深海声信道中的被动合成孔径

王域^{①②*}, 宫在晓^①, 林鹏^①^① 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190;^② 中国科学院大学, 北京 100190

*联系人, E-mail: wangyu313@mailsucas.ac.cn

收稿日期: 2016-02-03; 接受日期: 2016-05-16; 网络出版日期: 2016-08-09

国家自然科学基金资助项目(编号: 11434012, 4151101011, 11174312, 11404366)

摘要 被动合成孔径技术通过对直线运动的小孔径基阵的接收信号进行处理, 以时间积累换取空间增益, 从而提高对目标的方位分辨和检测能力. 理论分析表明, 只有当(用于合成孔径的)物理子阵所处声场的水平相关半径远大于合成所用子阵尺寸时, 被动合成孔径的探测性能才会较常规物理孔径基阵有明显优势. 深海声信道中, 声场水平相关的空间变化会对被动合成孔径技术的性能存在较大影响, 本文利用2014年南中国海深海信道条件下的实验数据, 开展了被动合成孔径和常规物理基阵的性能对比分析, 用波束域扩展拖曳线列阵测量方法将32阵元(48 m)的物理子阵合成了160阵元(240 m)的虚拟阵, 结果表明: 当声场水平相关半径超过240 m时, 160阵元虚拟阵的处理增益最高比32阵元的物理子阵高出9.5 dB, 与理论预测数值一致; 当水平相关半径小于30 m时, 160阵元虚拟阵的处理增益只比32阵元的物理子阵高出6 dB, 而其探测性能实际已经接近32阵元物理子阵. 这也说明, 在深海信道影区内声场水平相关半径较小, 被动合成孔径技术的探测性能因此受到限制, 较之常规物理孔径基阵的优势并不明显; 而在声场水平相关半径较大的深海信道会聚区内, 被动合成孔径技术的探测性能有明显改善, 较之常规物理孔径基阵的优势明显.

关键词 被动合成孔径, 物理子阵, 虚拟阵, 水平相关半径, 处理增益

PACS: 43.30.Sf, 43.30.Wi, 43.60.Fg, 43.60.Jn

被动合成孔径(Passive Synthetic Aperture, PASA)利用小孔径基阵直线拖曳运动时连续记录的接收信号, 合成远大于实际物理孔径的虚拟孔径, 以相对比较容易获得的时间增益换取因物理尺度受限而较难获得的空间增益, 从而改善阵列的方位分辨性能并提高探测性能. 被动合成孔径技术的核心就是利用信号的时间相关性, 通过相位补偿、空间位置补偿等方法

将一个连续测量的短阵合成一个虚拟的长阵. 被动合成孔径应用的条件, 是接收到的信号的时间相关半径大于被动合成孔径的积分时间. 当合成孔径的时间超过信号时间相关半径时, 合成孔径的检测能力会下降.

深海声信道中, 声场水平相关的空间变化也会对被动合成孔径技术的性能产生较大影响. 当物理子阵所处声场的水平相关半径较小时, 被动合成孔径的效

引用格式: 王域, 宫在晓, 林鹏. 深海声信道中的被动合成孔径. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 094310
Wang Y, Gong Z X, Lin P. Performance of PASA in ocean waveguides (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 094310, doi: 10.1360/SSPMA2016-00081

果也会变差. 本文结合空间相关特性差异较大的深海信道影区和深海信道会聚区内的实验数据分析, 讨论了深海声信道中声场空间相关特性对被动合成孔径性能的影响.

1 被动合成孔径原理

被动合成孔径原理如示意 [图1](#) 所示. 考虑一个由 N 个各向同性水听器组成的等间距水平拖曳阵, 阵元间隔为 d , 基阵以速度 v 作匀速直线运动 (以从 N 号水听器到 1 号水听器方向为速度正方向). 在 $t=0$ 时第 $L=0$ 次测量, N 元基阵进行空间采样; 在 $t=\tau$ 时第 $L=1$ 次测量, 通过选择合适的参数 τ 和 q , 使 $v\tau = qd$, q 表示两次测量的时间间隔 τ 内阵列运动了 q 个水听器位置, 即阵列运动距离为 qd . 通过重复上述操作, 当在 $t=J\tau$ 时第 $L=J$ 次测量时, N 元的阵列可扩展为 $N+Jq$ 元的虚拟长阵, 并可用此虚拟长阵获取目标方位等信息. 假设来自 θ_s 方向的远场窄带信号为 $s(t_i) = A \exp(j2\pi f t_i)$, 以阵列的法线方向为 θ 等于 90° 、阵列中心到第 N 号水听器方向为 θ 等于 0° , 则第 n 号水听器接收到的信号可描述为

$$x_n(t_i) = A \exp \left(j2\pi f \left(t_i - \frac{vt_i + (n-1)d}{c} \cos \theta_s \right) \right) + \varepsilon_n(t_i), \quad (1)$$

