

基于单矢量有源平均声强器的码分多址水声通信*

殷敬伟[†] 杨森 杜鹏宇 余赟 陈阳

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2011年4月14日收到; 2011年7月6日收到修改稿)

基于单矢量传感器对码分多址水声通信进行了研究. 利用单个矢量传感器自身指向性进行方位估计最为常用的方法是平均声强器和复声强器, 但这些方法对于同频带的多用户来说, 理论极限仅能测量两个用户. 提出了有源平均声强器, 利用扩频通信中伪随机码优良的自相关和互相关特性, 可同时测得多个用户的方位, 利用估计的用户方位构建矢量组合, 调整矢量传感器的指向性, 实现各用户定向通信, 抑制多址干扰, 增加处理增益, 降低误码率. 对频带相同的扩频多用户通信进行了仿真及试验研究, 验证了有源平均声强器的有效性和实用性.

关键词: 水声通信, 码分多址, 单矢量传感器, 有源平均声强器

PACS: 43.30.+m, 43.60.Ac

1 引言

水声通信是一个快速发展的科研领域, 目前学术界对点对点的水声通信研究比较多, 但随着水下通信业务日趋繁忙, 这种单个用户之间的通信已无法满足人们的要求, 具有广泛应用前景的水声多用户通信逐渐成为业界的热点^[1,2]. 鉴于水声通信网在民用和军事两方面具有巨大的应用潜力, 美国、英国、加拿大和欧共体等都投入相当的力量进行研究与开发, 到目前为止, 国外一些机构组建、研究的水声通信网近 10 个, 部分已成功地进行了海洋实验并走向实际使用, 不断推进覆盖空中、地面、水下的立体信息网的形成^[3].

扩频通信可通过码分复用来实现多用户组网通信, 是当前网络化水声通信系统中最常被选用的通信体制. 扩频通信具有一系列优点: 可获得扩频增益, 抗干扰能力强, 可胜任远程水声通信; 由于通信信号的频谱被扩展, 可认为是一种频率分集, 所以多途衰落会大大减小; 扩频码自相关特性优良, 当多途时延超过一个码片宽度时, 则与原码相关性急剧下降而可视为噪声处理, 因而对多途效应不敏感; 利用扩频码弱相关性可方便地实现码分多址进而实现组网通信. 这些优势可为实现水声网络化通

信提供有利条件^[3-7].

矢量传感器^[8-11]可以同步共点地获得声场的标量和矢量信息, 增加了信息种类和数量, 也拓展了后置信号处理空间, 并且单矢量传感器就可以实现声压水听器阵才能测量的目标方位信息, 具有良好的空间指向性, 可以抑制各向同性噪声以及不同方位的多址干扰. 将矢量传感器应用于水声通信系统可有效改善系统的通信性能. 但对于单个矢量传感器利用传统的平均声强器和复声强器, 针对同频带的多用户来说理论极限仅能测得两个用户的方位^[12], 这无法满足多用户组网通信的需求. 本文将单矢量传感器应用在码分多址水声通信中, 设计了有源平均声强器, 利用扩频通信中伪随机码优良的自相关和互相关特性, 可以同时测得多个用户的方位, 有助于实现定向通信从而提高通信质量.

2 有源声强器方位估计原理

2.1 平均声强器

在多用户通信系统当中, 信源的信息分辨可以通过不同的伪随机码实现, 然而信源方位信息也是区分不同用户的重要依据, 在相同数量伪随机码的情况下可以增大用户数量, 增加网络吞吐量.

* 国家自然科学基金 (批准号: 51179034, 60802060)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 200802171061) 和海洋工程国家重点实验室基金 (批准号: 1007) 资助的课题.

[†] E-mail: yinjingwei@hrbeu.edu.cn

利用单个矢量传感器自身指向性进行方位估计最为常用的方法是平均声强器和复声强器, 其中时域平均声强器如图 1 所示.

