

阵列幅相误差条件下的目标方位估计

秦洪峰 黄建国 张群飞

(西北工业大学航海工程学院 西安 710072)

2001 年 3 月 9 日收到

摘要 本文研究了一种改进的 MUSIC 法,可在一定阵列幅相误差条件下对多目标实现高分辨方位估计,有效地改善了原算法的参数估计性能,具有稳健性高、适用范围广以及工程实现简单等特点。通过大量的计算机仿真和水池实验表明,该方法具有较好的多目标分辨能力和方位估计精度,工程应用前景良好。

关键词 幅相误差, 方位估计, MUSIC 法

Estimation of direction-of-arrival in the presence of amplitude and phase errors

QIN Hongfeng HUANG Jianguo ZHANG Qunfei

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract A novel modified MUSIC (MMUSIC) algorithm for high-resolution direction-of-arrival (DOA) estimation under amplitude and phase errors (array model errors) is studied. The robust MMUSIC algorithm can improve the performance of DOA estimation compared with the original MUSIC. It is also easy to be implemented in practice and is suitable for most cases of model errors. Computer simulations and experiments are conducted to show the high performance in resolution and precision as well as the good prospect in engineering applications of the MMUSIC algorithm.

Key words Amplitude and phase errors, Direction-of-arrival estimation, MUSIC algorithm

1 引言

目标信号方位 (DOA) 估计在通信、声纳、雷达、海洋开发、生物医学工程等领域中占有十分重要的地位。经过二十多年的研究,提出了许多稳健性高、运算量小的高分辨率方法,特别是基于协方差矩阵特征分解理论的

子空间类方法一直得到人们的广泛重视。这类方法能提供信号参数的渐近无偏估计,使估计均方差接近 CR 界,物理意义明确,具有常规方法(如波束形成)无法比拟的参数估计性能,其中典型代表就是 R.O.Schmidt 提出的 MUSIC 法^[1]。

通过大量的研究发现,子空间类方法的

高分辨能力是建立在精确的数学理论模型基础之上的,然而实际中无疑会遇到模型失配的情况。许多系统误差都可以归结为阵列幅相误差,如阵元位置误差、阵元幅相误差、通道幅相误差等,这些因素对估计性能影响较大,使高分辨方法本身的优势难以发挥出来,而且上述误差并不能通过增加快拍数的方法来抑制。如何解决好这一方面的问题始终是阵列信号处理关注的热点,国内外文献针对不同误差情况下高分辨方法的估计精度和分辨能力进行了广泛深入的研究^[2-9],并提出了一些解决方法和措施。但是在实际中,这些方法普遍存在计算过程繁琐、中间环节复杂、工程实现困难等缺点。

通常可以将阵列幅度误差和相位误差分别看作为零均值高斯分布和零均值均匀分布的随机扰动,这样就能够采取一些有效措施,使随机扰动的影响得到大幅度地降低,从而提高参数估计方法的性能。本文研究了一种改进的 MUSIC 法,能有效地改善原算法在阵列幅相误差条件下的多目标方位参数估计性能,具有稳健性高的特点,可广泛适用于多数系统误差和随机误差环境,工程实现简单。

2 阵列模型

假设接收基阵位于目标信号源的远场,传播介质认为是均匀、各向同性的。信号为窄带信号,波长为 λ 。噪声为零均值、方差为 σ_n^2 的高斯白噪声,且阵元间互不相关。接收基阵输出的表达式为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\Theta)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中

$$\mathbf{A}(\Theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_D)] \quad (2)$$

称为阵列流形或方向矩阵, $\mathbf{a}(\theta_i)(i = 1, 2, \dots, D)$ 为方向矢量, D 为目标信号源个数。对于阵元数 M 、等间距 Δ 的均匀线列阵而言, $\mathbf{a}(\theta_i)$ 可表示为

$$\mathbf{a}(\theta_i) = [1, e^{-j2\pi\Delta\sin\theta_i/\lambda}, \dots, e^{-j(M-1)2\pi\Delta\sin\theta_i/\lambda}]^T \quad (3)$$

目标信号矩阵 $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)]^T$, 加性噪声矩阵 $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$ 。

3 DOA 估计

3.1 基本方法

接收基阵输出的协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)] = \mathbf{A}(\Theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H(\Theta) + \sigma_n^2\mathbf{I} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{R}_s = E[\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)]$ 。

若 $\mathbf{R}$ 的特征值按非升序排列 $\xi_1 \geq \xi_2 \geq \dots \geq \xi_M$, 则

$$\begin{aligned} \xi_i &> \sigma_n^2 (i = 1, 2, \dots, D), \\ \xi_i &= \sigma_n^2 (i = D + 1, D + 2, \dots, M) \end{aligned} \quad (5)$$

