

一种基于中心矩的波束形成算法

谷新禹^{1,2}, 李秀坤^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 高分辨水下目标探测一直是水声信号处理中的重要课题之一. 然而许多高分辨算法如 MUSIC, ESPRIT 需要对信源数进行预估, 估计的精确度对算法性能影响很大, 制约了算法的实用性. 本文提出了一种新的高分辨方位估计算法, 中心矩波束形成算法. 该方法利用了加权基元信号的各阶中心矩, 无需先验信息. 本文详细论述了中心矩波束形成算法的原理, 对比其他算法指出了该算法性能上的优势. 计算机仿真实验表明: 中心矩波束形成算法拥有良好的分辨率和旁瓣级, 与理论分析的结论一致.

关键词: 水下目标探测; 中心矩; 波束形成; 高分辨

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)07-1374-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.07.020

Beamforming Algorithm Based on Central Moment

GU Xin-yu^{1,2}, LI Xiu-kun^{1,2}

(1. *Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;*

2. *College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China*)

Abstract: The high-resolution underwater target detection has always been one of the important issues in the underwater acoustic signal processing. However, many of the high-resolution algorithms, such as MUSIC ESPRIT, suffer from poor estimation of the signal numbers which makes the direction-of-arrival (DOA) performance bad. A new high-resolution DOA method is proposed which makes use of the central moment without the prior information. The principle of the new method is explained and the advantage over other algorithms is discussed. Simulation result shows that the performance of proposed method which has good resolution and low sidelobe level is close to the conclusions of the theoretical analysis.

Key words: underwater target detection; central moment; beamforming; high-resolution

1 引言

已有的声呐大多采用常规波束形成技术(CBF, Conventional Beamforming)进行目标方位估计, CBF 算法具有良好的鲁棒性, 并且可以采用基于 FFT 的快速算法实现, 因此广泛适用于实际工程应用. 但是 CBF 算法的空间分辨率受阵列孔径限制, 即存在“瑞利限”的制约, 对于空间上分布较近的两个目标源无法分开, 因而无法满足现代声呐对于高精度目标方位估计的要求. 还有一类方位估计技术由于突破了“瑞利限”的限制, 而被称为高分辨类方位估计技术. 这类方法在获得高的空间分辨率的同时, 对于信号模型和系统工作环境的要求也十分严格. 当实际信号模型与理想条件失配或工作环境信噪比较低时^[1], 高分辨类波束形成方法的工作性能将严重下

降. 这些特点都严重制约了高分辨类波束形成技术在实际声呐系统中的应用.

高分辨算法大致可分为两类, 一类是以 MUSIC 为代表的子空间分解类算法, 该类算法要求明确噪声或信号子空间, 因此对信源数非常敏感; 另一类是以最大似然算法为代表的子空间拟合类算法, 该类算法精确度较高, 但运算量较大. 近些年, 人们提出了一些新想法. 文献[2]利用子阵分割对宽带高分辨算法进行了研究. 文献[3]引入了压缩传感理论, 用重加权的方式提高了分辨率和估计精度. 文献[4]提出了一种基于稀疏重建理论的高分辨算法, 原理是将波束形成看作欠定的线性方程, 通过解方程的形式获得高精度的 DOA 参数. 在信号源数目已知情况下, 能够分辨相干信号源并对空间方位相近的目标保持高分辨率. 但在无法获得信源数的先验

信息时,性能急剧下降.文献[5]将信号方位估计问题看做一个最优化问题,通过应用内点方法进行二阶锥规划来得到高分辨率的空间谱.文献[6]针对高分辨算法对失配较为敏感的问题,利用信号能量在波束空间的分布作为约束条件,设计出稳健自适应波束形成器,较好地改善了高分辨算法的实用性.文献[7]提出了一种基于最差条件下的稳健自适应波束形成方法,同样是在失配的条件下获取最优性能.虽然这些方法都能获得较高的分辨力,但它们大多仍利用了空间分解的手段.

本文提出了一种新的高分辨波束形成方法,和以往高分辨算法不同之处在于该算法利用了基阵接收信号加权后的统计信息中心矩,这就避免了受到信源数预估精度的限制.对于中心矩算法,在导向矢量和信源方向匹配时,结果是一个逼近零的量,参考 MUSIC 算法可知空间谱在信源方向会产生“针状”的谱峰,其他区域则较为平坦^[8].

