

文章编号:1001-2486(2011)06-0105-05

单矢量水听器的姿态修正测向问题探讨*

牛嗣亮,张振宇,胡永明,倪明

(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:提出了一种采用姿态修正的单矢量水听器远场测向方法。在实际应用中,矢量水听器的测向及其接收的质点振速分量信噪比(SNR)均会受到水听器偏转姿态的影响。为此,利用远场条件下只需两个振速分量和声压信息即可实现二维测向的原理,提出了一种基于振速分量选择处理的远场测向方法,该方法充分利用高SNR的振速分量,提高了测向精度。计算机仿真和光纤矢量水听器海上试验结果初步验证了该方法的有效性和可行性。

关键词:矢量水听器;姿态修正;方位估计

中图分类号:TP312 **文献标识码:**A

Direction of Arrival Estimation from a Single Vector Hydrophone with Attitude Correction

NIU Si-liang, ZHANG Zhen-yu, HU Yong-ming, NI Ming

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A far-field Direction-of-Arrival (DOA) estimation algorithm with attitude correction based on a single vector hydrophone was proposed. In practical application, both the direction finding and the signal-to-noise ratios (SNR) of three components in the acoustic particle velocity vector suffered from the attitude deflection of a vector hydrophone. Two components of a particle velocity vector combined with pressure signal could be used to estimate the two-dimensional bearing of a far-field target. Therefore, a far-field DOA estimation algorithm based on two properly chosen velocity components with attitude correction was proposed to increase the DOA estimation accuracies. Both the experiment data and numerical simulations were used to verify the feasibility and validity of the method.

Key words: vector hydrophone; attitude correction; direction of arrival estimation

矢量水听器可以拾取声场中空间共点的声压和振速信息,单矢量水听器即可实现目标二维方位估计。单矢量水听器由于阵增益有限,受探测信号的信噪比影响较大,多用于较近距离的目标探测。近年来,小型水中运动平台得到了快速发展^[1-2],单矢量水听器的体积小、结构紧凑和探测性能好等优势日益凸显,因此基于单矢量水听器的方位估计问题吸引了大量学者进行相关研究^[3-8]。

海洋环境复杂多变,矢量水听器受海流影响会发生俯仰、翻转和水平转动的姿态变化。目标测向要求水听器拾取的质点振速矢量能够保持在一个固定不变的坐标系中,矢量水听器的应用需要进行姿态修正。可以说,姿态修正是矢量水听器工程应用的一个关键问题。

通常,姿态修正可以分为机械控制的实时修

正^[6,9],和后置信号处理的修正方式^[6]。前者需要一个机械转动装置,通过电子罗盘的姿态数据实时地调整矢量水听器的姿态,使其保持不变。后者需要把矢量水听器的姿态数据与其同时刻测量的声场数据存储下来,在信号处理过程中用姿态数据对质点的振速数据或者对目标方位估计进行修正。

1 基本理论

1.1 单矢量水听器方位估计

单矢量水听器的方位估计方法有振速法、平均声强流法、互谱法、直方图法等^[7]。如果把矢量水听器的一路声压信号和3路振速信号看作空间共点4元阵列,那么阵列信号处理中的常规波

* 收稿日期:2011-04-29

基金项目:国家863高技术资助项目(2006AA09Z121)

作者简介:牛嗣亮(1981—),男,博士生。

束形成(CBF)和最小方差无失真响应(MVDR)等算法都可以应用^[10]。

假设信号为窄带平面波,噪声各向同性,矢量水听器接收到的数据为4维列向量 x_i , ($i=1,2,3,\dots$)。由极大似然估计,得到接收数据的协方差矩阵为

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i x_i^T \quad (1)$$

矢量水听器信号方向矢量为 $a(\theta, \varphi) = [\cos\theta\cos\varphi \quad \sin\theta\cos\varphi \quad \sin\varphi]^T$,其中上标T表示转置。则CBF的波束图可表示为^[10]

$$P_{\text{CBF}}(\theta, \varphi) = a(\theta, \varphi)^T \cdot R \cdot a(\theta, \varphi) \quad (2)$$

MVDR的波束图为^[8]

$$P_{\text{MVDR}}(\theta, \varphi) = a(\theta, \varphi)^T \cdot R^{-1} \cdot a(\theta, \varphi) \quad (3)$$