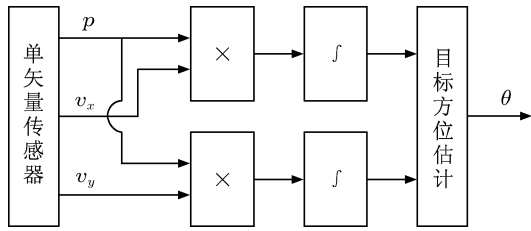


图 1 平均声强器

在满足声学欧姆定律条件下, 矢量传感器二维输出模型如下

$$\begin{aligned} p(t) &= x(t) + n_p(t), \\ v_x(t) &= x(t) \cos \theta + n_x(t), \\ v_y(t) &= x(t) \sin \theta + n_y(t), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $x(t)$ 为目标信号, $n_p(t)$, $n_x(t)$ 和 $n_y(t)$ 为各向同性的加性非相干干扰, 且 $n_p(t)$, $n_x(t)$, $n_y(t)$ 和 $x(t)$ 之间是相互独立的. 目标信号是相干的, 即是从某个方向传来的, 设目标方位为 θ . 海浪分布在无限的海面上, 所以海洋动力噪声是各向同性的、非相干的. 各向同性干扰场的振速及声强度的期望为零, 而目标信号振速及声强度的期望不为零, 这是平均声强器抗干扰的物理基础.

对 (1) 式作时间平均, 平均声强器的输出为

$$\begin{aligned} \bar{I}_x &= \overline{p(t) v_x(t)} = \overline{x^2(t)} \cos \theta + \Delta_x, \\ \bar{I}_y &= \overline{p(t) v_y(t)} = \overline{x^2(t)} \sin \theta + \Delta_y, \end{aligned} \quad (2)$$

式中字符上的横杠表示时间平均. 由于 $n_p(t)$, $n_x(t)$, $n_y(t)$ 和 $x(t)$ 之间是相互独立的, 所以在信噪比较高时, 上式右边只有第一项是主要的, Δ_x , Δ_y 为小量, 两式相除, 得到

$$\hat{\theta} = \arctan \frac{\overline{p(t) v_y(t)}}{\overline{p(t) v_x(t)}}, \quad (3)$$

式中 $\hat{\theta}$ 为目标方位 θ 的估计.

因为海洋波导中目标信号的声压与振速是相关的, 而各向同性环境干扰的声压与振速是不相关的或相关性很弱, 所以平均声强器有良好的抗干扰能力.

2.2 有源平均声强器

有源平均声强器结构如图 2 所示. v_x, v_y 为矢量传感器接收到的振速信号输出, 每路信号分别与

参考信号 $x(t)$ 作拷贝相关 (码分多址通信中, 参考信号 $x(t)$ 分别为各用户相对应的 PN 码), 拷贝相关信号经过峰值选择器后得到有源平均声强器的输出

$$\begin{aligned} \bar{I}_x &= \max [\overline{x(t) v_x(t - \tau)}] = \max [C_{v_x}(\tau)] \\ &= A_s \cos \theta + \Delta_x, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_y &= \max [\overline{x(t) v_y(t - \tau)}] = \max [C_{v_y}(\tau)] \\ &= A_s \sin \theta + \Delta_y, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, A_s 为信号拷贝相关峰, Δ_x , Δ_y 为干扰小量. 将 (4) 式与 (5) 式相除, 得到

$$\hat{\theta} = \arctan \frac{\bar{I}_y}{\bar{I}_x}. \quad (6)$$

由于声压、振速是同相位的, 所以传统的平均声强器无需延时搜索即可取得相关峰输出, 而有源平均声强器是将接收到的信号与本地参考信号进行拷贝相关处理搜索峰值, 其运算量要大于传统的平均声强器, 但二者增益相近. 有源平均声强器可通过变更本地参考信号来检测与之匹配的信号, 从而可估计该匹配信号的方位, 即只要能分辨信号波形就可以测得方位, 以实现估计同频带的多个波形弱互相关的波达方位, 这是有源平均声强器独有的优势.