2 中心矩波束形成算法原理

CBF 是通过对各基元信号加权并求和,扫描到功率最大值方向为信号来向.我们令信源信号复振幅为 g_0 ,基元接收信号为 x_i ,信源信号在被基阵接收的同时会被加载一个导向矢量,假设均匀线阵间距为 d ,阵元数 N ,信源信号入射方位角为 θ ,此方位角是与基阵法线方向的夹角,则各个基元与参考基元的波程差为

$$\tau_i = \frac{1}{c}(i-1)d\sin\theta \quad (1)$$

则第 i 个阵元的复振幅为

$$x_i = g_0 e^{-j\omega\tau_i} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

设第 i 个阵元的权值为 w_i ,那么整个基阵的阵元加权输出就可以表示为

$$Y_0 = \sum_{i=1}^N w_i g_0 e^{-j\omega\tau_i} = \sum_{i=1}^N w_i g_0 e^{-j(i-1)\beta} \quad (3)$$

式中 $\beta = 2\pi d\sin\theta/\lambda$, λ 为入射信号波长.由式(3)可见,输出 Y_0 只与导向矢量和各基元所加权值的乘积有关,令

$$m_i = w_i e^{-j(i-1)\beta} \quad (4)$$

$$\mathbf{M} = [m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_N] \quad (5)$$

则 CBF 输出为

$$Y_0 = g_0 \sum_{i=1}^N m_i = Ng_0 E(\mathbf{M}) = Ng_0 \mu_1 \quad (6)$$

其中 μ_1 为 \mathbf{M} 的均值,即 \mathbf{M} 的一阶原点矩.当扫描方位与信源位置相匹配时, $w_i = e^{j(i-1)\beta}$, 此时 $m_i = 1$, $Y_0 = Ng_0$, 输出最大.常规波束形成等同于对向量 \mathbf{M} 求一阶原点矩.当扫描到目标方位时,原点矩最大;没有扫到,则原点矩出现一系列较小的值.常规波束形成是对向

量 \mathbf{M} 求和,使信源信号累加,得到一阶原点矩,这样所形成的波束较宽,旁瓣较高,不利于高分辨估计.采用另一种统计参量中心矩则会较好地改善这一状况.

下面我们重点阐述中心矩波束形成(CMBF, Central Moment Beamforming)的概念:对 \mathbf{M} 做中心矩运算,则

$$Y_k = Ng_0 E\{\mathbf{M} - E(\mathbf{M})\}^k = Ng_0 \nu_k \quad (7)$$

式中 ν_k 为 k 阶中心矩.将式(5)带入式(7),并对求和项取绝对值,得

$$Y_k = g_0 \sum_{i=1}^N \left| m_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i \right|^k = g_0 \sum_{i=1}^N |m_i - \mu_1|^k \quad (8)$$

当扫描方位与目标位置相一致时, $m_i = w_i * e^{-j(i-1)\beta} = 1$, 则 $\mathbf{M} = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]$, 输出 $Y_k = 0$; 不一致时, $Y_k \neq 0$, 这些方位形成旁瓣区域.

对于上述 CMBF 算法,有以下几点需要注意:

(1) 由于 CMBF 算法是对单快拍数据进行运算,所以需要在运算结束后对所有快拍运算结果做统计平均,这样可以有效抑制噪声干扰,提高估计精度.

(2) 必须对式(8)中的求和项取绝对值,否则复数的引入会使中心矩产生多个零点甚至负值.

(3) 因为 CMBF 算法是求极小值运算,即 DOA 是以搜索功率最小点来实现的,因此为了方便观测应取其倒数,即 $P_{\text{CMBF}} = 1/Y_k$. 由于扫描方位与导向矢量匹配时,式(8)趋近于零,所以空间谱 P_{CMBF} 在此方向会产生很尖的谱峰,而在其他区域相对平坦.

3 阵列输出分析

下面对 CMBF 的输出表达式进行分析,将式(4)代入式(8),令 $w_i = 1$, 可得

$$Y_k = g_0 \sum_{i=1}^N \left| e^{j(i-1)\beta} - \frac{1}{N} e^{j\frac{N-1}{2}\beta} \frac{\sin \frac{N\beta}{2}}{\sin \frac{\beta}{2}} \right|^k \quad (9)$$

为方便运算,令 $A = \sin \frac{N\beta}{2} / N \sin \frac{\beta}{2}$, 则

$$Y_k = g_0 \sum_{i=1}^N \left| e^{j(i-1)\beta} - A e^{j\frac{N-1}{2}\beta} \right|^k = g_0 \sum_{i=1}^N \left[1 + A^2 - 2A \cos \beta \left(i - \frac{N+1}{2} \right) \right]^{\frac{k}{2}} \quad (10)$$

对于各个求和项

$$S_i = \left[1 + A^2 - 2A \cos \beta \left(i - \frac{N+1}{2} \right) \right]^{\frac{k}{2}} = l_i^k \quad (11)$$

其几何意义为两边及夹角固定的三角形第三边长的 k 次幂.