其中, c 为声速, $n = 1, 2, \dots, N$ 为水听器号数, $t_i = i\Delta t$, $i = 1, 2, \dots, K$, K 为采样点数, Δt 为采样间隔, $\varepsilon_n(t_i)$ 表示方差为 σ_n^2 的零均值独立高斯白噪声.

经过 τ 秒 (即 $t_i + \tau$ 时刻), 如果满足 $v\tau = qd$, 则接收信号为

图1 (网络版彩图)被动合成孔径原理示意图
Figure 1 (Color online) Principle of Pasa.

$$\begin{aligned} x_n(t_i + \tau) &= A \exp \left(j2\pi f \left(t_i + \tau - \frac{v(t_i + \tau) + (n-1)d}{c} \cos \theta_s \right) \right) \\ &\quad + \varepsilon_n(t_i + \tau) \\ &= A \exp(j2\pi f \tau) \exp \left(j2\pi f \left(t_i - \frac{vt_i + (n+q-1)d}{c} \cos \theta_s \right) \right) \\ &\quad + \varepsilon_n(t_i + \tau), \end{aligned} \quad (2)$$

而 t_i 时刻如果有通道 $n+q$, 接收信号应为

$$\begin{aligned} x_{n+q}(t_i) &= A \exp \left(j2\pi f \left(t_i - \frac{vt_i + (n+q-1)d}{c} \cos \theta_s \right) \right) \\ &\quad + \varepsilon_n(t_i). \end{aligned} \quad (3)$$

比较式 (2) 和 (3), 若忽略各个水听器接收到的噪声, 则存在关系: $x_n(t_i + \tau) = \exp(j2\pi f \tau) x_{n+q}(t_i)$, 由此可见 $t_i + \tau$ 时刻的信号 $x_n(t_i + \tau)$ 通过校正相位 $\varphi = \exp(-j2\pi f \tau)$, 可以合成 t_i 时刻的 $x_{n+q}(t_i)$, 从而实现阵列孔径扩展.

对于远场平面波、单频声源, t_i 时刻 θ_s 方向的阵列波束输出为

$$\begin{aligned} b_0(f, \theta_s) &= \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^K x_n(t_i) \exp(-j2\pi f t_i) \right\} \\ &\quad \times \exp \left(j2\pi f \frac{(n-1)d \cos \theta_s}{c} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$t_i + \tau$ 时刻阵响应为

$$\begin{aligned} b_\tau(f, \theta_s) &= \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^K x_n(t_i + \tau) \exp(-j2\pi f t_i) \right\} \\ &\quad \times \exp \left(j2\pi f \frac{(n-1)d \cos \theta_s}{c} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

由式 (2) 和 (4) 可把式 (5) 简化为

$$b_\tau(f, \theta_s) = b_0(f, \theta_s) \exp \left(j2\pi f \left(\tau - \frac{v\tau}{c} \cos \theta_s \right) \right). \quad (6)$$

通过相位修正来补偿每次测量的波束输出可实现孔径扩展

$$\begin{aligned} B_J(f, \theta_s) &= b_0(f, \theta_s) \sum_{m=0}^J \exp \left(\left(j2\pi f \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta_s \right) m \tau \right) - j\varphi_m \right). \end{aligned} \quad (7)$$

根据实际的测量情况, 写为

$$B_{Jr}(f, \theta_s) = \sum_{m=0}^J b_{m\tau}(f, \theta_s) \exp(-j\varphi_m), \quad (8)$$

其中, $\varphi_m = 2\pi f(1 - v\cos\theta_s/c)m\tau$, 称为相位修正因子.

被动合成孔径技术的原理可总结为: 通过某种算法估计出相位修正因子, 并利用相位修正因子将前后几次测量接收信号的相位对齐, 从而将短阵信号合成虚拟的长阵信号.