波束图的峰值位置即为目标方位估计。

1.2 姿态修正基本原理

矢量水听器测量质点振速的笛卡儿坐标系

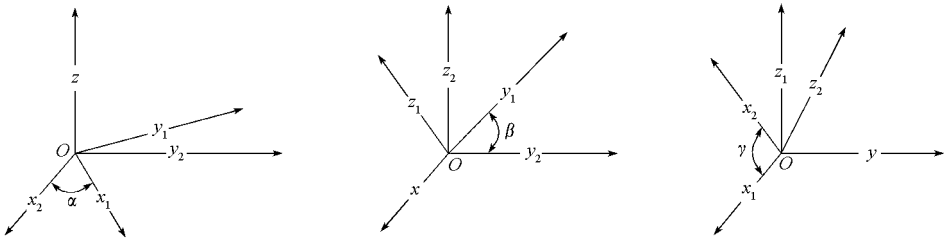


图1 姿态角的定义

Fig. 1 Definition of three attitude angles

根据以上定义,若坐标系 $ox_1y_1z_1$ 的姿态角为 (α, β, γ) ,那么点 $(x_1, y_1, z_1)^T$ 在坐标系 $ox_2y_2z_2$ 中

表示为 $(x_2, y_2, z_2)^T = R \cdot (x_1, y_1, z_1)^T$,R为姿态变换矩阵^[9]。

$$R = \begin{bmatrix} \cos\gamma\cos\alpha - \sin\gamma\sin\beta\sin\alpha & -\cos\beta\sin\alpha & \sin\gamma\cos\alpha + \cos\gamma\sin\beta\sin\alpha \\ \cos\gamma\sin\alpha + \sin\gamma\sin\beta\cos\alpha & \cos\beta\cos\alpha & \sin\gamma\sin\alpha - \cos\gamma\sin\beta\cos\alpha \\ -\sin\gamma\cos\beta & \sin\beta & \cos\gamma\cos\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

姿态修正方法有两种:一是修正质点振速数据,二是修正方位估计^[6]。前者把水听器接收到的振速矢量转换到地理坐标系中,计算量大,适合姿态变化较快的情况。后者把目标方位估计转换到地理坐标系中,适合姿态缓变的情况,在信号处理时根据姿态变化情况选择合适的快拍长度,计算量与快拍长度有关,通常比前者小2个数量级以上。

1) 修正振速矢量

由矢量水听器姿态角计算姿态变换矩阵R,从而得到振速矢量在地理坐标系中的表示为 $(vx_2, vy_2, vz_2)^T = R \cdot (vx_1, vy_1, vz_1)^T$,应用相应的定向算法即可得到目标的地理方位估计。

2) 修正方位估计

令目标在矢量水听器固连轴坐标系 $ox_1y_1z_1$

(固连轴坐标系)相对于电子罗盘所应用的地理坐标系的旋转是由水听器的摇摆运动引起的。固定在矢量水听器上的电子罗盘提供其偏转姿态数据,这样就可以把不同姿态下矢量水听器测量的质点振速矢量或者目标方位估计变换到一个固定的地理坐标系中。

假设矢量水听器水平位移相对目标距离很小,令其测量质点振速的笛卡儿坐标系为 $ox_1y_1z_1$,电子罗盘所应用的地理坐标系为 $ox_2y_2z_2$ 。坐标系 $ox_1y_1z_1$ 与 $ox_2y_2z_2$ 有旋转关系,以z为轴旋转得到 x_1 和 x_2 的夹角为航向角 α ,以x为轴旋转得到 y_1 和 y_2 的夹角为俯仰角 β ,以y为轴旋转得到 x_1 和 x_2 的夹角为翻滚角 γ , α, β 和 γ 的正方向对各自的转轴符合右手关系,如图1所示。

中的方位为 (θ_1, φ_1) ,在地理坐标系 $ox_2y_2z_2$ 中的方位为 (θ_2, φ_2) ,那么目标在坐标系 $ox_1y_1z_1$ 和 $ox_2y_2z_2$ 的坐标可以分别表示为 D_1 和 D_2 :

$$D_1 = (r\cos\theta_1\cos\varphi_1, r\sin\theta_1\cos\varphi_1, r\sin\varphi_1)^T = (x_1, y_1, z_1)^T \quad (5)$$

$$D_2 = (r\cos\theta_2\cos\varphi_2, r\sin\theta_2\cos\varphi_2, r\sin\varphi_2)^T = (x_2, y_2, z_2)^T = R \cdot D_1 = R \cdot (x_1, y_1, z_1)^T \quad (6)$$

