

一种基于 MUSIC 改进算法的宽带水声信号 DOA 估计

刘 亮, 赵高泽, 龙 伟

(中国船舶重工集团公司 第七〇五研究所昆明分部, 云南 昆明 650118)

摘 要: 提出一种适用于水声宽带信号的 DOA 估计算法。该方法首先将时域宽带信号变换到频域, 然后划分子带, 在每个子带上进行不同的加权得到信号的 DOA 估计。同时子带算法采用改进的 MUSIC 算法, 降低了 DOA 高分辨力估计所需要的信噪比。计算机仿真对比了 MUSIC 算法和改进后算法的空域分辨力, 同时也对比了不同信噪比下 2 种算法的性能。仿真结果表明, 改进后的算法无论在适用信噪比条件还是分辨能力上均有较大提高。最后采用某型水下航行器的实航数据对算法进行验证, 验证结果表明该算法可在实际应用环境中获得良好的 DOA 估计。

关键词: 水声; 宽带信号; DOA; MUSIC

中图分类号: TB566 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-7649(2015)06-0101-04 **doi:** 10.3404/j.issn.1672-7649.2015.06.021

An improved algorithm based on MUSIC in underwater acoustic wideband array signal direction of arrive estimation

LIU Liang, ZHAO Gao-ze, LONG Wei

(Kunming Branch of the 705 Research Institute of CSIC, Kunming 650118, China)

Abstract: In this paper, a DOA algorithm method which is used in underwater acoustic wideband array signal is put forward. This method transforms the data from the time field to the frequency field. Then compartmentalize the wideband into some different narrowband. In each narrowband, the data will be added by using different coefficient. At the same time an improved MUSIC arithmetic is used in this method, it makes the distinguishable capability of the DOA estimation better. The computer simulation compares the MUSIC method with the improved algorithm in the performance of the space resolution. It also compares the performance of the two algorithms under different signal-to-noise ratio. The simulation results show that the improved method have a greatly improved not only in resolving capability but also in the suitable conditions. Finally, in the paper an underwater vehicle navigation data are also used to verify the improved algorithm, the verification results show that the algorithm can be obtained good angle direction estimation in the actual acoustic environment.

Key words: underwater acoustic; wideband signal; DOA; MUSIC

0 引 言

目前由多个水下声传感器组成的声呐基阵已经广泛使用在水下信号探测、声源定位以及干扰和噪声的抑制中, 从而改善声呐的工作性能。而声源的定位对于鱼雷探测起着关键作用。基于阵列的 DOA 估计方法可以分为 3 大类: 第 1 类是采用常规延时的波束形

成技术, 该方法要想获得高的空域分辨率, 须增加阵列传感器单元的数量; 第 2 类是基于子空间技术的波束形成, 该方法可以提供较高的分辨力; 第 3 类是依据最大似然理论的波束形成技术, 此方法可以在低信噪比工况下良好的进行工作, 但是其计算量很大并且需要大量的先验知识, 因此无法在水声被动探测领域应用。MUSIC 算法是子空间波束形成技术的一种

收稿日期: 2014-08-15; 修回日期: 2014-09-09

作者简介: 刘亮(1987-), 男, 硕士研究生, 从事水声工程技术研究。

DOA 估计算法, 其应用前提是具有较高的信噪比, 因此对于水声领域的被动探测的适用性不是很强。而本文对 MUSIC 算法做了适当改进, 使之可以在较低的信噪比环境下仍然能够获得高分辨处理结果, 从而使该算法可以适用于水声被动探测的实际应用。