如图 1 所示,三角形以 $1, A$ 为两边(且 $|A| \leq 1$), $\beta \left(i - \frac{N+1}{2} \right)$ 为夹角($A < 0$ 时,夹角为 $[\pi - \beta \left(i - \frac{N+1}{2} \right)]$).

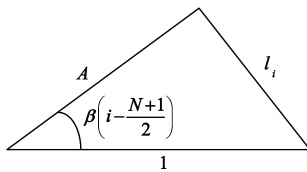


图1 求和项几何意义

+ 1)/2)], 则 l_i 为第三边长, 式(10)可以表示为

$$Y_k = g_0 \sum_{i=1}^N l_i^k \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 输出 Y_k 为边长 l_i 的 k 次幂的和, 只有当 $\beta=0, A=1$ 时, $l_i=0$; 其他情况下, l_i 取值应该在 1 左右。

仿真阵列条件为 16 元均匀线阵, 阵元间距为半波长. 分别进行 1、4、6、8 阶 CBF 与 CMBF 的对比, 仿真结果如图 2 所示。

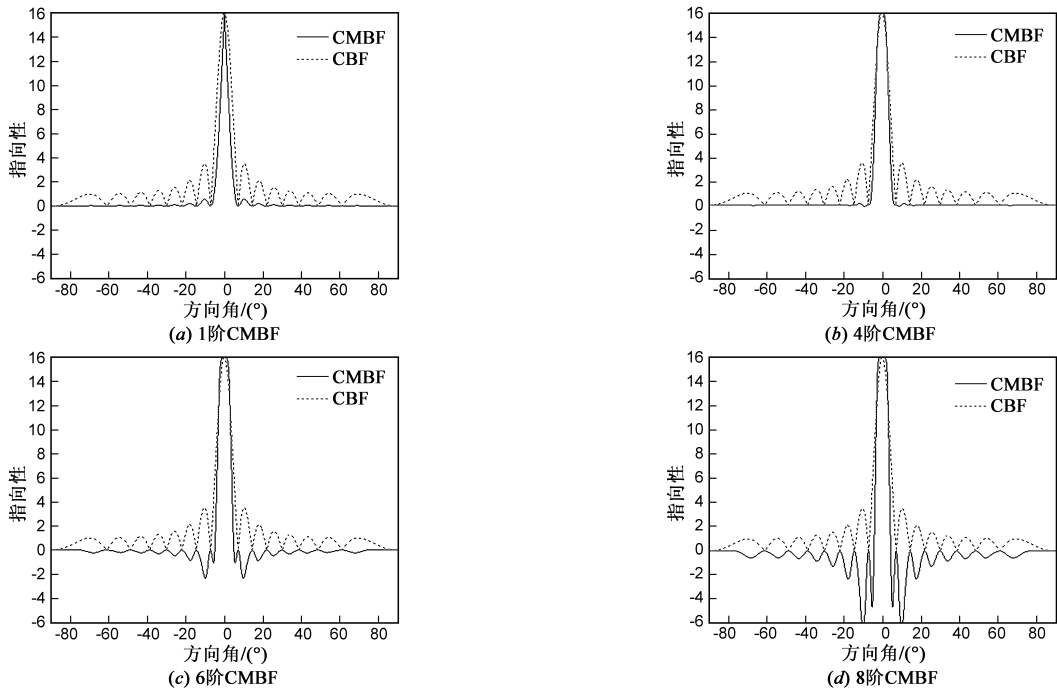


图2 各阶CMBF与CBF的输出对比图

从表面上看, k 的增大导致旁瓣震荡加剧, 主瓣不再尖锐, 分辨力降低, 但是我们要注意上图只是输出对比图, 而且只是数值对比而不是取对数后的谱对比. 在实际环境中, 接收数据带有噪声及干扰, 在这种情况下, 高阶 CMBF 目标方向的峰值数据会比低阶 CMBF 更趋近于零, 并且旁瓣级将远低于低阶的, 这样在空间谱中表现为尖锐的主瓣, 较高的分辨力。