对应的特征向量用 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_D, \mathbf{e}_{D+1}, \dots, \mathbf{e}_M$ 表示。 $\mathbf{E}_s = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_D]$ 称为信号子空间, $\mathbf{E}_n = [\mathbf{e}_{D+1}, \mathbf{e}_{D+2}, \dots, \mathbf{e}_M]$ 称为噪声子空间。根据特征分解理论可知, $\mathbf{E}_s$ 与 $\mathbf{E}_n$ 正交, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_i^H \mathbf{e}_j &= 0, i = 1, 2, \dots, D \\ j &= D + 1, D + 2, \dots, M \end{aligned} \quad (6)$$

MUSIC 法正是根据上述正交特性而得的, 其空间角谱表达式为^[1]

$$\begin{aligned} P_{MUSIC}(\theta) &= \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{E}_n\mathbf{E}_n^H\mathbf{a}(\theta)} \\ &= \frac{1}{\sum_{i=D+1}^M \left| \mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{e}_i \right|^2} \\ &= \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)[\mathbf{I} - \mathbf{E}_s\mathbf{E}_s^H]\mathbf{a}(\theta)} \end{aligned} \quad (7)$$

在实际中, $\mathbf{R}$ 难以精确得到, 而是由观测数据来进行估计, 即

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t) \quad (8)$$

3.2 改进方法

理论上针对均匀线列阵而言,在无阵列幅相误差的情况下协方差矩阵是 Hermitian 矩阵和 Toeplitz 矩阵。但是在实际应用中由于阵列存在各种类型误差,协方差矩阵不再满足 Toeplitz 矩阵的条件,直接影响 DOA 估计结果。为了改善参数估计性能,可以首先对协方差矩阵进行 Toeplitz 化预处理,减轻阵列幅相误差的影响;然后再特征分解,得到信号子空间和噪声子空间;最后利用 MUSIC 法估计出目标信号的方位。具体实现步骤如下:

(1) 按式 (8), 根据接收基阵输出 $\mathbf{x}(t)$, 计算其协方差矩阵的估计值 $\hat{\mathbf{R}} = (\hat{r}_{ij})_{i,j=1,2,\dots,M}$;

(2) 对 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行 Toeplitz 化预处理, 计算出各条平行于主对角线的直线上的元素的加权平均值, 再用加权平均值替代对应直线上的各元素, 得到 $\hat{\mathbf{R}}_T = (\hat{r}_{ij})_{i,j=1,2,\dots,M}$, 其中

$$\hat{r}_{ij} = \frac{W_K}{M - |K|} \cdot \sum_{\substack{i,j=1 \\ i-j=K}}^M r_{ij},$$

$$K = -(M-1), \dots,$$

$$0, \dots, (M-1) \quad (9)$$

$K=0$ 即为主对角线, W_K 为加权系数, 若采用均匀加权, 即 $W_K \equiv 1$, $\hat{r}_{ij}$ 则对应为一般意义下的算术平均值。显然, 经过 Toeplitz 化预处理以后, 实际上就能够对阵列各个阵元所接收的信号幅度和相位具有一定程度的补偿作用, 从而减轻了阵列幅相误差对参数估计性能的影响;

(3) 将 $\hat{\mathbf{R}}_T$ 特征分解, 构造信号子空间和噪声子空间;

(4) 利用式 (7) 估计目标方位。

4 计算机仿真

假设接收基阵采用均匀线列阵, 阵元数为 14, 阵元间距与波长比为 1/2。存在三个等强度、不相干目标源, 方位分别为 -2° 、 1.6° 、

6.4° , 目标 1 与 2、2 与 3 之间的方位间隔分别约为主波束宽度的 1/2 和 2/3。噪声为与信号不相干的零均值高斯白噪声。利用 MUSIC 法进行方位估计, 快拍数为 500, 每种情况均独立进行 200 次 Monte-Carlo 仿真。

假设阵列幅度误差服从零均值的高斯分布, 相位误差服从零均值的均匀分布。原 MUSIC 法与改进的 MUSIC 法的 DOA 估计结果对比如图 1 所示, 其中信噪比 SNR 为 10dB, 在两条利用改进的 MUSIC 法进行方位估计的结果曲线中, 实线表示均匀加权, 虚线的加权方法为 $W_K = 1.2 - \frac{0.2 \cdot |K|}{M-1}$ 。当阵列幅相误差分别达到 20% 和 25% 时, 对应的目标分辨概率随 SNR 变化情况的对比结果见图 2。可以看出, 原 MUSIC 法对阵列幅相误差比较敏感, 而改进的 MUSIC 法则在一定阵列幅相误差条件下明显地提高了多目标的分辨能力。

