

三元组线列阵分裂波束目标方位跟踪方法

尹子源, 谭君红, 周胜增

(上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

摘要: 针对单线阵进行弱目标跟踪时容易受到强目标影响的问题, 将三元组线列阵进行分裂波束定向, 可提高对弱目标的方位跟踪能力。通过将三元组线列阵等分为两个三元组子阵, 对两个三元组子阵分别进行心形波束形成, 利用各自心形波束输出进行分裂波束处理得到目标方位。与常规单线阵分裂波束目标跟踪方法相比, 该方法不但能给出跟踪目标的左右舷信息, 同时提高了不同舷侧存在多目标时的目标跟踪能力。对海试数据的实际处理结果表明, 三元组线列阵分裂波束定向时提高了对多目标的方位跟踪能力。

关键词: 水听器三元组; 心形波束形成; 分裂波束; 方位跟踪

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-05-0425-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.05.004

A split-beam azimuth tracking method of triplet linear array

YIN Zi-yuan, TAN Jun-hong, ZHOU Sheng-zeng

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: A split-beam bearing track method of triplet linear array is proposed in the paper, which can be used to improve the the weak target tracking performance of a single linear array. The triplet linear array is equally divided into two same sub-triplet linear arrays, then the heart-shaped beamforming is carried out respectively for the two sub-triplet linear arrays, and the target azimuth is obtained by using split-beam processing with the respective heart-shaped beam outputs. This method can not only give the target's port-starboard information, but also improve the performance of tracking target when there are many targets on different sides. Results of sea trial show that the proposed method has an excellent multi-target tracking ability.

Key words: hydrophone triplet; heart-shaped beamforming; split-beam; azimuth tracking

0 引言

分裂波束处理作为经典阵列处理技术, 其定向精度接近于克拉美罗下界, 不需增加太大的运算量即可显著提高声呐系统的测向精度, 因此在水声中得到了深入研究和应用^[1-4]。目前的研究以线阵分裂波束为主, 而线阵存在左右舷模糊问题, 因此基于线阵的分裂波束处理同样受到限制。90 年代初, Jean Bertheas 等^[5]首次采用三水听器组的阵元结构来解决左右舷分辨问题。Y Doisy 等^[6]提出了基于三水听器组的利用噪声相关性的左右舷分辨方法。将三元水听器组作为一个小基阵, 利用入射信号到达各个阵元的时延差和噪声相关模型, 在左右舷抑制比最大准则下可以形成心形指向性图, 从而实现左右舷分辨^[6-9]。Erdal Mehmetcik^[10]将三元组线列阵输出的目标方位和全球定位系统+惯性测量单元

(Global Positioning System+Inertial Measurement Unit, GPS+IMU)数据进行比较研究, 并给出了误差的主要原因。

鉴于三元组线列阵的优势, 提出了将分裂波束处理和三元组线列阵相结合的方法, 将该方法用于对目标方位的跟踪, 旨在提高不同舷侧均存在目标时的目标方位跟踪能力。

1 分裂波束处理

设均匀线阵阵元数为 N , 阵元间距为 d , 声速为 c , 入射声波频率为 f , 入射波与线阵之间的夹角为 θ 。将线阵等分为子阵 1 和子阵 2 两个子阵, 如图 1 所示。

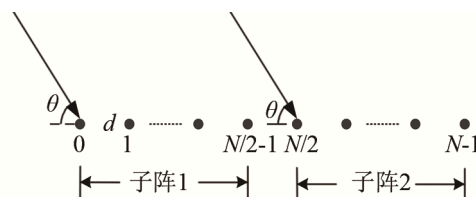


图 1 分裂子阵划分

Fig.1 The partition of two split sub-arrays

收稿日期: 2017-09-12; 修回日期: 2017-12-04

作者简介: 尹子源(1982-), 男, 黑龙江五常人, 高级工程师, 研究方向为拖曳式线列阵。

通讯作者: 谭君红, E-mail: tanjunhong621@163.com

以 0 号阵元为参考阵元，则第 $n(n=0,1,\dots,N-1)$ 号阵元的接收信号相对于参考阵元接收信号的时间延迟为

$$\tau_n = nd \cos \theta / c, \quad 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad (1)$$

