第 38 卷 第 2 期
2019 年 3 月

应用声学
Journal of Applied Acoustics

Vol. 38, No. 2
March, 2019

◇ 研究报告 ◇

基于时延估计的双子阵时域波束形成技术

李兰瑞[1†] 章新华[1,2] 李 鹏[2] 刘心语[3]

(1 海军大连舰艇学院水武防化系 大连 116018)

(2 哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

(3 海军大连舰艇学院 大连 116018)

摘要 大孔径拖曳线列阵受舰艇横向机动、洋流影响和水动力影响时会产生一定的阵形畸变，阵形畸变使得波束形成时阵列流型失配，进而降低了目标方位分辨率和阵处理的增益。在无法进行阵形估计时，基于时延估计的双子阵时域波束形成技术将大孔径拖曳线阵分为左右两个子阵分别做波束形成，通过加权广义相关时延估计算法估算对应波束的时延差，再依据估算时延差对左右两个波束进行延时求和得到最终的波束信号。仿真和海试数据证明，相对于全阵直接做波束形成的方法，基于时延估计的双子阵的时域波束形成技术有效提高了目标方位分辨率和阵处理的增益。

关键词 时域波束形成，时延估计，双子阵，阵形畸变

中图法分类号: TB566 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2019)02-0273-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.02.018

Split array time domain beamforming technology based on time delay estimation

LI Lanrui[1] ZHANG Xinhua[1,2] LI Peng[2] LIU Xinyu[3]

(1 *Department of Underwater Weaponry & Chemical Defense, Dalian Navy Academy, Dalian* 116018, *China*)

(2 *School of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *China*)

(3 *Dalian Navy Academy, Dalian* 116018, *China*)

Abstract The large aperture towed linear array will produce certain array distortion when it is affected by ship lateral maneuver, ocean current and hydrodynamic forces. Array distortion makes array flow pattern mismatch in beamforming, which reduces beam resolution and array gain. When we can not estimate the formation, split array time-domain beamforming technology that based on time delay estimation divides large aperture towed linear array into left and right subarrays for beamforming respectively. The delay difference of the corresponding beam is estimated by the maximum likelihood time-delay estimation algorithm. Then, the left and right beam signals are delayed according to the estimated delay difference, and the delayed beam signals are added to get the final beam signal. Simulation and sea trial data show that the time domain beamforming technology based on time delay estimation can effectively improve the target arzimuth resolution and signal gain compared with the whole array direct beamforming method.

Key words Time domain beamforming, Time delay estimation, Split array, Array shape distortion

2018-08-29 收稿; 2018-11-28 定稿

作者简介: 李兰瑞 (1993-), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 研究方向: 水声信号处理。

† 通讯作者 E-mail: 462488530@qq.com

0 引言

拖曳线列阵相对于安装在平台外壳上的舰壳式声呐而言，具有不受载体平台安装尺寸限制、受本平台噪声影响相对较小、具有较大的阵列孔径和较低的工作频段等优势。对于大孔径拖曳线阵，在实际使用中受舰艇横向机动、洋流影响和水动力影响会产生一定的形变[1]。由于阵列形变，对于某θ方向上的来波信号，会导致阵元间的理论声程差和实际声程差不一致。这时，依据理论阵列流形计算出的时延差和真实时延差也会出现差距，不能实现信号的同相叠加，无法获得最大增益，降低了目标方位分辨能力。针对这一问题，目前常采用阵形估计算法估计各阵元的实时位置，柔性长拖曳线阵阵形估计主要有两大类：一类是安装传感器的借助硬件估计阵形的方法；另一类是采用水听器信号进行阵形估计的方法[2]。阵形估计算法在一定程度上还原了阵元的实时位置，对波束形成算法中计算导向矢量具有重要意义。但是阵形估计算法实时性不强，计算量大，并且阵形估计不准确时会引入新的误差。

常规时域波束形成算法存在处理增益低和目标方位分辨能力差的问题，Macdonald和Schultheiss的研究表明双子阵波束形成方法具有接近最优的目标估计性能，能够有效提高对目标的方位分辨能力[3−4]。双子阵波束形成方法在线列阵精确测向中已得到了广泛应用，其中基于左右波束相位差测向的互谱法[5]和对左右波束采取和差运算的超波束形成算法[6]是两种高分辨率的双子阵波束形成方法。但这两种算法均是在频域而非时域进行处理，频域处理方法因在处理上是分块处理，无法输出连续的听音波束信号。