1 DOA 估计的阵列信号数学模型

DOA 估计的数学模型采用 N 元均匀线列阵, 间距为 d , 各阵元接收灵敏度相同, 平面波入射方向为 θ , 如图 1 所示^[1]。

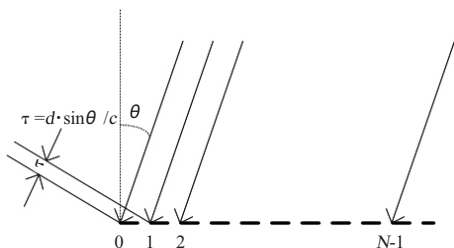


图 1 均匀线列阵

Fig. 1 Uniformity linear array

各阵元输出信号为:

$$\begin{aligned} F_0(t) &= A \cos(\omega t), \\ &\vdots \end{aligned} \quad (1)$$

$$F_n(t) = A \cos(\omega t + n\varphi) = A \operatorname{Re} [e^{-j\omega t} \cdot e^{-jn\varphi}].$$

式中: A 为信号幅度; ω 为信号角频率; φ 为相邻阵元接收信号间的相位差。有

$$\varphi = 2\pi f\tau = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta. \quad (2)$$

即每一个阵元接收的信号相对于参考阵元接收的信号有一定的时延, 如果对各阵元接收的数据进行相应的延时补偿后进行加权, 则可使期望的方向信号实现同相累加。对于设计好的线列阵, 信号的来波方向与阵列的延时是一一对应的关系, 因此对于线列阵接收的信号, 在各个方向上采用相应的延时加权, 如果某一方向上有信号存在, 则在方向图上可以在该信号方向上形成峰值, 从而估计出信号的来波方向。

2 MUSIC 算法以及改进方法

基于矩阵特征值分析的多重信号分类 (MUSIC)^[2] 算法是一种 DOA 高分辨算法。根据矩阵理论的知识, 可以对阵列信号的自相关矩阵进行特征值分解, 从而得到信号子空间和噪声子空间, 且信号子空间与噪声子空间正交。自相关矩阵特征值分解如式 (3) 所示, 其中 λ_i 是矩阵特征值, e_i 是

对应于 λ_i 的归一化特征向量。

$$R = \sum_{i=1}^N \lambda_i e_i e_i^H = e_s A_s e_s^H + e_n A_n e_n^H, \quad (3)$$

由于信号对应的特征值较大, 噪声对应的特征值较小。因此可以构成信号子空间 E_s 和噪声子空间 E_n 如下:

$$\begin{aligned} E_s &= [e_1 \ e_2 \ \cdots \ e_p], \\ E_n &= [e_{p+1} \ e_{p+2} \ \cdots \ e_N]. \end{aligned} \quad (4)$$

经典 MUSIC 算法原理是将阵列方向矢量投影到噪声子空间里, 投影矩阵为 P_{E_n} , 投影结果为:

$$V_n = P_{E_n} a(\theta) = E_n (E_n^H E_n)^{-1} E_n^H a(\theta) = E_n E_n^H a(\theta). \quad (5)$$

理论上信号对应的阵列方向矢量在噪声子空间上的投影结果应为 0, 但由于实际信号中噪声的干扰、信号截断、信号处理以及运算等导致投影的结果不可能为 0, 而是一个很小的值^[3], 而噪声对应的阵列方向矢量在噪声空间的投影值则较大, 因此将投影的结果的幅值平方取倒数后, 便可以在信号方向得到一个尖峰, 从而估计出信号的到达方向。

$$V_n^H V_n = a^H(\theta) E_n E_n^H E_n E_n^H a(\theta), \quad (6)$$

$$\hat{P}_{MUSIC}(\theta) = 1/V_n^H V_n = 1/a^H(\theta) E_n E_n^H a(\theta). \quad (7)$$

但当信号变弱时, 信号空间和噪声空间的正交性则变差, 因此估计的峰值会随着信噪比的降低而降低。

本文采用的改进算法则是先将不同的阵列方向矢量投影到信号子空间后得到投影值 (投影矩阵 P_{E_s}), 然后再除以其投影到噪声子空间的结果。公式如下:

$$V_s = P_{E_s} a(\theta) = E_s (E_s^H E_s)^{-1} E_s^H a(\theta) = E_s E_s^H a(\theta), \quad (8)$$

$$V_s^H V_s = a^H(\theta) E_s E_s^H E_s E_s^H a(\theta) = a^H(\theta) E_s E_s^H a(\theta), \quad (9)$$

$$\hat{P}_{GaixinMUSIC}(\theta) = V_s^H V_s / V_n^H V_n = a^H(\theta) E_s E_s^H a(\theta) / a^H(\theta) E_n E_n^H a(\theta). \quad (10)$$