假设各阵元接收的复信号幅度为 1，省略时间因子 $e^{j2\pi ft}$ ，则第 n 个阵元的接收信号为

$$s_n = e^{-j2\pi f \tau_n} = e^{-jn\phi} \quad (2)$$

式中， $\phi = 2\pi fd \cos \theta / c$ 为相邻阵元的相位差。

将均匀线阵等分成对称子阵后，设预成主波束方位为 θ_0 ，记 $\phi_0 = 2\pi fd \cos \theta_0 / c$ ，则子阵 1 和子阵 2 的归一化波束输出 R_1 和 R_2 分别为

$$R_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N/2-1} e^{-jn(\phi-\phi_0)} \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{2}{N} \sum_{n=N/2}^{N-1} e^{-jn(\phi-\phi_0)} = e^{-j\frac{N}{2}(\phi-\phi_0)} \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N/2-1} e^{-jn(\phi-\phi_0)} = e^{-j\frac{N}{2}(\phi-\phi_0)} R_1 \quad (4)$$

子阵 1 和子阵 2 波束输出相位差 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi = N\pi fd (\cos \theta - \cos \theta_0) / c \quad (5)$$

利用相位差 $\Delta\phi$ 可得目标的实际方位估计值 $\hat{\theta}$ ：

$$\hat{\theta} = \arccos\left(\frac{\Delta\phi c}{\pi f N d} + \cos \theta_0\right) \quad (6)$$

2 三元组线列阵分裂波束处理

2.1 三元组线列阵左右舷分辨原理

图 2 给出了三元组水听器的布局结构图， θ 为入射信号与 y 轴的夹角即方位角， ϕ 为入射信号在 xoz 平面内的投影与 z 轴的夹角，在垂直平面内三个阵元的位置分别是：

$$(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = (0, -2\pi/3, 2\pi/3) \quad (7)$$

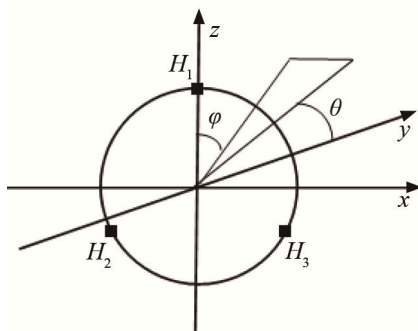


图 2 水听器三元组结构
Fig.2 The structure of hydrophone triplet

三元组阵列接收信号中的噪声包含非相关噪声和相关噪声两大类，因此三元水听器的噪声相关矩阵 R_n 可以分解为两部分：

$$R_n = \sigma_c^2 R_c + \sigma_u^2 I = \sigma_c^2 \begin{bmatrix} 1+\sigma^2 & \alpha & \alpha \\ \alpha & 1+\sigma^2 & \alpha \\ \alpha & \alpha & 1+\sigma^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， $\sigma^2 = \sigma_u^2 / \sigma_c^2$ 为非相关噪声与相关噪声的方差比， α 为相邻阵元间海洋背景噪声的相关系数。

根据信号检测理论，在最大似然比准则下，可得到三元组最优波束形成器系数 w 的一般表达式为

$$w = \frac{R_n^{-1} v}{v^H R_n^{-1} v} \quad (9)$$

式中， v 对应两个旋转向量 $v_+ = v(\theta, \pi/2)$ 和 $v_- = v(\theta, -\pi/2)$ ，分别为左右两个模糊方向，相应的波束形成权系数为 w_+ 和 w_- ，利用 w_+ 和 w_- 即可以得到左右舷波束输出。