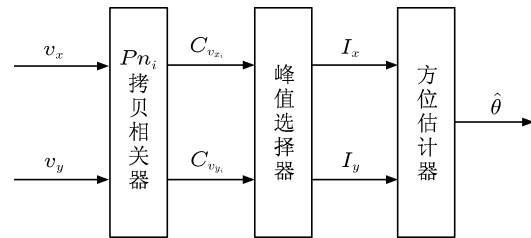


图 2 有源平均声强器结构图

3 有源声强器在码分多址水声通信中的应用

本文所研究的多用户通信系统如图 3 所示. 每个用户分配一个伪随机码 PN_i , 各用户编码信号 $s_i(t)$ 经过信道 $h_i(t)$ 的传输在单矢量传感器处被接收, 输出模型为

$$\begin{aligned} p &= \sum_{i=1}^N s_i(t) \otimes h_i(t) + n_p(t), \\ v_x &= \sum_{i=1}^N s_i(t) \otimes [h_i(t) \cos \theta_i] + n_{v_x}(t), \end{aligned} \quad (7)$$

$$v_y = \sum_{i=1}^N s_i(t) \otimes [h_i(t) \sin \theta_i] + n_{v_y}(t),$$

式中, N 为用户数, 符号“ \otimes ”表示卷积.

矢量传感器接收到的 p, v_x, v_y 通过有源平均声强器, 各用户本地参考码为其分配的伪随机码, 即每路信号分别与 PN_i 作拷贝相关, 可以得到

$$\begin{aligned} C_{v_{x_i}}(\tau) &= \overline{PN_i(t) v_x(t - \tau)}, \\ C_{v_{y_i}}(\tau) &= \overline{PN_i(t) v_y(t - \tau)}, \end{aligned} \quad (8)$$

对于 i 用户, 通过有源平均声强器得到了 i 用户信源的方位估计 $\hat{\theta}_i$, 它是由振速 v_x, v_y 以 PN_i 为参考码的拷贝相关峰值的比值测得的.

利用方位估计 $\hat{\theta}_i$ 构建组合振速 v_{ci} , 形式如下:

$$v_{ci}(t) = v_x(t) \cos \hat{\theta}_i + v_y(t) \sin \hat{\theta}_i. \quad (9)$$