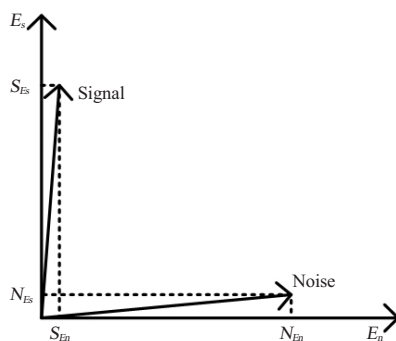


图 2 投影分析原理图

Fig. 2 The principle diagram of the projection analysis

由于到达阵列信号方向矢量在信号子空间的投影值会产生较大的投影值 S_{E_s} , 而噪声方向在信号子空间的投影值产生较小的值 N_{E_s} , 而投影到噪声子空间的结果刚好相反, 如图 2 所示, 信号在噪声空间的投影值

为 S_{En} , 噪声投影结果为 N_{En} 。因此传统的 MUSIC 算法产生的峰值比约为 N_{En}/S_{En} , 而采用改进的 MUSIC 算法处理以后, 算法的峰值比约为 $S_{Es}^* N_{En}/S_{En}^* N_{Es}$, 由于 S_{Es}/N_{Es} 的比值大于 1, 因此改善了波束图的峰值指向性, 同时降低了旁瓣电平, 进而提高了空间分辨力。同时由于自相关矩阵根据阵列实时接收的数据估算出来, 因此该算法具有较好的实时性能。

3 宽带水声信号的 DOA 估计原理

由于鱼雷自导被动探测的信号主要是舰船辐射出的宽带噪声声源, 并且宽带信号比窄带信号含有更多的信源信息, 从而更有助于实现目标检测、参量估计等。所以窄带波束形成已经不能满足被动探测的需要, 因此有必要进行宽带水声信号 DOA 估计的研究。本文采用频域划分子带^[4]的宽带 DOA 处理技术, 其原理图如图 3 所示。

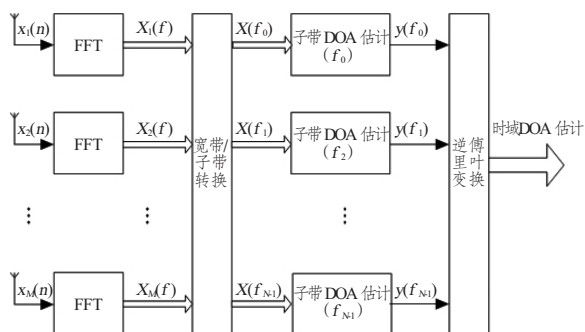


图 3 频域宽带水声波束形成原理图

Fig. 3 The principle diagram of the frequency domain wideband acoustic beam forming

由于频域变换宽带波束形成器是借助于 DFT 和 IDFT, 是一种批处理的方法, 可以用数字信号处理中的快速傅里叶变换 (FFT) 加以实现, 比时间域形成多个宽带波束运算量要小^[5]。因此本文采用频域宽带 DOA 估计算法^[6]。

4 计算机仿真结果及分析

为验证改进后 MUSIC 算法性能, 仿真采用 24 阵元线列阵, 使用白噪声序列生成宽带噪声源 1 个, 方向 20° , 分别在阵元接收信号的信噪比为 14 dB, 0 dB, -14 dB 和 -19 dB 时进行 2 种算法的宽带波束形成的对比仿真, 仿真结果如图 4 ~ 图 7 所示。

仿真结果表明, 随着信噪比的下降, 2 种算法的空间分辨性能均有所下降, 但改进算法在信噪比低的时候仍能具有很好的空间分辨力, 尤其是在信噪比下降到 -19 dB 时, 经典的 MUSIC 算法几乎