其中r为水听器与目标的距离,对于方位估计,可以令 $r=1$ 。由式(6)求出 $(x_2, y_2, z_2)^T$,得到

$$\theta_2 = \arctan(y_2/x_2) \quad (7)$$

$$\varphi_2 = \arctan(z_2/\sqrt{x_2^2 + y_2^2})$$

因为目标水平方位角定义域为 $[0^\circ, 360^\circ)$,需要根据 (x_2, y_2) 所在象限对 θ_2 进行修正。

2 采用姿态修正的远场测向方法

2.1 远场测向存在的问题

对于远场探测,目标的俯仰方位角很小。若目标与矢量水听器的深度差为 50m,当距离为 1km 时,方位俯仰角 $\varphi_2 < 3^\circ$ 。矢量水听器接收的振速矢量可以表示为

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} vx_1 \\ vy_1 \\ vz_1 \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{R}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} vx_2 \\ vy_2 \\ vz_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} nx_1 \\ ny_1 \\ nz_1 \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{R}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p\cos\theta_2\cos\varphi_2 \\ p\sin\theta_2\cos\varphi_2 \\ p\sin\varphi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} nx_1 \\ ny_1 \\ nz_1 \end{bmatrix} \\ &\approx \mathbf{R}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p\cos\theta_2\cos\varphi_2 \\ p\sin\theta_2\cos\varphi_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} nx_1 \\ ny_1 \\ nz_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $(vx_1, vy_1, vz_1)^T$ 为接收的振速矢量, $(nx_1, ny_1, nz_1)^T$ 为噪声, $(vx_2, vy_2, vz_2)^T$ 为地理坐标系中的振速矢量。

如果矢量水听器保持水平状态 ($\beta = 0^\circ, \gamma = 0^\circ$),接收的振速水平分量比纵向分量的信噪比 (SNR) 高很多,定向算法可以得到较高精度的方位角估计 θ_1 ,此时姿态修正简化为一维问题,目标的地理水平方位角即为 $\theta_1 + \alpha$ 。

实际中,矢量水听器受海流影响会发生明显偏转,海流越强,偏转幅度越大。此时,幅度很小的纵向振速分量 vz_2 会投影到 $(vx_1, vy_1, vz_1)^T$ 三分量上,使 vx_1 和 vy_1 的 SNR 变低,使 vz_1 的 SNR 变高,利用振速矢量分别估计方位角 θ_1 和 φ_1 会产生较大误差。

2.2 利用远场条件的方位估计方法

2.2.1 两方位角关系式

由式(6)可以得到目标在地理坐标系 $ox_2y_2z_2$ 中坐标的 z 轴分量为:

$$z_2 = -rsin\gamma\cos\beta\cos\theta_1\cos\varphi_1 + rsin\beta\sin\theta_1\cos\varphi_1 + r\cos\gamma\cos\beta\sin\varphi_1 \quad (9)$$

利用远场条件 $z_2/r \approx 0$,则有

$$\tan\varphi_1 \approx \frac{-\sin\beta\sin\theta_1 + \sin\gamma\cos\beta\cos\theta_1}{\cos\gamma\cos\beta} \quad (10)$$

这就得到了远场条件下方位角 θ_1 和 φ_1 的关系式。利用两个振速分量 vx_1 和 vy_1 和式(10)就可

以估计目标方位 (θ_2, φ_2) 。当矢量水听器某一轴灵敏度变差或损坏时,用这种方法仍可以对目标进行测向。

2.2.2 方位角估计误差分析

分析式(10)计算方位角 φ_1 的误差。令 $\Delta\theta_1$ 为定向算法估计 x_1y_1 平面上方位角 θ_1 的误差, $\Delta\varphi_1$ 为用式(10)计算 φ_1 产生的误差。记 $\tan(\varphi_1) = f(\theta_1)$,则

$$\begin{aligned} & \tan(\varphi_1 + \Delta\varphi_1) \\ &= f(\theta_1 + \Delta\theta_1) \\ &= \frac{-\sin\beta\sin(\theta_1 + \Delta\theta_1) + \sin\gamma\cos\beta\cos(\theta_1 + \Delta\theta_1)}{\cos\gamma\cos\beta} \end{aligned} \quad (11)$$