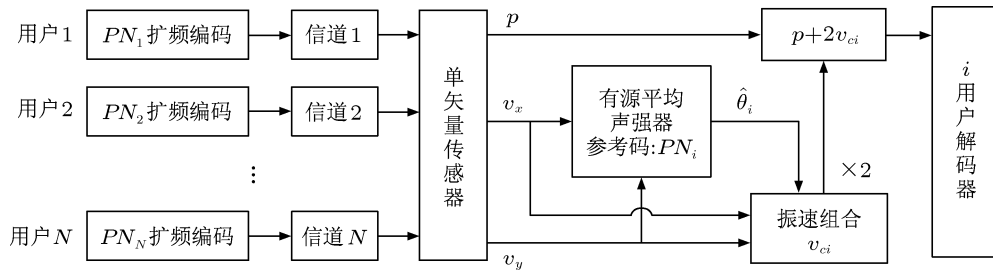


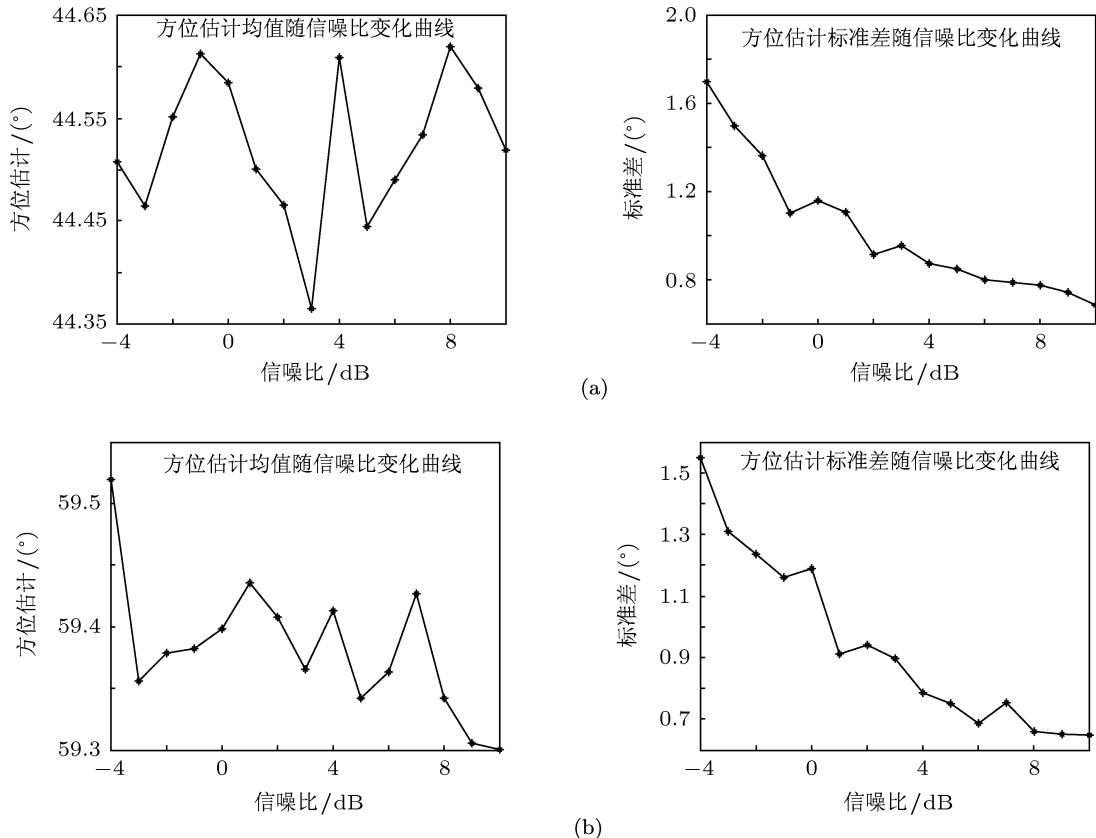
图3 多用户通信系统

利用声压、振速的适当组合可以形成不同的波束指向, 本文选取 $p + 2v_c$ 的线性组合方式调整传感器的指向性, 获得更高的处理增益以提高通信质量.

4 仿真研究及湖试

4.1 仿真研究

仿真条件: 目标数 $N = 6$, 采样频率 $f_s = 48$ kHz, 中心频率 $f_c = 6$ kHz, 六个目标方位分别为 $45^\circ, 50^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 330^\circ$, PN 码码片长度 0.5 ms, 产生 Gold 序列的移位寄存器的阶数为 10 阶, 信噪比变化范围是从 -4 — 10 dB, 统计次数为 200 次.



