguity

在低角度跟踪雷达、声纳成像、对流层、电离层无线电传播、移动通信定位等领域中,信号源具有分布式特性,典型的高分辨率测向算法通常只是针对点目标信号源的建模,如:多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC),借助旋转不变估计信号参数技术(Estimation of Singal Parameters Via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)。由于忽略了分布参数的影响,很可能导致估计性能大大恶化,直至产生出错误的结果。故在分布式信号源存在的条件下,引入分布函数的建模得尤为重要。从上世纪90年代开始,有关这方面的算法已经得到了重视和发展,如总体最小二乘的借助旋转不变估计信号参数技术(Total Least Squares-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques, TLS-ESPRIT)^[1-2],分布元参数估计(Distributed Source Parameters Estimator, DSPE)和最大似然等^[3-4]。大多数算法均基于信号子空间和噪声子空间的正交性,进行一维或多维参数搜索,并且假设信号源频率和角信号分布函数已知。因此,本文将提出一种采用特殊的天线阵列,通过各天线阵元之间的相关运算估计分布式信号源的频率和DOA。

1 分布式信号源模型及估计

假设天线阵列具有如图1所示的结构, 圆周上均匀摆放5个阵元 (x_1, x_2, \dots, x_5) , 同时在阵元 x_1 的水平和垂直方向上加上两个阵元 (x'_1, x''_1) , 它们到 x_1 的距离都是 $d = \lambda/2$ 。窄带相干分布式目标信号源以频率 f 和中心角度 (θ, ϕ) 到达阵列, 在 t 时刻的圆阵列接收数据可表示为:

$$X(t) = s(t) \iint \mathbf{a}(\vartheta, \varphi) \zeta(\vartheta, \varphi; \mu) d\vartheta d\varphi + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中 $\zeta(\vartheta, \varphi; \mu)$ 是确定的角信号分布函数, 如常用的高斯分布、均匀分布、拉普拉斯分布等; 矢量 $\mu = (\theta, \Delta_\theta, \phi, \Delta_\phi)$ 是 ζ 的未知参数, Δ_θ 和 Δ_ϕ 分别是俯仰角和方位角的角度扩展; $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 是方向向量, $\mathbf{a}(\theta, \phi) = [e^{j\eta \sin\theta \cos(\phi - \gamma_1)}, e^{j\eta \sin\theta \cos(\phi - \gamma_2)}, \dots, e^{j\eta \sin\theta \cos(\phi - \gamma_5)}]^T$, $\eta = 2\pi r/\lambda$, $r = \lambda/4\sin(\pi/5)$, $\gamma_k = 2\pi(k-1)/5$, $k = 1, 2, \dots, 5$; $s(t)$ 是 t 时刻分布式信号的复振幅; $\mathbf{n}(t)$ 是加性高斯随机白噪声, $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_5(t)]^T$ 。

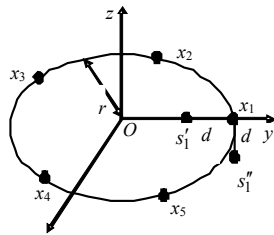


图1 天线阵列

在 t 时刻, 阵元 x'_1 和 x''_1 的接收数据可表示为:

$$x'_1(t) = e^{-j2\pi d/\lambda \sin\theta} x_1(t) + n'_1(t) \quad (2)$$

$$x''_1(t) = e^{-j2\pi d/\lambda \cos\theta} x_1(t) + n''_1(t) \quad (3)$$

由式(1)圆阵列接收数据可以简写为:

$$X(t) = s(t) \mathbf{b}(\mu) + \mathbf{n}(t) \quad (4)$$

$$\mathbf{b}(\mu) = \iint \mathbf{a}(\vartheta, \varphi) \zeta(\vartheta, \varphi; \mu) d\vartheta d\varphi \quad (5)$$

在扩展角度 $\Delta_\theta, \Delta_\phi$ 均较小情况下, $\mathbf{b}(\mu)$ 可以化简为:

$$[\mathbf{b}(\mu)]_k = e^{j\eta \sin\theta \cos(\phi - \gamma_k)} g_k(\mu) \quad k = 1, 2, \dots, 5 \quad (6)$$

式中

$$g_k(\mu) = \iint \zeta(\vartheta + \theta, \varphi + \phi; \mu) e^{j\eta(\vartheta \cos\theta \cos(\phi - \gamma_k) - \varphi \sin\theta \sin(\phi - \gamma_k))} d\vartheta d\varphi$$

$g_k(\mu)$ 是实数值。可以证明, 当角信号分布函数 $\zeta(\vartheta + \theta, \varphi + \phi; \mu)$ 是共轭对称函数。

由式(1)、式(4)和式(6)可得到圆形阵列的接收数据

$$x_k(t) = s(t) e^{j\eta \sin\theta \cos(\phi - \gamma_k)} g_k(\mu) + n_k(t) \quad k = 1, \dots, 5 \quad (7)$$