4 算法性能仿真分析

4.1 CMBF 算法性能比较

实验仿真条件: 阵列为 16 元均匀线阵, 两个远场独

在这里要注意的是, 由于 CMBF 在 0° 达到最小值 0, 无法取倒数, 因此为了与 CBF 作对比将其取负值, 倒置; 其次, 上图是对输出的数值作对比, 并没有取对数进行谱对比, 这是因为对于 CMBF 输出来说, 其最小值 0 的对数表示是 $-\text{Inf}$, 即无穷小, 比较起来没有意义。

从图中可以看出 CMBF 的旁瓣要远低于 CBF, 且随着阶数增加, 旁瓣逐渐变低. CMBF 的主瓣宽度要小于 CBF, 1 阶 CMBF 主瓣宽度最小, 峰值最尖锐, 随着阶数的增加, 主瓣宽度变宽, 峰值变钝. 这均和 l_i^k 的振幅变化有关, 对于 x^k , 当 $x > 1$ 时, x^k 值随 k 增大而增大; 当 $x < 1$ 时, x^k 值随 k 增大而减小. 因此随着 k 增大, 旁瓣区域震荡加剧, 振幅开始远大于 1, 导致旁瓣逐渐变负且越来越低; 而主瓣区域由于 $l_i \ll 1$, 导致区域内幅值随 k 增大急剧减小, 故而峰值区域比较钝。

立窄带信号, 信号方向为 0° 和 30° , 噪声为高斯白噪声. 阵元间距 $\lambda/2$, 快拍数为 1000. 仿真结果如图 3 所示。

图 3 中 (a) 和 (b) 分别是 $\text{SNR} = 20\text{dB}$ 和 $\text{SNR} = 0\text{dB}$ 下, 4、8、12 阶 CMBF 与 CBF 和 MUSIC 的性能对比. 从图中可以看出, CMBF 分辨率比 CBF 优越, 且均有着较为平坦的旁瓣区域, 便于信号检测. 在高输入信噪比下, CMBF 对 MUSIC 并无明显优势. 但在低信噪比下 CMBF 的分辨率和旁瓣级要优于 MUSIC. 随着阶数的增加, CMBF 的分辨率逐渐提高, 旁瓣降低, 但旁瓣的起伏也开始变得剧烈。

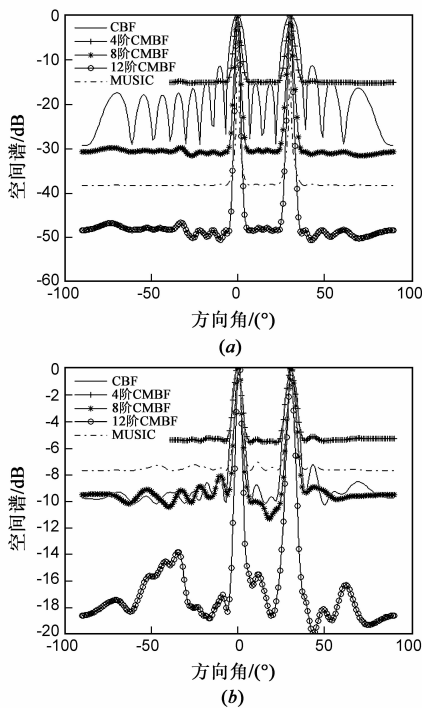


图3 各阶CMBF性能比较

4.2 CMBF 算法分辨力分析

实验仿真条件:阵列为 12 元均匀线阵,两个远场独立窄带信号,信号方向为 $-2^\circ, 2^\circ$. 阵元间距 $\lambda/2$,快拍数为 1000,噪声为高斯白噪声,信噪比 20dB. 仿真结果如图 4 所示.