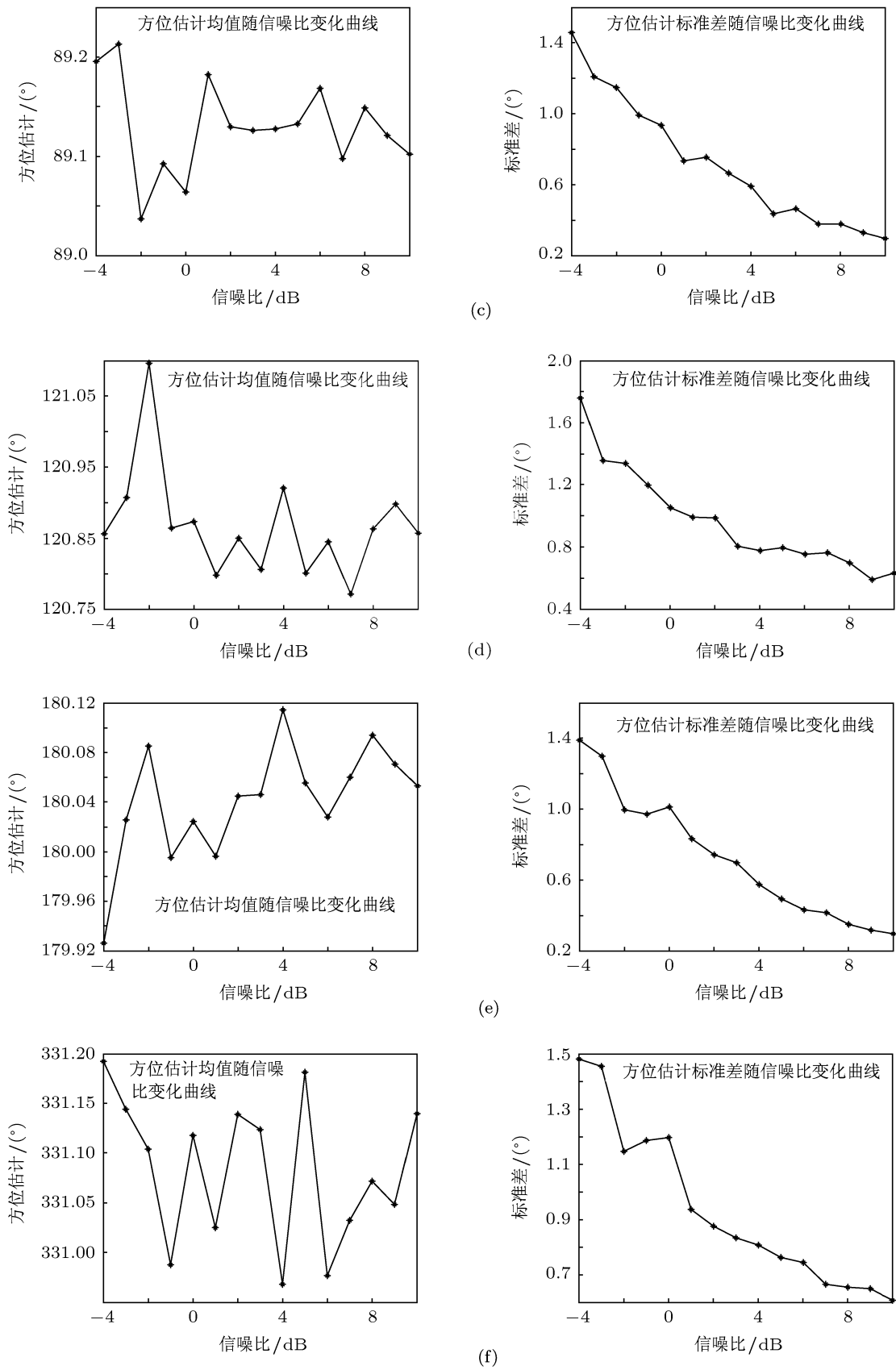


图4 6个目标方位估计均值和标准差随信噪比变化曲线 (a) $\theta = 45^\circ$; (b) $\theta = 50^\circ$; (c) $\theta = 90^\circ$; (d) $\theta = 120^\circ$; (e) $\theta = 180^\circ$; (f) $\theta = 330^\circ$

从图 4 中可以看到, 目标方位估计的标准差随着信噪比的增加而逐渐减小, 并且在该仿真条件下, 均有较高的方位估计精度, 各用户方位方差均小于 2° , 验证了本文所提出的有源平均声强器算法在多用户通信中可同时分辨各用户方位的有效性和可行性, 即有源平均声强器克服了传统平均声强器只能测量频带重叠的多目标的合成声强流方向的局限.

4.2 湖试验证

试验于 2010 年 9 月在黑龙江省莲花湖进行, 试验水域水深约 50 m, 水域纵向长开阔, 横向相对狭窄, 试验当天阴天, 3—4 级西南风, 浪高约 0.3 m, 试验水域声速分布图如图 5 所示, 声速呈负梯度声速分布, 负声速梯度的量级较大.