将 $x_1(t)$ 分别和 $x'_1(t)$, $x''_1(t)$ 做相关运算, 并且假设信号和噪声, 噪声和噪声之间相互独立, 可以得到:

$$E[x_1(t) (x'_1(t))^H] = P g_1(\mu) g'_1(\mu) e^{j2\pi d/\lambda \sin\theta} \quad (8)$$

$$E[x_1(t) (x''_1(t))^H] = P g_1(\mu) g''_1(\mu) e^{j2\pi d/\lambda \cos\theta} \quad (9)$$

式(8)和式(9)中 $P = E[s(t)(s(t))^H]$ 代表信号功率。

假设角信号分布函数是共轭对称的, 所以 $g_1(\mu), g'_1(\mu)$ 和 $g''_1(\mu)$ 都是实数。对式(8)和式(9)取幅角主值, 得到:

$$\arg(x_1 x'_1) = \frac{2\pi d}{\lambda \sin\theta} \quad (10)$$

$$\arg(x_1 x''_1) = \frac{2\pi d}{\lambda \cos\theta} \quad (11)$$

分别取式(10)和式(11)的平方再求和, 可以得到:

$$\arg^2(x_1 x'_1) + \arg^2(x_1 x''_1) = (2\pi d/\lambda)^2 \quad (12)$$

根据式(12)就可以得到 λ 的估计值, 再由 $f = c/\lambda$ 算出载波频率。然后, 把 λ 的估计值代入式(10), 能够求出俯仰角 θ , $\theta \in (-\pi/2, \pi/2)$ 。

至此, 分布式信号源的3个参数已经得到了2个, 还剩最后一个方位角 ϕ , 因为 $\phi \in (-\pi, \pi)$, 在计算的时候很可能存在相位模糊性问题, 如果阵元之间的基线长度 $L > \lambda/2$, 就会存在模糊, 必须要对其进行解模糊才能够得到正确的结果。在本文的天线阵列中, $L = 2r \sin(\pi/5)$, 当 $L > \lambda/2$, 即 $r > \lambda/4 \sin(\pi/5)$, 就会产生相位模糊问题。

将圆阵列上相邻阵元的接收数据分别作相关运算, 同样假设信号与噪声, 噪声与噪声之间相互独立,

则可以得到:

$$\mathbf{R}_{i,i+1} = E[x_i x_{i+1}^H] = P g_i g_{i+1}^H e^{j2\eta \sin((2i-1)\pi/5 - \phi) \sin(\pi/5) \sin\theta}, \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (13)$$

式中

$$|2\eta \sin((2i-1)\pi/5 - \phi) \sin(\pi/5) \sin\theta| = 2\eta \sin(\pi/5) = \pi$$

所以可以直接对 $\mathbf{R}_{i,i+1}$ 求幅角主值。如果作相关运算不是用相邻阵元而是用对角上的阵元数据, 就需要考虑模糊问题, 在幅角主值上加 2π 的整数倍。对 $\mathbf{R}_{i,i+1}$ 直接求幅角主值得到:

$$\arg(\mathbf{R}_{i,i+1}) = 2\eta \sin((2i-1)\pi/5 - \phi) \sin(\pi/5) \sin\theta \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (14)$$

这样可以组成4个方程, 连列求解出 ϕ 。需要注意的是, 在 $(0, 2\pi)$ 的范围内, 相同的正弦值对应着两个角度, 所以也存在模糊。通过4个方程可以找出方位角的交集, 即可消除模糊。

如果已知角信号具体的分布形式, 还可以估计出 $\Delta_\theta, \Delta_\phi$ 。由式(8)和式(13)可得到:

$$|E(x_i(t)x_i'(t)^H)| = P |g_i(u)| |g_i'(u)| \quad (15)$$

$$|E(x_i x_{i+1}^H)| = P |g_i| |g_{i+1}|, \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (16)$$

在已知角信号分布形式 g_i 时, 将已经估计出来的频率和角度信息代入式(15), (16), 剩下了3个变量 P, Δ_θ 和 Δ_ϕ , 所以只需要在等式中任意连列3个即可以解出 $\Delta_\theta, \Delta_\phi$ 。

2 计算机仿真

考虑在加性高斯白噪声下的QPSK信号, 信噪比为10 dB, 角度分布函数为高斯形状, 即:

$$\zeta(\vartheta, \varphi; \mu) = 1/2\pi\Delta_\theta\Delta_\phi e^{-[(\vartheta-\theta)^2/\Delta_\theta^2 + (\varphi-\phi)^2/\Delta_\phi^2]/2}$$