假设误差为小量,由 Taylor 公式得出

$$\begin{aligned} & \tan(\varphi_1 + \Delta\varphi_1) \approx \tan\varphi_1 + (1 + \tan^2\varphi_1) \cdot \Delta\varphi_1 \\ & f(\theta_1 + \Delta\theta_1) \approx f(\theta_1) + f'(\theta_1) \cdot \Delta\theta_1 \end{aligned} \quad (12)$$

从而可得

$$\Delta\varphi_1 \approx \frac{f'(\theta_1)}{1 + f^2(\theta_1)} \cdot \Delta\theta_1 \quad (13)$$

仿真对上式进行分析,令 $\Delta\theta_1 = 1^\circ$,当 $\beta = \gamma = 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 时, φ_1 估计误差曲线如图 2 所示。从图中可以看出,当 $|\beta|$ 和 $|\gamma|$ 小于 30° 时,用式(10)计算方位角 φ_1 ,不会产生比方位角 θ_1 的估计误差更大的误差。当姿态俯仰角 β 和翻转角 γ 变大时, φ_1 的估计误差绝对值增大,但在水平方位角的大部分范围内估计误差仍然很小。另外,对式(11)分析发现姿态俯仰角和翻转角的符号决定了误差极大值和极小值的相对位置。

2.3 采用姿态修正的远场测向方法

以上分析是针对利用 x_1y_1 平面方位角 θ_1 对方位角 φ_1 进行估计的情况,当利用 x_1z_1 或者 y_1z_1 平面上的方位角进行估计时,两方位角关系式略

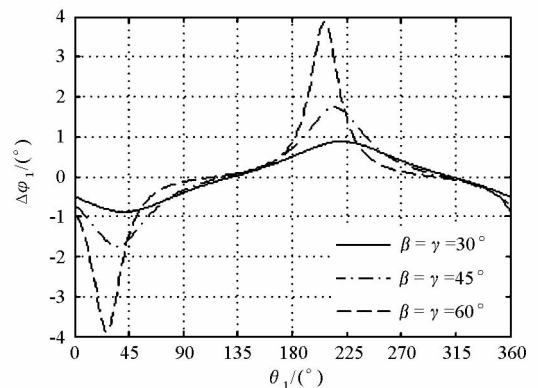


图2 不同姿态下 φ_1 的估计误差曲线

Fig. 2 Error curves of estimated φ_1 in different attitudes

有差别,上述讨论不失一般性。

综上,对于远场测向问题,可以根据矢量水听器姿态数据和目标方位粗估计,分析接收质点振速各分量 SNR 的相对高低和利用远场条件估计误差大小,对两方位角估计顺序进行一个简单的判决。测向方法具体流程如下:

- 1)接收振速矢量三分量 SNR 和利用远场条件估计误差分析;
- 2)选择两个合适的振速分量由定向算法(CBF 或 MVDR 等算法)估计相应平面上的方位角;
- 3)由远场条件得出两个方位角关系式(见式(10)),计算另一个方位角;
- 4)姿态修正(见式(6)),得到目标地理方位估计。

3 仿真

Nehorai 在文献(5)中分析了矢量水听器的方位估计性能,给出了单矢量水听器估计单声源方位的克拉美-罗下界:

$$CRLB(\theta, \varphi) = \frac{1 + \rho}{2N\rho_v\rho} \begin{bmatrix} 1/\cos^2\varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中 $\rho_v \triangleq \sigma_s^2/\sigma_v^2, \rho \triangleq \sigma_s^2/\sigma_v^2 + \sigma_s^2/\sigma_p^2, \sigma_s^2$ 是信号方差, σ_v^2 和 σ_p^2 分别是振速和声压传感器接收的噪声方差, N 为快拍长度。仿真的一般定向算法的估计绝对误差由 $CRLB$ 公式计算,公式中 ρ_v 等于振速分量中较低 SNR。

为不失一般性,先考虑估计 x_1y_1 平面方位角 θ_1 的情况。下面仿真分析固定航向角下,两种定向方法的估计误差,方法一:根据质点振速和声压信号由定向算法分别估计两方位角,下面简称为直接估计的方法,具体采用 CBF 算法;方法二:利用远场条件的定向方法。