图 3 给出了不同 σ^2 条件下的三元组左右舷分辨性能。

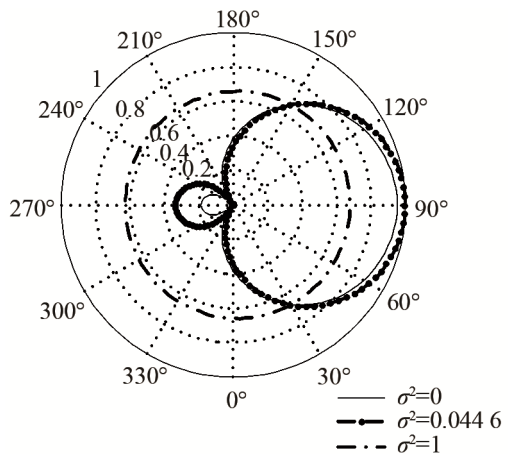


图 3 理论计算的水听器三元组指向性图
Fig.3 The calculated directivity pattern of a hydrophone triplet

2.2 三元组线列阵分裂波束方位估计

三元组线列阵分裂波束方位估计需要将三元组线列阵等分为两个三元组线列阵子阵，对两个子阵的左右舷波束输出信息分别进行互谱处理，得到左右舷相位差，根据相位差可估计左右舷侧目标的方位值。具体流程如图 4 所示。

3 试验数据处理

试验数据由拖曳式三元组线阵列得到，其中三元组线阵列结构为 24×3 。在试验过程中，除本舰外，右舷 60° 附近始终存在目标 A，目标 B 自 15 s 开始出现，位于左舷 75° 。图 5 给出了线阵输出的时间方位历程图，图 6 给出了 50 s 对应的方位谱，由图 6 可以看出，目标 B 能量比目标 A 高约 8 dB。

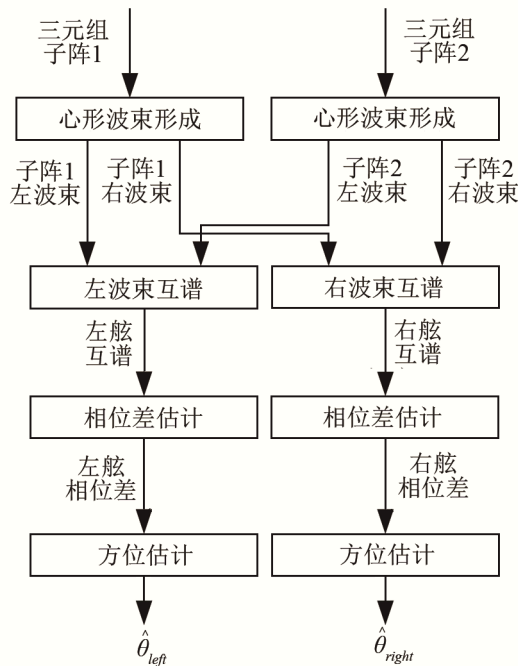


图 4 三元组线列阵分裂波束处理流程图
Fig.4 Flow-process diagram of split-beam processing for triplet linear array