针对以上问题，在无法进行阵形估计时，本文将大孔径拖曳线阵分为左右双子阵分别做波束形成，通过最大似然时延估计算法估算对应波束的时延差，再依据估算时延差对左右波束进行延时求和得到最终的波束信号。仿真和海试数据证明，相对于全阵直接做波束形成的方法，基于双子阵的时域波束形成技术可有效提高阵处理增益和目标方位分辨率。

1 阵形畸变对阵增益的影响

1.1 阵增益

设均匀直线阵总阵元数为$2N$，阵元无指向性，阵元间距为d，目标入射角相对阵列方向夹角为θ，理想条件下，第i个阵元接收信号记为

$$x_i(t) = s_{\theta_i}(t+\tau_i(\theta)) + n_i(t),\quad i=1,\cdots,2N, \tag{1}$$

其中，$\tau_i(\theta) = (i-1)\cdot d\cdot\cos(\theta)/c$为第$i$路阵元信号相对第1号参考阵元的时延差，$n_i(t)$为各自独立的噪声。理想情况下波束形成之后系统输出$D_{理论}(\theta)$为

$$D_{理论}(\theta) = E\left\{\sum_{i=1}^{2N} s_{\theta_i}\left[t+\tau_i(\theta)-\tau_i(\theta_0)\right] + \sum_{i=1}^{2N} n_i[t-\tau_i(\theta_0)]\right\}^2. \tag{2}$$

当$\theta=\theta_0$时，$\tau_i(\theta)=\tau_i(\theta_0)$，$D_{理论}(\theta) = (2N)^2\sigma_s^2 + 2N\sigma_n^2$，其中$\sigma_s^2$为信号功率均方差，$\sigma_n^2$为噪声功率均方差。可以看出信号功率增强了$(2N)^2$倍，而噪声功率增强了$2N$倍。波束形成所带来的增益$G_{s理论}$为[7]

$$G_{s理论} = \frac{(2N)^2\sigma_s^2}{2N\sigma_n^2} \div \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = 2N. \tag{3}$$

通常将空间处理增益取对数转换为

$$G_{s理论} = 10\cdot\lg G_s = 10\cdot\lg 2N. \tag{4}$$

1.2 阵形畸变对阵增益的影响

由于受阵形畸变影响，阵元位置发生偏移进而引入新的随机时延差$\tau_j(\theta)$，第i号阵元实际接收到的信号为

$$x_{\theta_i}(t) = s_{\theta_i}(t+\tau_i(\theta)+\tau_j(\theta)) + n_i(t),\quad i=1,\cdots,2N. \tag{5}$$

此时波束形成输出$D_{实际}(\theta)$为

$$D_{实际}(\theta) = E\left\{\sum_{i,j=1}^{2N} s_{\theta_i}\left[t+\tau_i(\theta)+\tau_j(\theta)-\tau_i(\theta_0)\right] + \sum_{i=1}^{2N} n_i[t-\tau_i(\theta_0)]\right\}^2. \tag{6}$$

$\tau_j(\theta)\neq 0$时，$\tau_i(\theta)+\tau_j(\theta)\neq\tau_i(\theta_0)$，波形失配使得此时的增益$G_{s实际} < G_{s理论}$。阵形畸变带来的时延误差$\tau_j(\theta)$为

$$\tau_j(\theta) = \alpha(j)\frac{(j-1)d\cos(\theta)}{c},\quad j=1,2,\cdots,2N, \tag{7}$$

式(7)中，$\alpha(j)$为取值大于零的随机畸变系数。

对于全阵，在波束形成时阵形畸变带来的误差值累积量μ为

$$\mu=\sum_{1}^{2N}|\tau_j(\theta)|\,. \tag{8}$$

由误差累积公式可以看出，在阵元间距一定的条件下，阵形畸变带来的误差累积量同阵元数成正比例关系。

2 基于时延估计的双子阵时域波束形成

长拖曳线阵畸变会引入畸变误差，降低处理增益和目标方位分辨能力，并且在阵元间距一定的条件下，阵形畸变带来的误差同阵元数成正比例关系。另外，阵增益同阵元数成正比例关系。综上，在无法进行阵形估计时，为保证阵增益的同时降低阵形畸变带来的影响，本文提出一种基于广义互相关估计时延的双子阵时域波束形成方法。将长阵分为左右两个子阵，左右子阵分别按照各自的参考阵元进行波束形成，之后再将两左右波束合成为一个波束输出。左右子阵分别做波束形成，阵元数降为一半，畸变误差累积值被降低。对左右波束重新估计时延之后再延时累加，又利用了全阵信息，此时的阵增益理论上同全阵直接做波束形成时相同。