远场目标在地理坐标系中的方位角为 $(50^\circ, 0.5^\circ)$,航向角为 10° ,在各向同性噪声场中声压信噪比 $\sigma_s^2/\sigma_p^2 = 10\text{dB}$,快拍长度 $N = 1000$,当姿态俯仰角和翻滚角从 -30° 变化到 30° 时,两种方法估计误差曲面如图 3 和图 4 所示。

从图 3 可以看到,两方位角估计误差在姿态俯仰角等于 0° 附近迅速增大,当两姿态角绝对值增大时,估计误差慢慢变小。这是因为矢量水听器探测的质点振速 z 分量 SNR 变低,使得定向估计的方位角 φ_1 误差迅速增大,该误差在姿态修正时传递到了目标的两个地理方位角估计上。当水听器偏转幅度变大时,质点振速 z 分量的 SNR 显著升高,从而提高了定向估计精度,误差曲面变平

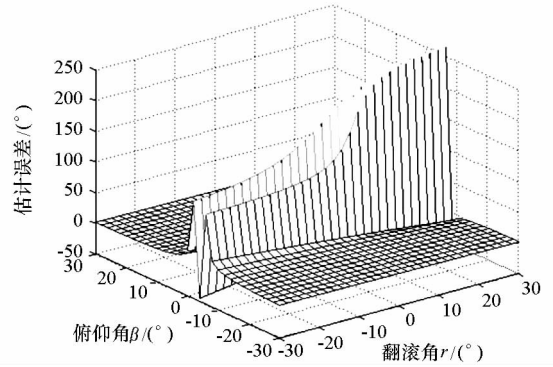


图3 直接估计方法的水平方位估计误差曲面
Fig. 3 Error curves of estimated θ in different attitudes using CBF algorithm

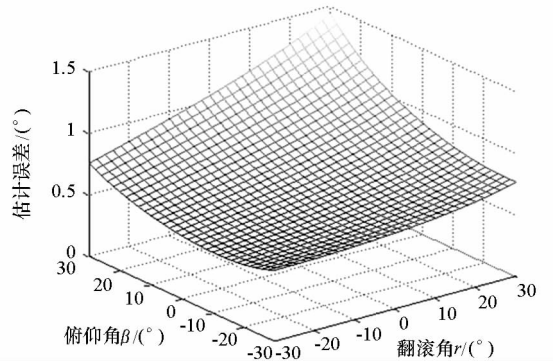


图4 本文方法的水平方位估计误差曲面
Fig. 4 Error curves of estimated θ in different attitudes using proposed far-field algorithm

坦,在俯仰和翻滚角等于 $\pm 30^\circ$ 附近的误差比本文方法的估计误差约大 3° 。俯仰角与水平方位角估计误差规律相同。从图 4 可以看到,估计误差曲面幅度很小,本文方法的估计精度较高。另外,目标地理俯仰角的估计误差约为 0.5° ,主要由远场假设俯仰角为 0° 引起。

4 海试

为了验证本文方法的有效性,开展了光纤矢量水听器相关海上试验。单光纤矢量水听器系统及试验现场如图 5 所示,其不仅包括四分量光纤矢量水听器,还装配一套电子罗盘测量水平与俯仰姿态,而加装的温度与压力传感器则用于测量实验情况下的水文参数。

矢量水听器采集的脉冲信号波形如图 6 所示(x 轴因传输光纤损坏无信号), z 轴信号 SNR 很低。由本文提出的远场测向方法得到经姿态修正的单快拍波束形成结果如图 7 所示, MVDR 结果本底较 CBF 结果稍高,测向结果为 175° , CBF 测向结果为 171° 。另外,水听器深度约 30m ,GPS 测量声源距水听器约 1km ,方位角约 175° (正北