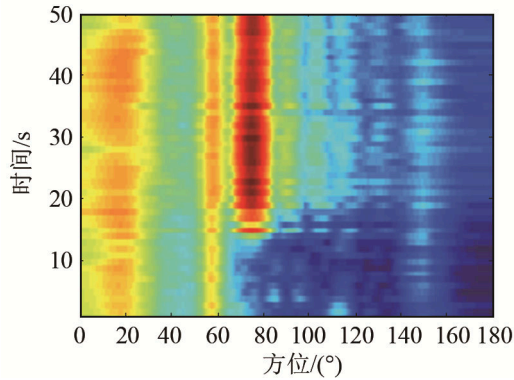


图 5 单线阵输出时间方位历程图
Fig.5 Azimuth-time recording of linear array

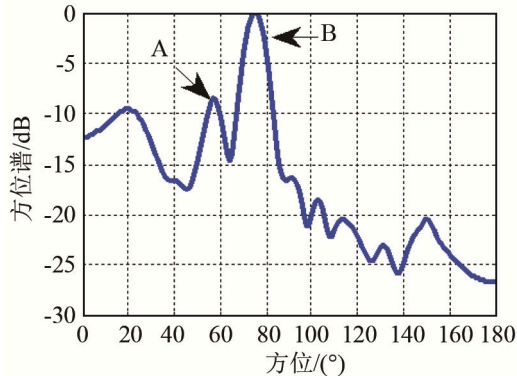


图 6 单线阵输出方位谱
Fig.6 The azimuth spectrum of a single linear array

图 7 给出了单线阵分裂波束目标方位跟踪结果，可以看出，在 75° 方向强目标 B 出现后，弱目标 A 丢失。图 8 给出了三元组线列阵分裂波束目标

方位跟踪结果，在左舷，目标 B 出现后可以正确跟踪目标 B；在右舷，弱目标 A 的方位跟踪始终正确，没有受到强目标 B 的干扰而丢失。

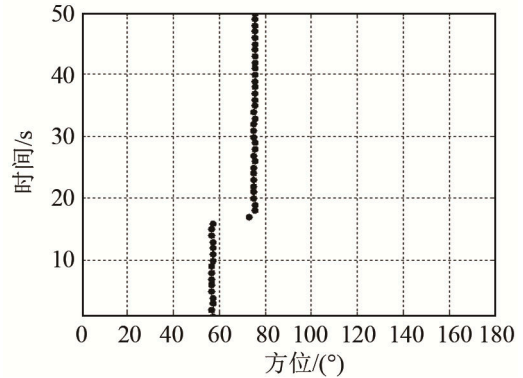


图 7 单线阵分裂波束处理结果
Fig.7 Results of split-beam processing for a single linear array

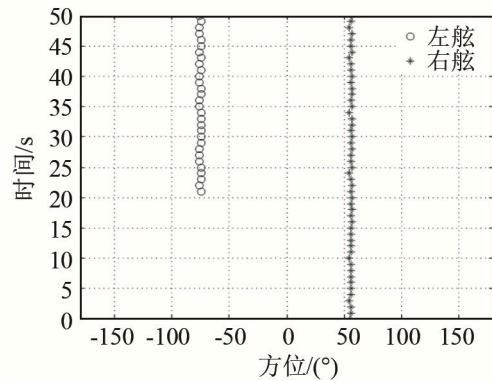


图 8 三元组线列阵分裂波束处理结果
Fig.8 Results of split-beam processing for a triplet linear array

4 结论

本文将分裂波束处理扩展应用到三元组线列阵中，用于对不同舷侧的目标进行分别跟踪，给出了三元组线列阵分裂波束信号处理的详细流程，并对海试数据进行处理和分析。三元组线列阵分裂波束处理能够正确给出目标的真实方位和左右舷信息；同时该算法能够抑制不同舷侧多目标的相互干扰，可以有效提高对水下多目标的跟踪能力。

参 考 文 献

- [1] STERGIPOULOS S, ASHLEY A T. An experimental evaluation of split-beam processing as a broadband bearing estimator for line array sonar systems[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1997, 102(6), 3556-3563.
- [2] MILES D A, KIRK D, CLARKE T. A statistical analysis of the detection performance of a broadband splitbeam passive sonar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(4): 986-996.
- [3] 李启虎, 朴大志. 微弱信号源的和波束定向方法与分裂波束定向方法的性能比较[J]. 应用声学, 2007, 26(3): 129-134.