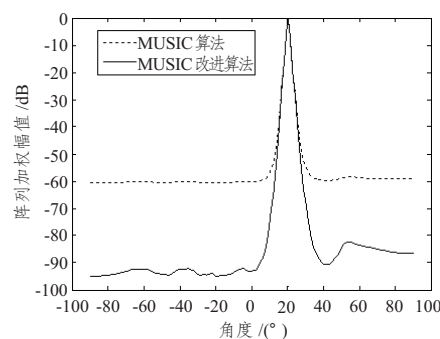


图 4 信噪比为 14 dB 时的阵列方向图

Fig. 4 The array direction figure when SNR is 14 dB

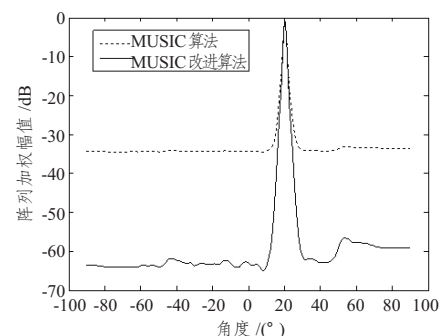


图 5 信噪比为 0 dB 时的阵列方向图

Fig. 5 The array direction figure when SNR is 0 dB

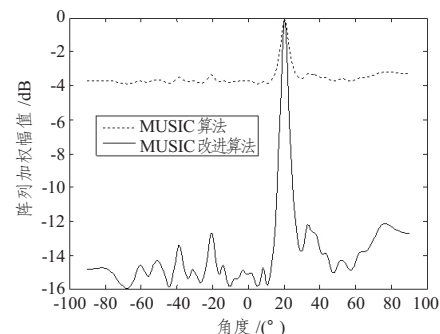


图 6 信噪比为 -14 dB 时的阵列方向图

Fig. 6 The array direction figure when SNR is -14 dB

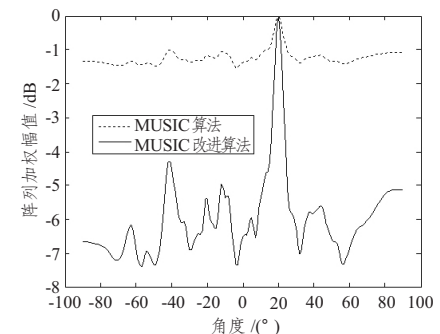


图 7 信噪比为 -19 dB 时的阵列方向图

Fig. 7 The array direction figure when SNR is -19 dB

无法检测出信号的来波方向, 但在改进后算法的方向图上, 主瓣与旁瓣仍有约 -3 dB 的峰值差, 而声

呐的自主检测的检测域要求应不低于 3 dB, 从图中看, 经典算法在信噪比为 -19 dB 输入的结果只有 1 dB, -14 dB 的输入结果才有 3 dB 输出。因此较经典的 MUSIC 算法相比, 改进后的算法在低信噪比下的空域分辨性能有了很大提升。

为验证该算法在实际水声环境中的有效性, 本文采用某型水下航行体的实航数据进行验证, 试验条件说明如下: 信源为一个宽带舰船辐射噪声源, 带内总声级 141 dB, 目标距离 8 900 m, 信源方向 18° , 验证结果如图 8 所示。

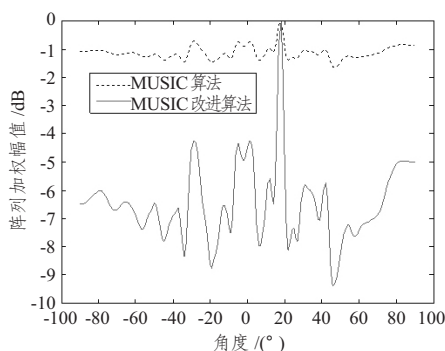


图 8 实航验证图

Fig. 8 The verification figure of the reality navigation data

验证结果显示, 在经典算法已经不能很好的估计出信源方向时, 改进后的算法不仅准确的估计出了信源方向 (18°), 同时旁瓣与主瓣峰值相差约 4 dB 左右, 可以满足声呐自主检测域 3 dB 的数值要求, 同时主瓣宽度也相应的变窄, 证明了该算法的有效性。