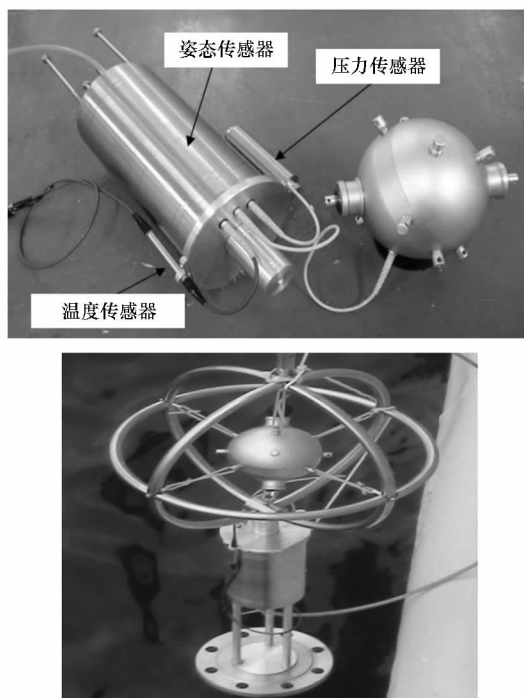


图5 光纤矢量水听器传感系统及海上试验现场
Fig.5 Photographs of assembly and experiment of a fiber optic vector hydrophone system

为 0°)。

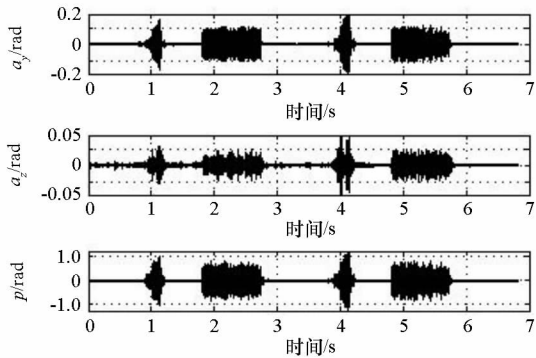


图6 采集的脉冲信号波形
Fig.6 Waveforms of received signal

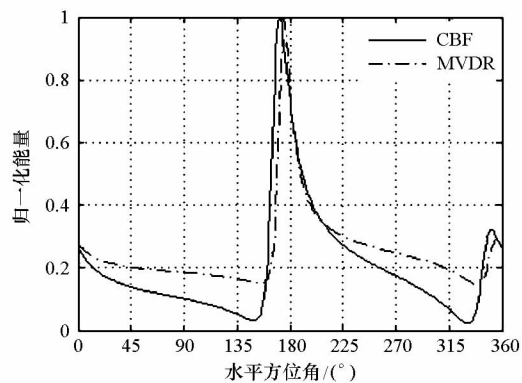


图7 姿态修正后的方位谱
Fig.7 Estimated beam pattern with attitude correction
姿态修正后的水平方位历程图如图8所示,4

段明显的航迹分别对应图6中的脉冲信号。与脉冲信号对应的各快拍方位估计和姿态数据如图9所示,估计误差范围为 $(-4^\circ, 2^\circ)$,平均误差为 -1.1° ,较好地实现了目标测向。