角度扩展 $(\Delta_\theta, \Delta_\phi)$ 取 $(3^\circ, 3^\circ)$, 快拍数为256。信号频率 f 和波达方向 (θ, ϕ) 分别为: $f=2\ 000\ \text{MHz}$; $(\theta, \phi) = (50^\circ, 40^\circ)$, 随机试验50次后参数估计结果如表1所示。当信号参数 $f=2\ 000\ \text{MHz}$, $(\theta, \phi) = (60^\circ, 220^\circ)$ 时, 在不同信噪比下, 随机试验50次后角度参数估计均方根误差(RMSE)与信噪比SNR的关系曲线如图2所示。而采用传统TLS-ESPRIT算法角度参数估计均方根误差(RMSE)与信噪比SNR的关系曲线如图3所示。

表1 参数估计的均值和均方根误差

σ_f/MHz	$\sigma_\theta/(\text{^\circ})$	$\sigma_\phi/(\text{^\circ})$	$\sigma_{\Delta\theta}/(\text{^\circ})$	$\sigma_{\Delta\phi}/(\text{^\circ})$
30.1	1.606 0	0.742 1	1.913 7	1.831 3

实验数据表明, 俯仰角的估计精度受频率误差的影响较大, 而方位角对频率误差的敏感度较小。由于受到其他参数误差的影响, 角度扩展的估计误差较大。

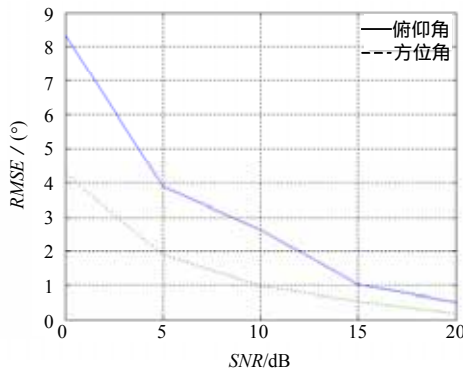


图2 相关法角度估计RMSE Vs SNR

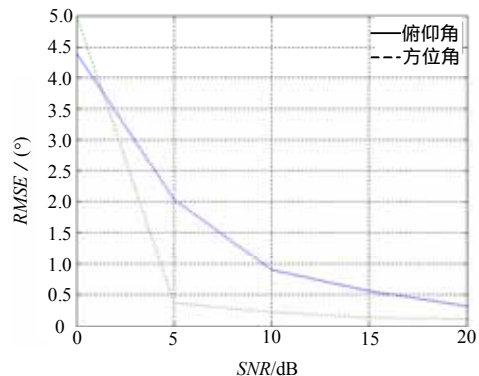


图3 TLS-ESPRIT角度估计Vs SNR

实验数据表明, 低信噪比条件下, 本文方法的参数估计误差较大, 尤其是俯仰角的误差。典型的高分辨率算法(如MUSIC、ESPRIT)却能够取得比较好的效果^[2]。

(下转第664页)

外形事实有出入,图1h组织外形比较光滑且连续,符合实际情况。

总之,基于总体方差最小和最小/最大曲率流在平滑噪声和消去离散余弦变换方块效应的同时,能保留图像边界等主要结构特征。经几何活动轮廓模型分割表明,算法比均值滤波后的图像有更好的分割效果。

参 考 文 献

- [1] 余成波. 数字图像处理及MATLAB实现[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003
- [2] Norstrom N. Biased anisotropic diffusion – a unified regularization and diffusion approach to edge detection[J]. Image and Vision Computing , 1990, 8(4): 318-327
- [3] Yang S, Hu Y H. Coding artifacts removal using biased anisotropic diffusion[C]. Proceeding of the ICIP, Santa Barbara, CA, 1997,2: 346-349
- [4] Osher S, Rudin L I, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Phys. D, 1992, 60: 259-268
- [5] Sethian J A. Level set methods and fast marching methods: evolving interface in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials science[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999

编 辑 漆 蓉

(上接第613页)

3 结 束 语

提出了利用一种特殊的天线阵列结构,对相干分布式信号源的频率和到达方向进行估计的算法。它避免了大部分高分辨率算法需要特征值分解,多维搜索等复杂的数学计算,而是采用互相关的方法,得到多个方程连列求解,最后通过解除相位模糊估计出正确的参数值。这种方法运算度大为降低,可以满足实时处理,并且不需要事先已知角信号分布的具体函数,只要求是共轭对称分布即可。仿真数据证实了本方法是有效的。

参 考 文 献

- [1] Shahbazpanahi S, Valaee S, Bastani M H. Distributed source localization using ESPRIT algorithm[J]. IEEE,Trans-SP, 2001, 10(49) : 2 169 - 2 178
- [2] Jooshik Lee, lickho Song, Hyoungmoon Kwon, et al. Low-complexity estimation of 2D DOA for coherently distributed sources[J].Signal processing, 2003, 8(83): 1 789 - 1 802
- [3] Valaee S, Champagne B, Kabal P P. Localization of distributed sources[J]. IEEE Trans-SP, 1995, 9(43): 2 144 - 2 153
- [4] Trump T, Ottersten B. Estimation of nominal direction of arrival and angular spread using an array of sensors[J]. IEEE Trans-SP, 1996, 1(45): 57 - 69

编 辑 徐安玉