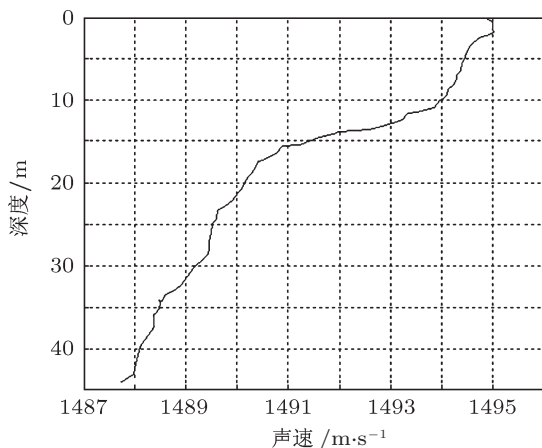


图 5 声速分布图

由于试验条件限制, 无法实现多个目标同时发送数据, 试验中接收船在湖中心锚定不动, 单矢量传感器吊放固定深度为 4 m, 更换发射船方位以获取不同方位信源信息. 发射船在三个不同点位模拟 3 个不同用户发送数据, 将接收到的数据叠加以验证三用户通信, 发射换能器声源级 160 dB, 通信带宽为 5—7 kHz. 同步码为 10 阶 Gold 码, 长度为 0.5 s, 同步码与信息码间隔为 1 s, 信息码为 7 阶 Gold 码.

用户 1 距离接收船 400 m, 发射换能器吊放深度为 12 m; 用户 2 距离接收船 2000 m, 发射换能器吊放深度为 4 m; 用户 3 距离接收船 1000 m, 发射换能器吊放深度为 12 m.

对于每次采集的单个用户数据均基于平均声强器进行方位估计, 由于平均声强器法方位估计技

术已经很成熟, 可将其所估计出的结果作为各用户方位真值. 将 3 个用户数据叠加后, 此时若采用平均声强器法将仅能测出 1 个合成方位; 而将叠加数据输入有源平均声强器, 则可估测出多用户通信时各用户方位, 将其与传统平均声强器分别估计得到的方位值进行比对, 以验证该方法的有效性. 各用户方位估计值如表 1 所示.

表 1 三用户方位估计

	单用户平均声强器方位估计	单用户复声强器方位估计	单用户有源平均声强器方位估计	叠加多用户有源声强器方位估计
用户 1	194.9789	194.9789	197.7658	204.5186
用户 2	242.6064	242.6064	236.8926	232.8588
用户 3	285.4590	285.4590	290.9003	292.7190

由表 1 可以看到, 有源平均声强器方位估计值与传统平均声强器方位估计值基本吻合, 利用估计出来的角度合成组合振速 v_c , 并利用 $p + 2v_c$ 组合提高信噪比来进行解码, 该组合可以获得比单通道解码更高的信噪比来提高解码准确度, 降低误码率. 三用户叠加后解码如表 2 所示, 其中 BER_1 为直接以声压 p 进行解码得到的各用户误码率; BER_2 为以 $p + 2v_c$ 进行解码得到的各用户误码率.

表 2 三个用户通信误码率

	BER_1	BER_2
用户 1	5.6667%	0%
用户 2	2.4000%	0%
用户 3	2.0000%	0.3333%

从表 2 可以看出以矢量组合进行解码的效果要好于直接以声压进行解码, 从而验证了本文所提出的算法的优越性.

5 结论

有源平均声强器是将接收到的信号与本地参考信号进行拷贝相关处理来进行方位估计的, 只要各用户的码型可分辨即互相关性弱, 理论上都是能分辨出各用户方位的, 即只要能分辨信号波形就可以测得同频带的多个弱互相关的波达方位. 这正是有源平均声强器的优势所在. 通过仿真和湖试结果成功地验证了使用有源平均声强器对相同频谱的扩频信号进行了方位估计, 同时有源平均声强器法也很好解决了方位估计模糊的问题. 本文采用的

有源平均声强器法可以对多个目标的方位进行估计, 进而通过组合振速对矢量传感器的指向性进行调整, 增加处理增益, 提高解码精度, 有效地降低了误码率.