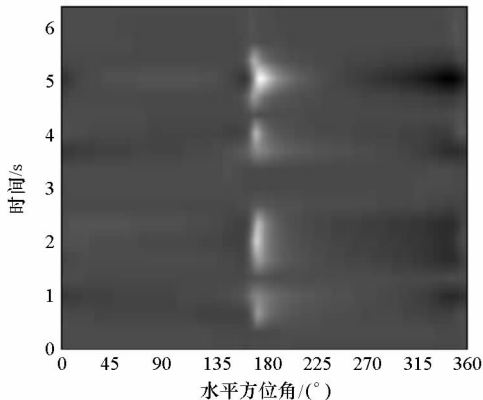


图8 姿态修正后的水平方位历程图
Fig.8 Time-range bearing plot with attitude correction

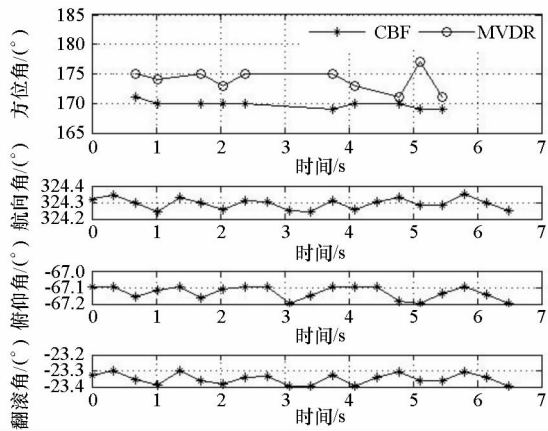


图9 各快拍方位估计及姿态数据
Fig.9 Estimated DOA and corresponding attitudes

5 结论

本文对单矢量水听器的姿态修正和测向问题进行了研究。首先介绍了单矢量水听器姿态修正的基本原理,然后对远场测向问题进行了分析,在远场条件下得到了目标两个方位角之间的关系,提出了一种合理的远场目标测向方法。对水听器不同姿态下的仿真结果表明了该方法的有效性;进行了光纤矢量水听器海上试验,对海试数据处理结果表明,即使在振速分量SNR很低的情况下,该方法估计目标航迹清晰,测向误差小于 4° ,进一步验证了该算法的有效性和可行性。本文对单矢量水听器的工程应用有一定价值。

致谢:对在光纤矢量水听器试验中给予支持和帮助的李启虎院士、孙贵青研究员、田甜博士以及其他中科院声学所的同志们深表感谢。

参考文献:

- [1] Poulsen A J, Ianniello J P. Bearing Stabilization and Tracking for an AUV with an Acoustic Line Array[J]. IEEE, 2006.
- [2] Holmes J D, Lynch J F. An Autonomous Underwater Vehicle Towed Array for Ocean Acoustic Measurements and Inversions[J]. IEEE, 2005:1058 - 1061.
- [3] Tichavsky P, Wong K T, Zoltowski M D. Near-field/far-field Azimuth & Elevation Angle Estimation Using a Single Vector-hydrophone[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2001, 49 (11):2498 - 2510.
- [4] 杨秀庭,孙贵青,陈新华,等. 一种改进的 WSF 算法在单矢量水听器多目标方位估计中的应用[J]. 声学技术,2007, 26(2):165 - 168.
- [5] Nehorai A, Pald E. Acoustic Vector Sensor Array Processing[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1994, 42(9):2481 - 2491.
- [6] 姚直象,惠俊英,蔡平,等. 单矢量水听器方位估计的柱状图方法[J]. 应用声学,2006,25(3):161 - 167.
- [7] 周江涛,倪明,朱宇正. 单矢量水听器的 MVDR 方位估计研究[J]. 声学技术,2008,27(5):476 - 477.
- [8] 杨秀庭,孙贵青,陈新华. 矢量水听器阵列 MVDR 波束形成器的性能研究[J]. 应用声学,2007,26(1):8 - 15.
- [9] 刘胜. 舰载捷联式猎雷声纳基阵姿态控制系统研究与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2000.
- [10] 刘德树,罗景青,张剑云. 空间谱估计及其应用[M]. 中国科学技术出版社,1997.

(上接第 99 页)

参考文献:

- [1] London H S. Change of Satellite Orbit Plane by Aerodynamic Maneuvering[J]. Journal of the Aerospace Sciences, 1962 (29): 323 - 332.
- [2] Walberg G D. A Survey of Aeroassisted Orbit Transfer[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1985, 22(1): 3 - 18.
- [3] Zimmermann F, Calise A J. Numerical Optimization Study of Aeroassisted Orbit Transfer[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1998, 21(1): 127 - 133.
- [4] Mease K D, Vinh N X. Minimum Fuel Aeroassisted Coplanar Orbit Transfer Using Lift Modulation[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1985, 8(1): 134 - 141.
- [5] Baumann H, Oberle H J. Numerical Computation of Optimal Trajectories for Coplanar, Aeroassisted Orbital Transfer[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2000, 107 (3): 457 - 479.
- [6] 吴德隆,王小军. 航天器气动力辅助变轨动力学与最优控制[M]. 北京:中国宇航出版社, 2006: 78 - 80.
- [7] Rao A V, Cox S, Mosher T. A Concept for Operationally Responsive Space Mission Planning Using Aeroassisted Orbital Transfer[C]//AIAA/6 Responsive Space Conference, 2008: 1 - 10.
- [8] Huntington G T. Advancement and Analysis of a Gauss Pseudospectral Transcription for Optimal Control Problems[D]. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 2007: 115 - 143.
- [9] Benson A, Thorvaldsen T, Rao V. Direct Trajectory Optimization and Costate Estimation Via an Orthogonal Collocation Method [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29 (6): 1435 - 1440.