设总阵元数为$2N$，阵元间距为d，目标入射角为θ，将均匀线阵等分为左右两个子阵，每个子阵的阵元数为N，其中1号、$N+1$号阵元分别为左右子阵的参考阵元，阵形如图1所示。

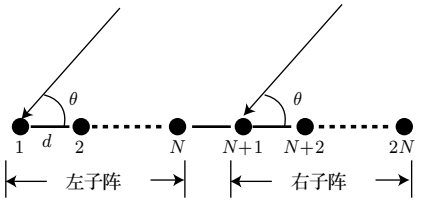


图1　双子阵示意图

Fig. 1 Schematic diagram of split array

基于双子阵时延估计时域波束形成算法计算流程如下：

(1) 将均匀线阵等分为左右两个子阵，之后，采用常规时域波束形成方法[8−9]对阵列信号$[x_1(t), x_2(t),\cdots,x_N(t)]$、$[x_{N+1}(t), x_{N+2}(t),\cdots,x_{2N}(t)]$分别进行时域波束形成，得到左右波束信号$[L_{\theta_1}(t), L_{\theta_2}(t),\cdots,L_{\theta_M}(t)]$、$[R_{\theta_1}(t), R_{\theta_2}(t),\cdots,R_{\theta_M}(t)]$，其中$M$为波束数。由于左右阵元数目一致，理论上左右波束信号的功率强度相等。

$$\begin{cases} L_{\theta_m}=\sum\limits_{i=1}^{N}[x_i\,(t-\tau_i\,(\theta))], \\ R_{\theta_m}=\sum\limits_{i=N+1}^{2N}[x_i\,(t-\tau_i\,(\theta_m))]. \end{cases} \tag{9}$$

(2) 左右阵元各自做时域波束形成之后，两子阵可以各自声中心等效为两个阵元[10−11]，对于θ方位入射的信号，等效阵元的理论时延差$\tau_{理论}(\theta)$为

$$\tau_{理论}(\theta)=\frac{N\cdot d\cdot\cos(\theta)}{c}. \tag{10}$$

由于阵形畸变，$\tau_{理论}(\theta)$不等于等效阵元时延差的真实值，所以要对左右波束信号进行时延估计。另外由于阵形畸变，左右子阵对同一目标估计出的方位也会出现偏差。所以，估计左右波束时延差时，将$L_{\theta_m}(t)$同$R_{\theta_{m-1}}(t)$、$R_{\theta_m}(t)$、$R_{\theta_{m+1}}(t)$ $(1<m<M)$分别做广义互相关计算。如果$R_{\theta_I}(t)$ $(m-1<I<m+1)$是$L_{\theta_m}(t)$的时延信号，且当τ_{θ_m}与它们两者相关的时延相等时，相关函数$R_{L_{\theta_m}R_{\theta_I}}(\tau)$出现最大值：

$$R_{L_{\theta_m}R_{\theta_I}}(\tau_{\theta_m})=E[L_{\theta_m}(t)R_{\theta_I}(t+\tau_{\theta_m})]. \tag{11}$$

此时的τ_{θ_m}可作为$L_{\theta_m}(t)$与$R_{\theta_I}(t)$之间的时延估计，具体实现中为提高时延估计的精确度，对波束信号以10倍原采样频率进行重采样并采用最大似然加权方式的时延估计法[12]，最大似然加权函数$W(f)$为

$$W(f)=\frac{|\gamma_{L_{\theta_m}R_{\theta_I}}(f)|^2}{|G_{L_{\theta_m}R_{\theta_I}}(f)|[1-|\gamma_{L_{\theta_m}R_{\theta_I}}(f)|^2]}, \tag{12}$$