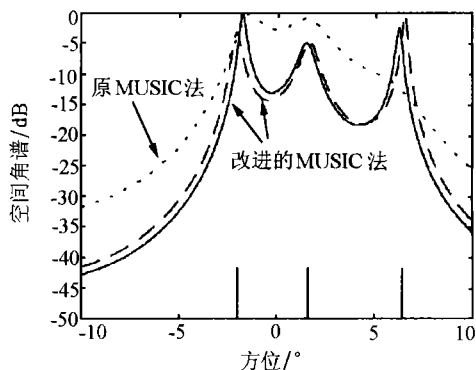


图 1 DOA 估计结果对比 (SNR=10dB)

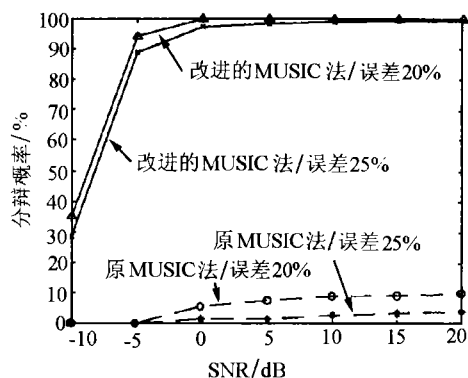


图 2 分辨概率随 SNR 变化曲线对比

存在 20% 阵列幅相误差时 DOA 估计的均方根误差 RMSE 随 SNR 变化情况见图 3，图中数字 1、2、3 分别代表目标 1、2、3。图 4 所示为在信噪比一定的条件下 RMSE 随阵列幅相误差变化情况，其中 SNR=10dB。显然，SNR 越高，误差越低，则 DOA 估计结果的 RMSE 就越小。

根据计算机仿真结果可见，当 SNR 大于 0dB、阵列幅相误差不超过 20% 时，改进的 MUSIC 法对多目标的分辨能力可以达到 1/2 波束宽度，并具有良好的方位估计性能。

5 水池实验结果分析

在工程实际中由于存在着各种系统误差和随机误差，为了确定新方法的应用价值，需要进一步利用自行研制的水池实验系统进行多目标方位估计的实验研究。系统中多功能消声水

池的尺寸为 $20 \times 8 \times 7\text{m}^3$ ，六面均有消声材料，可实现全方位消声。

针对两目标源和三目标源的情况分别进行了实验研究。接收基阵同样采用 14 阵元的均匀线列阵，目标源信号等强度、不相干，信噪比约为 20dB，估计方位时快拍数为 500，每种情况均进行 10 次独立实验。

两目标源的真实方位分别为 2.1° 和 5.9° ，夹角约为 1/2 波束宽度；三目标源的真实方位分别为 -11.0° 、 -2.5° 和 0.2° ，其中目标 1、2 之间的夹角约为一个波束宽度，目标 2、3 之间夹角约为 1/3 波束宽度。由于受误差的影响，原 MUSIC 法难以分辨出多目标，因篇幅有限，这里仅给出利用改进的 MUSIC 法进行方位估计的实验结果（均匀加权）。图 5、6 所示分别为两目标源和三目标源 10 次实验的空间角谱曲线，表 1 为水池实验的 DOA 估计和分析结果。

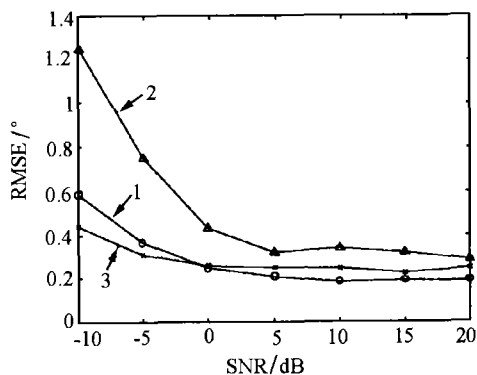


图 3 RMSE 随 SNR 变化曲线 (误差 20%)

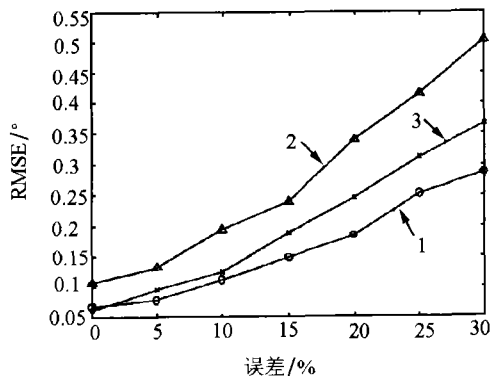


图 4 RMSE 随误差变化曲线 (SNR = 10dB)