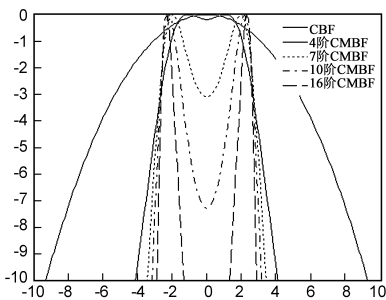


图4 各阶CMBF分辨力分析

图 4 为 4、7、10、16 阶 CMBF 算法的分辨力对比. 在这里定义分辨力的界限如下^[9]: 令两个入射信号的谱峰的均值与入射信号角度均值的谱峰相比较, 即 $E[\hat{P}(\theta_m)]$ 和 $E\{[\hat{P}(\theta_1) + \hat{P}(\theta_2)]/2\}$ 相比较. 式中, $\theta_m = (\theta_1 + \theta_2)/2$. 那么当前者小于后者时, 可以分辨两个相近信源; 当前者大于后者时, 无法分辨两个相近信源.

从图中可以看出, CMBF 算法能够分辨两个空间位置相近的信源, 并且随着阶数的增加, $E[\hat{P}(\theta_m)]$ 的值开始大幅下降, 方位估计的准确度也得到提升. 也就是说, CMBF 算法分辨力随着阶数增加而升高. 当然, 阶数

不可能被无限提高, 一定会有个限度, 这个限度可能跟噪声环境有关, 这有待后续研究来确定.

5 结论

本文提出了一种新的基于统计参量中心矩的波束形成算法: 中心矩波束形成算法. 该算法借鉴了常规波束形成的理论基础, 即常规波束形成是用加权后基元数据的均值来考察目标方位, 而 CMBF 是用中心矩, 也就是偏离均值的程度来考察目标方位. 经过仿真分析, 说明 CMBF 有着较高的分辨力和良好的旁瓣级, 并且随着中心矩阶数的增加性能不断提高. 对比 MUSIC 算法, 高阶 CMBF 旁瓣更低, 在低信噪比下分辨率也比 MUSIC 高, 而且无需对信源数进行预估, 提高了实用性.

由于 CMBF 利用了数据的各阶中心矩并取其倒数, 因此阶数越高越容易出现不同目标谱峰峰值相差较大, 以及估计精度不准确的问题, 因此需要对算法的数值计算做进一步优化. 除此之外, 算法在色噪声、海洋环境噪声、混响等背景下的性能都需要进一步研究.

参考文献

- [1] 李秀坤, 李婷婷, 杨士戎, 朴胜春, 黄金城. 一种提高基阵分辨率和增益的快速波束形成方法 [P]. 中国专利: CN200910072468.0 [P]. 2009-12-23.
- [2] Biao Tian, Haining Huang, Yu Li. A high-resolution DOA estimation algorithm based on sub array partition [A]. Proceedings of 2009 Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System [C]. Piscataway, US: IEEE Press, 2009. 123 - 126.
- [3] X Y Chen, G H Zhao, T J Zhang, G M Shi. High resolution beamforming with promoted sparsity via reweighted methodology [A]. Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar [C]. Beijing: The Chinese Institute of Electronics, 2011. 1417 - 1420.
- [4] Wen Xu, Huihong Shi, Huiquan Zhang. Sparse-reconstruction-based high resolution beamforming and its application to multi-beam systems [A]. Proceedings of OCEANS, 2012-Yeosu [C]. Daejeon, KOR: KAOSTS, 2012. 1 - 4.
- [5] D Malioutov, M Cetin, A Willsky. A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(8): 3010 - 3022.
- [6] 徐晓男, 马启明, 杜栓平. 波束空间能量约束的稳健自适应波束形成 [J]. 声学学报, 2013, 38(3): 258 - 264. XU Xiaonan, MA Qiming, DU Shuanping. Robust adaptive beamforming based on beam space power constraint [J]. Acta Acustica, 2013, 38(3): 258 - 264. (in Chinese)
- [7] Vorobyov S A, Gershman A B, Luo Z Q. Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization [J].

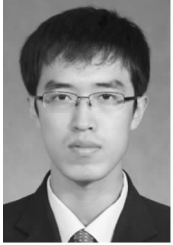
IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(2): 313 – 324.

[8] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter es-

timation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276 – 280.

[9] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 359 – 365.

作者简介



谷新禹 男. 1986 年生于黑龙江哈尔滨. 哈尔滨工程大学水声工程学院硕士研究生, 研究方向为阵列信号处理.

E-mail: ggw516@163.com



李秀坤 女. 1962 年 12 月生, 黑龙江哈尔滨人. 教授, 博士生导师. 2000 年获哈尔滨工程大学工学博士学位, 现为哈尔滨工程大学水声工程学院副院长. 主要从事水下目标识别、阵列信号处理等方面的研究工作.

E-mail: lixiukun@hrbeu.edu.cn