其中，

$$\gamma_{L_{\theta_m}R_{\theta_I}}(f)=\frac{G_{L_{\theta_m}R_{\theta_I}}(f)}{\sqrt{G_{L_{\theta_m}R_{\theta_I}}(f)G_{L_{\theta_m}R_{\theta_I}}(f)}},$$

$G_{L_{\theta_m}R_{\theta_I}}(f)$是$L_{\theta_m}(t)$与$R_{\theta_I}(t)$的互功率谱。

最大似然加权时延估计流程图如图2所示。

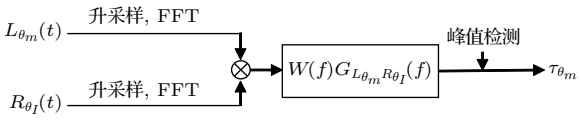


图2　最大似然加权时延估计流程图

Fig. 2 Maximum likelihood weighted time delay estimation flow chart

(3) 将最大峰值对应的左右波束信号$L_{\theta_m}(t)$、$R_{\theta_I}(t)$按照τ_{θ_m}延时累加，延时方法同常规波束形成中延时方法一致，输出该方位的最终预成波束信

号 $y_{\theta_m}(t)$。对各波束依次执行上述步骤，得到 M 路预成波束时域输出信号 $[y_{\theta_1}(t)y_{\theta_2}(t)\cdots y_{\theta_M}(t)]$：

$$y_{\theta_m}(t)=L_{\theta_m}(t)+R_{\theta_I}(t-\tau_{\theta_m}). \tag{13}$$

通过分子阵做波束形成，再用时延估计方法而非理论公式计算左右波束的时延差，减小了阵形畸变带来的影响。

(4) 对 M 路预成波束信号 $[y_{\theta_1}(t),y_{\theta_2}(t),\cdots,y_{\theta_M}(t)]$ 分别累加求能量得到空间谱 $[P_{\theta_1},P_{\theta_2},\cdots,P_{\theta_M}]$。对空间谱进行时间累积得到方位历程图，算法流程图如图 3 所示。

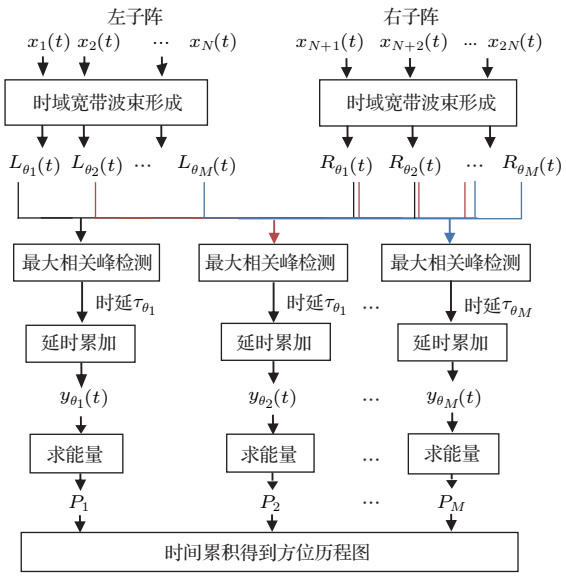


图 3　双子阵算法流程图

Fig. 3　Flowchart of split matrix algorithm

3　算法验证与分析

相对于全阵直接做时域波束形成方法，基于时延估计的双子阵时域波束形成方法减小了阵形畸变带来的误差，延时后的各路信号更趋近于同相叠加。为验证本文算法的科学性和有效性，下面利用仿真和海试数据对算法进行验证。

3.1　仿真验证与分析

仿真阵列为均匀线阵，阵元数目 $2N$ 为 512 个，阵间距 d 为 2.4 m，采样频率为 5000 Hz，目标源信号 A 和 B 均为海上实录的商船信号，信号处理频段为 20 Hz～ 350 Hz，其中目标 A 设置在舷角 97°，目标 B 设置在舷角 100°。线阵正常工作状态下应为直线阵，加入扰动后阵形畸变。A 定义为扰动幅度，以下仿真实验中扰动幅度值 A 设置为 $10d$，扰动函数 $\gamma(x)$ 表达式为

$$\gamma(x)=A\cdot\sin\left(5\cdot\frac{x}{2N}\right)+0.3d\cdot\mathrm{rand}(x),\quad x=[1:1:2N]. \tag{14}$$