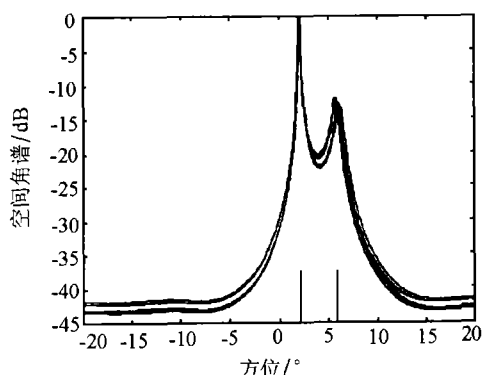


图 5 两目标源的 DOA 估计

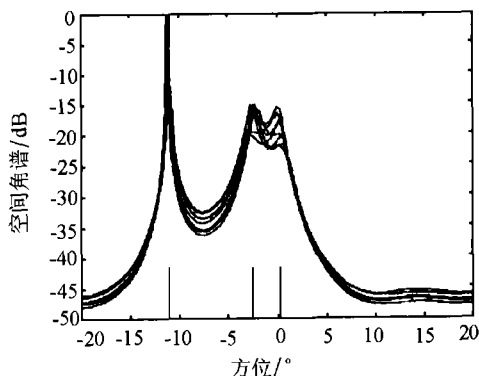


图 6 三目标源的 DOA 估计

表 1 水池实验的 DOA 估计和分析结果

实验 序号	两目标源 ($^{\circ}$)		三目标源 ($^{\circ}$)		
	$\hat{\theta}_1$	$\hat{\theta}_2$	$\hat{\theta}_1$	$\hat{\theta}_2$	$\hat{\theta}_3$
1	2.05	6.15	-11.25	-2.43	0.14
2	2.14	6.10	-11.19	-2.64	0.41
3	2.07	5.76	-11.10	-2.57	0.21
4	2.17	5.75	-11.02	-2.57	0.06
5	2.05	6.20	-11.25	-2.40	0.16
6	2.14	6.06	-11.19	-2.32	0.50
7	2.07	5.82	-10.97	-2.69	0.22
8	2.17	5.71	-11.11	-2.09	0.13
9	2.15	6.02	-11.04	-2.23	0.08
10	2.07	5.87	-10.97	-2.32	-0.09
均值	2.11	5.94	-11.11	-2.43	0.18
标准差	0.05	0.18	0.11	0.19	0.17

由实验结果可以看出,在阵列幅相误差条件下,改进的 MUSIC 法对多目标的分辨能力和方位估计精度能够满足实际工程应用的要求。

6 结论

本文系统研究了阵列幅相误差条件下利用改进的 MUSIC 法实现多目标方位估计的统计

性能。通过对协方差矩阵进行 Toeplitz 化预处理,能够大大地降低随机扰动的影响,从而有效地提高算法的稳健性。研究结果表明,当阵列幅相误差不超过 20%、信噪比大于 0dB 时,改进的 MUSIC 方法对多目标具有较好的参数估计性能,工程应用前景良好。

参 考 文 献

- 1 Schmit R O. A Signal Subspace Approach to Multiple Emitter Location and Spectral Estimation. Ph.D. Dissertation, Stanford University, 1981.
- 2 Friedlander B. *IEEE Trans. SP*, 1990, **38**(10): 1740-1751.
- 3 Li F, Vaccaro R J. *IEEE Trans. AES*, 1992, **28**(3): 708-717.
- 4 Swindlehurst A L, Kailath T. *IEEE Trans. SP*, 1992, **40**(7): 1758-1774.
- 5 Weiss A J, Friedlander B. *IEEE Trans. SP*, 1994, **42**(6): 1519-1526.
- 6 Zhang Q T(Keith). *IEEE Trans. SP*, 1995, **43**(4): 978-987.
- 7 Chen J, Huang J. *Proc. IEEE ICASSP*, 1998, 4: 2437-2440.
- 8 陈辉,王永良,万山虎.电子学报,1999,**27**(9): 97-99.
- 9 苏卫民,顾红,倪晋麟.电子学报,2000,**28**(6): 105-107.

中澳建筑声学设计技术交流会在沪举行

由上海市建委科学技术委员会和上海市海外交流协会主办的中国 - 澳大利亚建筑声学设计技术交流会于 2001 年 11 月 15 日在沪举行。参加交流会的中外技术人员共 50 余人。澳大利亚马歇尔·戴声学公司 [Marshall Day Acoustis Pty Ltd(MDA)] 波德·菲恩赛德等 6 位声学专家在会上介绍了澳大利亚建筑声学 and 噪声控制的概况,特别是在室内声场模拟、交通噪声模拟与预测、大楼通风系统噪声治理、房屋振动控

制、隔声屏障、室内音响等方面的新进展。

MDA 是澳大利亚著名的声学公司,专门从事建筑项目、工业项目以及环境噪声与振动项目的评估、咨询、设计、治理等工作,已在新加坡、新西兰、马来西亚等国家设立了办事处、承担过美国、香港等亚太地区 2500 多个项目,具有雄厚的实力,并拟在中国设立办事处。

(中国船舶工业第九设计研究院 吕玉恒)