目前, PASA有3种较成熟的算法, 分别是扩展拖曳线列阵测量方法(Extended Towed Array Measurement, ETAM)^[1]、最大似然法则(Maximum Likelihood Algorithm, ML)^[2]和快速傅里叶变换合成孔径处理(FFT Synthetic Aperture processing, FFTSA)^[3]. 它们都是针对连续单频信号进行处理的, 从方位估计精度、稳健性、计算量等方面进行综合比较, ETAM是这3种算法中最好的^[4]. 近年来出现了多种改进的ETAM算法, 如合成阵列时域处理方法^[5]、低秩近似算法^[6]、波束域ETAM算法^[7,8]等. 本文采用的是波束域ETAM算法.

2 水平相关对被动合成孔径的影响分析

深海信道中, 声场水平相关的空间变化会对被动合成孔径技术的性能产生较大影响, 但国内外文献缺少有关方面的具体分析. 声场的水平相关是指特定深度、不同水平距离处声场的相似性, 是水平阵列设计和使用的重要约束条件.

为了研究声场水平相关对被动合成孔径性能的影响, 本文采用Carey和Mosley在文献^[9]中提出的相关模型. 在该模型中, 两个水听器接收信号的互相关函数描述为

$$R_{n,m}(f, \delta_{n,m}) = |X(f)|^2 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta_{n,m}}{L_c}\right)^2\right], \quad (9)$$

其中, $R_{n,m}$ 是线列阵中第 n 号水听器和第 m 号水听器接收信号的互相关, f 为频率, $X(f)$ 是信号在频率 f 处的频谱幅度, $\delta_{n,m}$ 是第 n 号水听器和第 m 号水听器的间距, L_c 为声场的水平相关半径, 通常取为归一化互相关系数等于 $\exp(-1/2)$ 时对应的接收距离间隔.

被动合成孔径的波束能量输出为:
 $P_{Jr}(f, \theta_s) = B_{Jr}(f, \theta_s) B_{Jr}^*(f, \theta_s)$, 其中 $(\cdot)^*$ 表示取共轭, $B_{Jr}(f, \theta_s)$ 在频域可以表示为

$$B_{Jr}(f, \theta_s) = \sum_{m=0}^J \left\{ \sum_{n=1}^N X_n(f)_{m\tau} \exp\left[j2\pi f \frac{(n-1)d\cos\theta_s}{c}\right] \right\} \times \exp\left[-j2\pi f \left(1 - \frac{v\cos\theta_s}{c}\right)m\tau\right], \quad (10)$$

其中, $X_n(f)_{m\tau}$ 为 $m\tau$ 时刻第 n 号水听器接收信号在频率 f 处的频谱.

则被动合成孔径波束能量写为

$$\begin{aligned} P_{Jr}(f, \theta_s) &= B_{Jr}(f, \theta_s) \times B_{Jr}^*(f, \theta_s) \\ &= \sum_{m_1=0}^J \sum_{m_2=0}^J \left\{ \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N X_{n_1}(f)_{m_1\tau} X_{n_2}^*(f)_{m_2\tau} \right. \\ &\quad \times \exp\left[j2\pi f \frac{(n_1 - n_2)d\cos\theta_s}{c}\right] \left. \right\} \\ &\quad \times \exp\left[-j2\pi f \left(1 - \frac{v\cos\theta_s}{c}\right)(m_1 - m_2)\tau\right]. \end{aligned} \quad (11)$$

考虑声场水平相关对被动合成孔径技术性能的影响, 并结合被动合成孔径的特点, 式(9)中 $\delta_{n,m}$ 可表述为

$$\delta_{n_1, n_2, m_1, m_2} = (n_1 - n_2)d + (m_1 - m_2)qd, \quad (12)$$

由式(9)讨论的水平相关性可以得到

$$\begin{aligned} &\text{Re}(X_{n_1}(f)_{m_1\tau} X_{n_2}^*(f)_{m_2\tau}) \\ &= \text{Re}(\overline{X_{n_1}(f)_{m_1\tau}} \overline{X_{n_2}^*(f)_{m_2\tau}}) \exp\left[-\frac{\left(\frac{\delta_{n_1, n_2, m_1, m_2}}{L_c}\right)^2}{2}\right], \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\overline{X_{n_1}(f)_{m_1\tau}}$, $\overline{X_{n_2}^*(f)_{m_2\tau}}$ 分别表示不考虑水平相关影响时 $X_{n_1}(f)_{m_1\tau}$ 和 $X_{n_2}^*(f)_{m_2\tau}$ 的表达式, Re表示取实部.