扰动前后阵形对比示意图如图 4 所示。

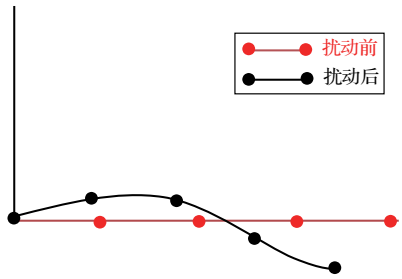


图 4　阵列扰动前后示意图

Fig. 4　Schematic diagram before and after array disturbance

对比加入扰动前后，全阵直接做时域波束形成与双子阵之后时延估计做波束形成得到的空间谱，如图 5、图 6 所示。

图 5、图 6 仿真结果表明，均匀线阵加入扰动前，常规全阵做波束形成同双子阵估计时延再做波束形成均可以分辨目标 A、B，目标检测信噪比基本一致。加入扰动后，常规全阵波束形成算法不能有效分开目标 A、B，而双子阵估计时延的方法依然可以有效检测到目标 A、B，且检测信噪比相对常规全阵方法更高。

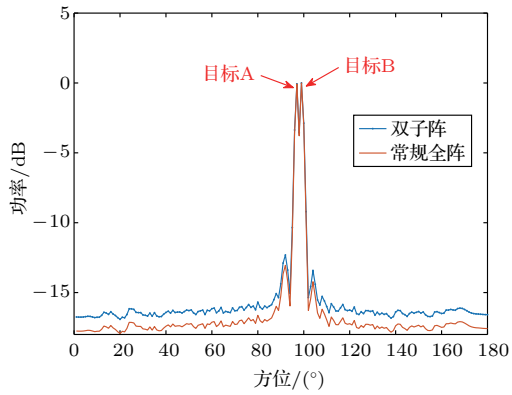


图 5　扰动前空间谱对比图

Fig. 5　Comparison of spatial spectrum before disturbance

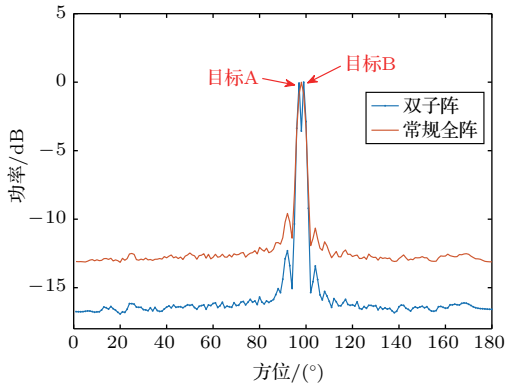


图 6　扰动后空间谱对比图

Fig. 6　Comparison of spatial spectrum after disturbance

3.2　海试数据验证

仿真信号验证了双子阵方法的有效性，下面采用一次海试数据进行验证，海试数据为柔性长拖曳声呐的海上实录数据。对比全阵直接做时域波束形成和双子阵波束形成方法输出的空间谱和方位历程图，如图 7、图 8 所示。