对如何降低相关峰旁瓣以及如何使相关峰主峰更加明显来提高测量结果的准确性和稳定性的研究将是今后的重点研究方向之一.

-
- [1] Sozer E M, Stojanovic M, Proakis J G 2000 *IEEE J. Oceanic Eng.* **25** 72
- [2] Yin J W, Wang Y L, Wang L, Hui J Y 2009 *Chinese Science Bulletin* **54** 1302
- [3] Yin J W 2011 *The Theory and Signal Processing Technology of Underwater Acoustic Communication* (Beijing: National Defence Industry Press) p9 (in Chinese) [殷敬伟 2011 水声通信原理及信号处理技术 (北京: 国防工业出版社) 第 9 页]
- [4] Charalampos C T, Oliver R H, Alan E A, Bayan S S 2001 *IEEE J. Oceanic Eng.* **26** 594
- [5] Yang T C, Yang W B 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **123** 842
- [6] Yin J W, Hui J Y, Wang Y L, Hui J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5915 (in Chinese) [殷敬伟, 惠俊英, 王逸林, 惠娟 2007 物理学报 **56** 5915]
- [7] He C B, Huang J G, Han J, Zhang Q F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8379 (in Chinese) [何成兵, 黄建国, 韩晶, 张群飞 2009 物理学报 **58** 8379]
- [8] Hui J Y, Hui J 2009 *Acoustic Signal Processing Based on Vector* (Beijing: National Defence Industry Press) p29 (in Chinese) [惠俊英, 惠娟 2009 矢量声信号处理基础 (北京: 国防工业出版社) 第 29 页]
- [9] Sang E F, Qiao G 2006 *Acta Acustica* **31** 61 (in Chinese) [桑恩方, 乔钢 2006 声学学报 **31** 61]
- [10] Hui J Y, Wang D Y, Zhang G P, Yin J W, Wang X L 2010 *Acta Armamentar* **31** 703 (in Chinese) [惠俊英, 王大宇, 张光普, 殷敬伟, 王晓琳 2010 兵工学报 **31** 703]
- [11] Hui J Y, Li C X, Liang G L, Liu H 2000 *Acta Acustica* **2000** 9 389 (in Chinese) [惠俊英, 李春旭, 梁国龙, 刘宏 2000 声学学报 **9** 389]
- [12] Yang S E 2003 *Journal of Harbin Engineering University* **24** 591 (in Chinese) [杨士羲 2003 哈尔滨工程大学学报 **24** 591]

Code divided multiple access underwater acoustic communication based on active acoustic intensity average*

Yin Jing-Wei[†] Yang Sen Du Peng-Yu Yu Yun Chen Yang

(*Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

(Received 14 April 2011; revised manuscript received 6 July 2011)

Abstract

Code divided multiple access (CDMA) underwater communication based on single vector sensor is studied in this paper. The most common methods to estimate azimuth with self-directivity of single vector sensor are average sound intensity method and complex sound intensity method, however, for the same frequency band multi-users, these methods are limited to the measurement of azimuths only for two users at the same time theoretically. An active average intensity method, which measures the azimuths of multi-users simultaneously with the excellent correlative characteristics of pseudo-random code in spread spectrum communication, is proposed in this paper. With the estimated azimuth, vector combination can be generated to adjust the directivity of vector sensor, achieve multi-user beam communication, inhibit multi-path interference, and enhance processing gain and lower error rate. Simulation and experiment for same frequency band spread spectrum multi-user communication testify the feasibility and utility of active average sound intensity method.

Keywords: underwater acoustic communication, CDMA, single vector sensor, active acoustic intensity average

PACS: 43.30.+m, 43.60.Ac

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51179034, 60802060), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 200802171061), and the Foundation of State Key Laboratory of Ocean Engineering of China (Grant No. 1007).

[†] E-mail: yinjingwei@hrbeu.edu.cn