本文同时选取某水下航行体带内总声级 150 dB, 目标距离 8 900 m。信源方向 18° , 干扰方向 0° , 数据长度为 4 s 的某次实航数据进行算法的对比验证分析, 验证结果如图 9 和图 10 所示。

通过图 9 和图 10 的多次验证可看出, 在信噪比较低的情况下, 传统算法对于目标以及干扰的分辨力很低, 峰值比仅约有不到 2 dB 的差值, 而该改进后的算法则有约 5 dB 的峰值差, 可以满足被动探测的需要。

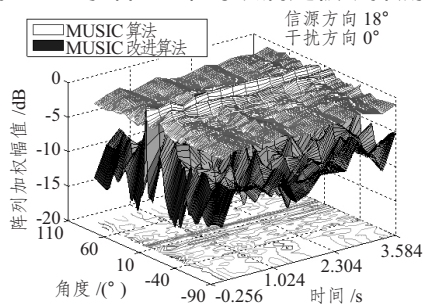


图 9 实航数据验证结果三维视图

Fig. 9 The 3D verification figure of the reality navigation data

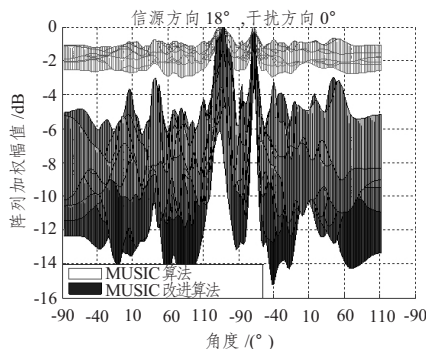


图 10 实航数据验证结果正视图

Fig. 10 Front view of the reality navigation data verification results
因此通过实航数据的验证分析, 证明改进后的算法无论在分辨能力还是在适用条件上均有较大提高。

5 结 语

本文在研究基于 MUSIC 算法的水声宽带信号 DOA 估计的基础上, 进一步研究了某型水下航行体的实航数据, 并对 MUSIC 算法进行改进, 使之能在较低信噪比条件下, 得到良好的方向估计。计算机仿真以及实航数据验证表明: 该算法在方向估计上具有准确性、高分辨性以及更广的适用范围。

参考文献:

- [1] 田坦, 刘国技, 孙大军. 声呐技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社 2006: 63 - 65.
TIAN Tan, LIU Guo-ji, SUN Da-jun. Sonar technology [M]. Harbin: Harbin Engineering University press 2006: 63 - 65.
- [2] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter spectral estimation [J]. In Proc. RADCS spectrum Estimation Workshop, 1979. 10. or IEEE Trans, 1986, AP - 34(3): 276 - 280.
- [3] 张小飞, 汪飞, 徐大专. 阵列信号处理的理论和应用 [M]. 北京: 国防工业出版社 2010: 78 - 83.
ZHANG Xiao-fei, WANG Fei, XU Da-zhuan. Theory and application of array signal processing [M]. Beijing: National Defence Industry Press 2010: 78 - 83.
- [4] WAX M, SHAN T J, KAILATH T. Spatio-temporal spectral analysis by eigenstructure methods [J]. IEEE Trans. on ASSP, 1984, 32(4): 817 - 827.
- [5] 白梅. 宽带恒定束宽波束形成方法研究 [D]. 2008: 6 - 12.
BAI Mei. Method of wideband constant beam width beamforming [D]. 2008: 6 - 12.
- [6] 赵拥军, 李冬海, 赵闯, 等. 宽带阵列信号波达方向估计理论与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社 2013: 65 - 84.
ZHAO Yong-jun, LI Dong-mei, ZHAO Chuang, et al. Wideband array signal direction of arrive estimation theory and methods [M]. Beijing: National Defence Industry Press 2013: 65 - 84.