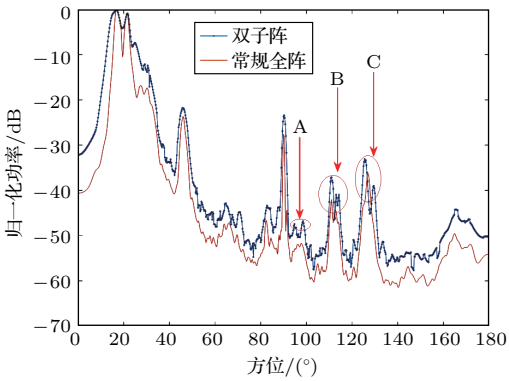


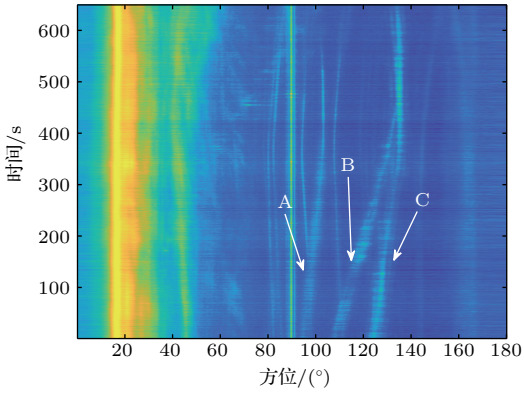
图 7　空间谱对比图

Fig. 7　Comparison chart of spatial spectrum

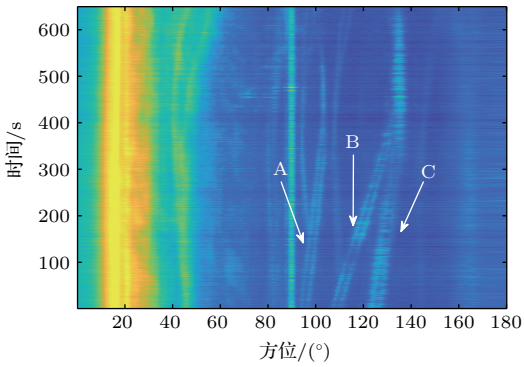
对比图 7、图 8 可以发现，图中标注的 A、B、C 三处，常规全阵时域波束形成算法无法有效分辨邻近双目标，而双子阵算法提高了长拖曳线阵目标方位分辨率，可以有效检测到邻近目标，输出信噪比更高。相应的海试记录显示，在该段数据的起始时刻 83°、95°、113°、123° 四处均有邻近的双目标存在，同本文算法处理结果相同。

4　结论

本文首先分析了柔性长拖曳线阵阵形畸变对波束形成带来的影响，之后结合频域双子阵处理思想提出了基于时延估计的双子阵时域波束形成算法。仿真和海试数据证明，双子阵时域波束形成算法有效降低了阵形畸变带来的影响，提高了目标方位分辨率和阵处理增益。由于提高了阵处理增益，时域波束形成后输出的时域声音信号更有利于声呐兵的听音识别。在无法进行阵形估计时，可有效降低阵形畸变带来的影响。



(a) 常规全阵



(b) 双子阵

图 8　方位历程对比图

Fig. 8　Comparison of azimuth process

参　考　文　献

[1] Waite A D. 实用声呐工程 [M]. 王德石, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004: 169.

[2] 饶伟. 水听器拖曳阵阵形估计方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.

[3] 姜楷娜, 田作喜, 翟春平, 等. 一种提高分裂阵频域波束形成测向分辨力的方法 [J]. 舰船科学技术, 2016, 38(23): 138–142. Jiang Kaina, Tian Zuoxi, Zhai Chunping, et al. A method for improving the direction finding resolution of split array beam forming in frequency domain[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(23): 138–142.

[4] Stergiopoulos S, Ashley A T. An experimental evaluation of split-beam processing as a broadband bearing estimator for line array sonar system[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(6): 3556–3563.

[5] 李晋, 王晓庆, 陈卫东. 基于常规波束合成的分裂阵互谱定向研究 [J]. 无线电工程, 2016, 46(2): 36–40, 47.
Li Jin, Wang Xiaoqing, Chen Weidong. Research on cross-spectrum direction-finding with splitting beam based on conventional beam-forming[J]. Radio Engineering, 2016, 46(2): 36–40, 47.

[6] 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.

[7] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声呐技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2004: 63–105.

[8] 唐建生. 时域宽带波束形成方法及实验研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.

[9] 翟羽佳, 胡谨贤, 黎仁刚. 宽带波束形成中小数时延滤波器设计 [J]. 舰船电子对抗, 2014, 37(5): 110–113.
Zhai Yujia, Hu Jinxian, Li Rengang. Design of fractional time delay filter in broadband beamforming[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2014, 37(5): 110–113.

[10] 李启虎. 数字式分裂波束阵系统的精确定向方法 [J]. 声学学报, 1984, 9(4): 225–238.
Li Qihu. Precise bearing method of digital split beam array system[J]. Acta Acustica, 1984, 9(4): 225–238.

[11] 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): 551–555.
Qian Tao. Application of split-beam processing of line array in underwater acoustic detection[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(6): 551–555.

[12] 游鸿, 黄建国, 史文涛. 基于宽带分裂阵列的水下远程被动多目标检测与定向 [J]. 声学学报, 2009, 34(6): 527–532.
You Hong, Huang Jianguo, Shi Wentao. Long-distance underwater passive multi-target detection and direction finding based on the wideband split array[J]. Acta Acustica, 2009, 34(6): 527–532.