代入式(11)可知, 一个单频信号的波束能量输出为

$$P_{Jc}(f, \theta_s) = \sum_{m_1=0}^J \sum_{m_2=0}^J \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N \left\{ \overline{X_{n_1}(f)_{m_1\tau}} \overline{X_{n_2}^*(f)_{m_2\tau}} \exp \left[- \left(\frac{\left(\frac{\delta_{n_1, n_2, m_1, m_2}}{L_c} \right)^2}{2} \right) \right] \times \exp \left[j2\pi f \frac{(n_1 - n_2)d \cos \theta_s}{c} \right] \right\} \\ \times \exp \left[-j2\pi f \left(1 - \frac{v \cos \theta_s}{c} \right) (m_1 - m_2)\tau \right]. \quad (14)$$

根据相位补偿的原理, 在理想条件下(即信号幅度稳定、相位补偿完全准确的条件下), $\overline{X_{n_1}(f)_{m_1\tau}}$ 和 $\overline{X_{n_2}(f)_{m_2\tau}}$ 存在以下关系:

$$\overline{X_{n_2}(f)_{m_2\tau}} = \overline{X_{n_1}(f)_{m_1\tau}} \exp(-j2\pi f(m_1 - m_2)\tau) \\ \times \exp \left[j2\pi f \frac{((n_1 - n_2)d + (m_1 - m_2)qd) \cos \theta_s}{c} \right], \quad (15)$$

代入式(14)可知, 在理想条件下

$$P_{Jc}(f, \theta_s) = \sum_{m_1=0}^J \sum_{m_2=0}^J \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N X^2(f) \\ \times \exp \left[- \left(\frac{\left(\frac{(n_1 - n_2)d + (m_1 - m_2)qd}{L_c} \right)^2}{2} \right) \right], \quad (16)$$

其中, $X^2(f) = |\overline{X_{n_1}(f)_{m_1\tau}}|^2$, 表示单个水听器的接收信号能量.

在白噪声背景条件下, 假设单个水听器的接收噪声功率为 σ^2 , 可分析得到 N 元阵 $(J+1)$ 段数据的被动合成孔径处理增益应为

$$\text{Gain} = 10 \lg \frac{\frac{P_{Jc}(f, \theta_s)}{(J+1)N\sigma^2}}{\frac{X^2(f)}{\sigma^2}} \\ = 10 \lg \frac{\sum_{m_1=0}^J \sum_{m_2=0}^J \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N \exp \left[- \left(\frac{\left(\frac{(n_1 - n_2)d + (m_1 - m_2)qd}{L_c} \right)^2}{2} \right) \right]}{(J+1)N}, \quad (17)$$

根据式(17), 被动合成孔径的处理增益随水平相关半径 L_c 的增长而提高, 在物理子阵阵元数为 N 、测量次数为 $(J+1)$ 的条件下, 当水平相关半径 L_c 趋向于无限长时, 得到被动合成孔径的最高处理增益为

$$\text{Gain}_{\max} = 10 \lg \frac{(J+1)^2 N^2}{(J+1)N} = 10 \lg[(J+1)N], \quad (18)$$

即, 相比于常规物理子阵的单次测量, 最高可提高的处理增益为

$$10 \lg(J+1)N - 10 \lg N = 10 \lg(J+1), \quad (19)$$

根据式(17), 假设一个32阵元的物理子阵($N=32$), 相邻两次测量的时间间隔内阵列运动了16个水听器($q=N/2=16$), 一共测量9次($J=8$), 即通过9次测量将32元短阵合成一个虚拟的160元长阵. 此条件下被动合成孔径的处理增益随水平相关半径的变化趋势如图2所示. 需要指出的是, 因为采用了波束域ETAM方法, 式(17)中的被动合成孔径处理增益包含了重叠部分阵元的增益, 因此在数值上看可能比对应的常规物理孔径的阵增益大. 如图2所示, 在水平相关半径 L_c 趋向于无限长时, 上述条件下被动合成孔径的处理增益达到最高为: $\text{Gain}_{\max}=10 \lg[9 \times 32]=24.59 \text{ dB}$, 因为包含了重叠部分阵元的增益, 所以在数值上看要高于160元物理孔径基阵的最大阵增益 $10 \lg(160)=22.04 \text{ dB}$. 如果减去重叠部分阵元对增益的贡献, 则两者在数值上一致. 图2中蓝线为32阵元常规波束形成加上时间增益后的处理增益, 即为: $10 \lg(32)+5 \lg(9)=20 \text{ dB}$, 它与式(17)曲线的交点在 $24d$ 附近, 说明当水平相关半径大于 $24d$ 时, 被动合成孔径技术的探测性能较之物理子阵有优势; 当水平相关半径小于 $24d$ 时, 被动合成孔径技术的探测性能较之物理子阵没有优势.