LI Qihu, PIAO Dazhi. Comparison of bearing accuracy of sum

- beam and split-beam in weak signal detection[J]. Applied Acoustics, 2007, 26(3): 129-134.
- [4] 钱韬. 线阵分裂波束处理技术在水声探测中的应用[J]. 声学技术, 2015, 34(6): 552-555.
QIAN Tao. Application of split-beam processing of line array in underwater acoustics detection[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(6): 552-555.
- [5] BERTHEAS J, LOUBET V. Linear hydrophonic antenna and electronic device to remove right/left ambiguity, associated with this antenna[P]. United States Patent: 5058082. 1991.
- [6] DOISY Y. Port-starboard discriminate on performances on active towed array systems[C]/UDT 1995 Europe: 125-129P.
- [7] WAN MIERLD G W M, BEERENS S P, BEEN R, et al. Port/starboard discrimination on hydrophone triplets in active and passive towed arrays[C]/UDT 1997 Europe: 176-181.
- [8] 杜选民, 朱代柱. 拖线阵左右舷分辨技术的理论分析与实验研究[J]. 声学学报, 2000, 25(5): 395-402.
DU Xuanmin, ZHU Daizhu. Theoretical analysis and experimental research on port/starboard discrimination in towed line array[J]. Acta Acoustic, 2000, 25(5): 395-402.
- [9] GROEN J, S P BEERENS, R BE, et al. Adaptive port-starboard beamforming of triplet sonar arrays[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(2): 348-359.
- [10] ERDAL M. Comparison of detected target bearings from a triplet towed array with GPS and IMU data[C]/UDT 2015 Europe, 2446-2457.

上海市声学学会第十届理事会一次会议纪要

上海市声学学会于 2018 年 10 月 19 日在上海市科学会堂召开了第十次会员代表大会, 并进行了换届选举。出席会议的代表共计 135 名, 符合章程规定。

会议由第九届理事会胡兵副理事长主持, 大会通过了第九届理事会孟昭文理事长的工作报告、胡长青副理事长的关于修改学会章程的报告、毛东兴副理事长的财务报告及财务审计报告。

大会以无记名等额投票方式选举产生了第十届理事会。理事会由 35 名理事组成, 名单如下 (按专业委员会):

工业超声: 周红生, 徐峥, 项延训, 程茜(女), 李国荣, 他得安;
水声: 胡长青, 许伟杰, 高建农, 杜选民, 范军;
建声噪声: 杨志刚, 何金龙, 王旭, 莫方朔, 宋拥民, 扬程, 李杨, 张玮晨(女);
医学超声: 胡兵, 汪源源, 白景峰, 李超伦(女), 郑元义, 张波(女), 申锸(女);
电声: 严雷, 马为民, 曹晋辉, 毛东兴, 石敏, 池文忠;
生理心理声学: 时海波, 徐亚平, 张剑宁。

大会结束后, 召开了第十届理事会第一次会议, 应到理事 35 名, 实到理事 32 名, 委托 3 名, 符合章程规定。会议由龚农斌教授主持, 会议以无记名等额投票方式, 选举产生了理事长、副理事长和秘书长:

胡长青, 担任学会第十届理事会理事长;
胡兵、程茜、高建农, 担任学会第十届理事会副理事长;
毛东兴, 担任学会第十届理事会秘书长。

经第十届理事会提名推荐, 聘请龚农斌担任学会办公室主任, 丁玉薇担任学会副秘书长。

会议经无记名等额投票方式, 选举产生了理事会常务理事, 共 9 人, 名单如下:

胡长青、胡兵、程茜、高建农、毛东兴、周红生、杨志刚、严雷、时海波。
第十届理事会还讨论通过了各专业委员会(分支机构)的负责人, 分别为:

工业超声专业委员会主任: 周红生;
水声专业委员会主任: 胡长青(兼);
建声噪声专业委员会主任: 杨志刚;
医学超声专业委员会主任: 胡兵(兼);
电声专业委员会主任: 严雷;
生理心理声学专业委员会主任: 时海波。

根据学会章程的有关要求, 第十届理事会决定由正副理事长、秘书长中的党员组成党的工作小组:

党小组组长: 胡长青(理事长);
党小组成员: 胡长青、胡兵、程茜、高建农; 党建联系人: 丁玉薇。

理事会推举产生了学会监事会(3人): 监事长, 钱梦騷; 监事, 寿文德、孟昭文。监事会负责监督学会的工作。

会上, 探讨了如何开展学会工作的一些设想。胡长青理事长要求大家要共同努力, 团结各会员单位, 继续组织好学会的学术交流活动, 做好科普活动, 做好会员服务的工作。创品牌、创特色, 希望各方面的工作在历届理事会的基础上更上一层楼。

第十届理事会将继承历届上海市声学学会的优良传统, 在上海市科学技术协会的领导下, 继续努力做好上海市声学学会的各项工作。