由此可知, 当(用于合成孔径的)物理子阵所处声

图2 被动合成孔径的处理增益随水平相关半径变化趋势
Figure 2 Correspondence of the processing gain of PASA and the horizontal correlation radius.

场的水平相关半径远大于合成所用子阵尺寸时, 被动合成孔径的探测性能有明显改善, 较之常规物理孔径基阵优势明显; 当物理子阵所处声场的水平相关半径接近甚至小于合成所用子阵尺寸时, 被动合成孔径的探测性能受到限制, 较之常规物理孔径基阵优势不明显.

3 深海实验数据分析

2014年在南中国海某海域开展了拖曳阵被动探测实验, 实验中采用双船作业, 目标船使用吊放声源发射声信号, 声源深度125 m, 信号形式为起始频率260 Hz、截止频率360 Hz的调频信号, 接收船使用拖曳阵列接收信号, 接收阵列为阵元间隔为1.5 m的160阵元水平拖曳阵列, 以距离拖曳船最近阵元为第1号阵元、距离拖曳船最远阵元为第160号阵元, 接收深度150 m, 阵列运动速度4节. 图3所示为实验期间声速仪测得的实验海域声速剖面, 实验海域水深约4500 m, 图4所示为根据实验期间GPS数据得到的收发距离时间变化.

该时段42 min的数据对应的目标距离从49.9 km变化到54.8 km. 图5是用前32阵元做常规波束形成的波束历程图, 图6是用前32阵元做被动合成孔径合成虚拟160阵元的波束历程图, 图7是用160阵元物理孔径做常规波束形成的波束历程图, 图8是用160阵元做被动合成孔径合成虚拟320阵元的波束历程图. 对图5-8各个波束历程图中合作目标方向的波束输出能量进行分析, 如图9-12所示. 图9是截取了各个波束历程图第10 min的波束扫描对比图, 图10是截取了各个波束历

图3 实验海域声速剖面图
Figure 3 Sound speed profile in the experimental area.

图4 收发距离时间变化曲线
Figure 4 Correspondence of distance and time.

图5 前32阵元做常规波束形成的波束历程图
Figure 5 Conventional beam forming for the first 32 hydrophones.

程图第30 min的波束扫描对比图, 图11是目标波束强度图, 给出了各个波束历程图中目标波束输出峰值值随着时间的变化情况, 图12是被动合成孔径和常规波束形

图6 前32阵元做被动合成孔径合成虚拟160阵元的波束历程图

Figure 6 PASA for the first 32 hydrophones of the synthesis of 160 virtual hydrophones.

图7 160阵元物理孔径做常规波束形成的波束历程图

Figure 7 Conventional beam forming for the physical aperture of 160 hydrophones.

图8 160阵元做被动合成孔径合成虚拟320阵元的波束历程图

Figure 8 PASA for the 160 hydrophones of the synthesis of 320 virtual hydrophones.

图9 第10分钟的波束扫描对比图

Figure 9 Beam scanning in the 10th min.

图10 第30分钟的波束扫描对比图

Figure 10 Beam scanning in the 30th min.

图11 目标波束强度图

Figure 11 Beam intensity of the target.

成的处理增益对比图(分别由图11中32阵元合成虚拟160阵元被动合成孔径的合作目标波束强度和160阵元常规波束形成的合作目标波束强度, 减去32阵元常

规波束形成的合作目标波束强度而得到).

对比图5-12可见, 用32阵元合成虚拟160阵元的被动合成孔径结果, 相比于前32阵元的常规波束形成结果, 主瓣宽度明显变窄, 处理增益最高时提高了9.5 dB, 这与式(19)的理论预测数值 $10\lg(9)$ 一致. 在方位分辨性能方面, 32阵元合成虚拟160阵元的被动合成孔径, 不如160阵元的物理孔径, 图9中160阵元常规物理孔径能分辨出 140° 附近的两个目标, 32阵元合成虚拟160阵元的被动合成孔径不能分辨出来; 可见, 被动合成孔径方位分辨性能受(用来合成孔径的)物理子阵的探测性能的限制, 当物理子阵大致能够检测和分辨目标信息时, 可以通过被动合成孔径进一步提升增益和方位分辨率等性能, 反之则不一定能通过被动合成孔径提升方位分辨能力. 在处理增益方面, 虽然32阵元合成虚拟160阵元的被动合成孔径处理增益最高达到9.5 dB, 而160阵元的物理孔径最高提高了7 dB, 但是由于所用的被动合成孔径方法包含了重叠部分阵元的增益, 如果减去重叠部分增益($10\lg(32 \times 9/160) = 2.5$ dB), 则两者在数值上一致. 综上分析, 32阵元合成虚拟160阵元的被动合成孔径在处理增益和方位分辨率两方面的探测性能优于32阵元的物理孔径, 但不如160阵元物理孔径. 但是, 用160阵元合成虚拟320阵元的被动合成孔径结果, 相比于160阵元常规波束形成结果, 从图中可以看出主瓣宽度进一步变窄, 处理增益最高时也有提高9.5 dB, 在方位分辨和处理增益两方面的探测性能都进一步提升. 上述结果也说明: 被动合成孔径的探测性能在声影区和汇聚区存在较大的差异.

进一步研究声场水平相关的空间变化对被动合成孔径性能的影响, 由图12可看出, 在第10 min附近时

图12 增益对比图
Figure 12 Processing gain difference.

图13 第10 min合作目标信号水平相关图
Figure 13 Horizontal correlation of the signal in the 10th min.

图14 第30 min合作目标信号水平相关图
Figure 14 Horizontal correlation of the signal in the 30th min.

段160阵元的虚拟阵相比32阵元的物理子阵处理增益提高较少, 最低处小于6 dB (此时如果32阵元的物理子阵加上时间增益 $5\lg(9) = 4.8$ dB, 其探测性能实际已经接近32阵元物理子阵), 而在第30 min附近时段160阵元的虚拟阵相比32阵元的物理子阵处理增益提高较多, 最高处可达9.5 dB. 取第10 min和第30 min各个位置水听器接收数据分别作水平相关性分析, 图13是由第10 min各位置水听器接收数据分别做相关得到的合作目标信号水平相关, 图14是由第30 min各位置水听器接收数据分别做相关得到的合作目标信号水平相关. 图中24 m位置相关低值线条是由于损坏通道引起的. 由图可知, 在第10 min拖曳阵列位于深海信道的影区, 接收信号的水平相关半径小于30 m, 小于32阵元的物理子阵的孔径, 而第30 min拖曳阵列位于深海信道的会聚区, 接收信号水平相关半径超过240 m, 远大于合成所用的物理子阵的尺寸. 通过比较图中其他各时间点水平相关半径长度和处理增益的关系也可得相似结论, 因此可知: 当(用于合成孔径的)物理子阵所处声场的水平相关半径远大于合成所用子阵尺寸时, 被

动合成孔径的探测性能有明显改善, 较之常规物理孔径基阵优势明显; 当物理子阵所处声场的水平相关半径接近甚至小于合成所用子阵尺寸时, 被动合成孔径的探测性能受到限制, 较之常规物理孔径基阵优势不明显.

4 结果与讨论

本文对2014年南中国海某4500 m海深的深海信道条件下的实验数据开展了分析, 用波束域ETAM方法将32阵元(48 m)的物理子阵合成了160阵元(240 m)的虚拟阵, 结果表明: 当水平相关半径超过240 m时, 160阵元虚拟阵的处理增益最高可比32阵元的物理子阵高出9.5 dB, 与理论预测数值一致; 当水平相关半径

小于30 m时, 160阵元虚拟阵的处理增益只比32阵元的物理子阵高出6 dB, 而其探测性能实际已经接近32阵元物理子阵.

声场空间相关特性对被动合成孔径性能影响的理论分析和实验表明: 物理子阵所处声场的水平相关半径远大于合成所用子阵尺寸时, 被动合成孔径的探测性能有明显改善, 较之常规物理孔径基阵优势明显; 当物理子阵所处声场的水平相关半径接近甚至小于合成所用子阵尺寸时, 被动合成孔径的探测性能受到限制, 较之常规物理孔径基阵优势不明显. 对应于深海声道条件, 汇聚区探测时, 声场水平相关半径大, 被动合成孔径的探测性能好; 影区探测时, 声场水平相关半径小, 被动合成孔径效果变差.

致谢 感谢2014年7月南海实验的全体参试人员, 是他们在实验期间的辛苦工作, 保障了本文所用实验数据的可靠性.

参考文献

- 1 Stergiopoulos S. Extended towed array processing by an overlap correlator. *J Acoust Soc Am*, 1989, 86: 158–171
- 2 Nuttall A H. The maximum likelihood estimator for acoustic synthetic aperture processing. *IEEE J Oceanic Eng*, 1992, 17: 26–29
- 3 Stergiopoulos S, Urban H. A new passive synthetic aperture technique for towed arrays. *IEEE J Oceanic Eng*, 1992, 17: 16–25
- 4 Rajagopal R, Rao P R. Performance comparison of PASA beamforming algorithms. In: *Proceedings of Fourth International Symposium on Signal Processing and its Applications*. Gold Coast: IEEE, 1996
- 5 Kim S, Youn D H, Lee C. Temporal domain processing for a synthetic aperture array. *IEEE J Oceanic Eng*, 2002, 27: 322–327
- 6 Li Y, Huang Y, Huang H N. Spatial-temporal processing methods for passive synthetic aperture array (in Chinese). *Signal Proc*, 2008, 24: 426–430 [李宇, 黄勇, 黄海宁. 空时被动合成孔径阵列处理算法研究. *信号处理*, 2008, 24: 426–430]
- 7 Bee T P, Siong L H, Swee C C, et al. Extended towed array measurement: Beam-domain phase estimation and coherent summation. *IEEE J Oceanic Eng*, 2006, 16: 1–6
- 8 Yu Y L, Wang Y M, Li L. Application research on beam space ETAM for unmanned undersea vehicle (in Chinese). *Comput Meas Control*, 2010, 18: 2139–2144 [郁彦利, 王英民, 李磊. 波束域ETAM算法在无人水下航行器中的应用. *计算机测量与控制*, 2010, 18: 2139–2144]
- 9 Carey W M, Moseley W B. Space-time processing environmental acoustic effects. *IEEE J Oceanic Eng*, 1991, 16: 285–301

Performance of PASA in ocean waveguides

WANG Yu^{1,2*}, GONG ZaiXiao¹ & LIN Peng¹

¹ State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Passive Synthetic Aperture (PASA) is a technique of increasing the length of a small array artificially through array towing motion and signal processing. This will acquire the advantage of a long array while maintaining the maneuverability of short array. Therefore, it has better performance in multi-targets distinguishing and detection than the conventional physical aperture array. However, the performance of PASA is also strongly influenced by the horizontal correlation radius of the sound field. Theory analysis shows that only when the horizontal correlation radius of the sound field is much larger than the length of physical aperture array, the advantage of PASA can be obvious. In this paper, the performance of PASA is compared with physical aperture array in the ocean waveguide through the experiment data from the South China Sea in 2014. With the modified extended towed array method in beam-domain (BD-ETAM), a virtual array with 160 hydrophones (240 m) is synthesized by a physical array with 32 hydrophones (48 m). The result shows that when the horizontal correlation radius exceeds 240 m, the processing gain of the synthesized virtual array with 160 hydrophones is higher than the physical array with 32 hydrophones by 9.5 dB. When the horizontal correlation radius is less than 30 m, the processing gain of the synthesized virtual array with 160 hydrophones is only higher than the physical array with 32 hydrophones by 6 dB. Furthermore, the detection performance of the synthesized virtual array is almost the same as the physical array in such case. That is to say, because the horizontal correlation radius of the sound field is short in the shadow zone of the ocean waveguide, the performance of PASA is limited to near the conventional physical aperture array. In contrast, the performance of PASA is remarkable better than the conventional physical aperture array in the convergence zone of the ocean waveguide since the horizontal correlation radius is large.

passive synthetic aperture, physical array, synthesized array, horizontal correlation radius, processing gain

PACS: 43.30.Sf, 43.30.Wi, 43.60.Fg, 43.60.Jn

doi: [10.1360/SSPMA2016-00081](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00081)