

基于软件声纳概念的波束稳定

毕彦¹, 许伟杰², 向大威²

(1. 海军驻上海地区水声导航系统军事代表室, 上海 201108; 2. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

摘要: 声纳载体航向和姿态的变化, 会使声纳出现很异常的局外数据, 从而使诸如多普勒计程仪、多普勒分层流速测量仪、三维前视声纳、地形匹配导航声纳、单/多波束测深仪以及多波束鱼探仪等声纳的性能下降。如果三维声纳采用软件声纳的结构, 就可以方便地实现动态波束稳定, 从而使声纳的测量精度得到提高。对软件声纳、波束稳定的原理与实现途径作了分析。分析表明: 若能实时地得到声纳载体的航向角、纵倾角和横摇角, 并且能动态地改变波束的方向, 就可以随时随刻地稳定声纳的波束。

关键词: 三维声纳; 软件声纳; 波束稳定

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-01-0064-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.01.015

Beam stabilization based on the conception of software defined sonar

BI Yan¹, XU Wei-jie², XIANG Da-wei²

(1. Naval Underwater Acoustic and Navigation System Agency in Shanghai Region, Shanghai 201108, China;
2. Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: The variations of carrier heading and carrier attitude will arise the serious outlier in sonar data and so cause the performance degradation of some sonar units, such as Doppler Velocity Log; Acoustic Doppler Current Profiler; Forward-looking Sonar; Terrain Reference Navigation Sonar; Single/Multi-beam Echo-sounder and Multi-beam Fishing Sonar. For Software Defined Sonar, it is quite easy to dynamically stabilize the beams of 3D Sonar, so the measuring accuracy of the sonar could be improved. A brief introduction to the Software Defined Sonar and the basic principle and implementation of Beam Stabilization are presented in the paper. If the heading; pitching and rolling could be obtained in real-time and the beam direction could be changed dynamically, the sonar beam is stabilized all the time.

Key words: 3D sonar; Software Defined Sonar(SDS); beam stabilization

0 引言

某些声纳, 诸如多普勒计程仪、多普勒分层流速测量仪、三维前视声纳、地形匹配导航声纳、单/多波束测深仪以及多波束鱼探仪等, 当声纳载体的航姿发生改变时, 就会使参数估计的精度下降, 甚至会因丢失或部分丢失回波而出现局外数据或断点。

以多普勒计程仪为例, 常规的多普勒计程仪采用 Janus 算法。这种算法将声轴方向上的速度转换成载体的纵向与横向速度。Janus 算法十分简单, 但由于作了载体是水平的假设, 因此对抗纵倾和横摇的能力十分有限。当纵倾角(或横摇角)不超过 8°

时, 2 个速度分量的测量误差才能维持在 1% 以下。如果能够得到实时的载体航姿, 则利用最小二乘估计和矩阵算法, 可使多普勒计程仪的测量精度有比较大的提高^[1]。但是当发射与接收之间的时延很大时, 接收瞬间的载体航姿与发射瞬间的载体航姿就有可能相差很大, 从而会降低矩阵算法的有效性, 也会因丢失或部分丢失回波使速度数据中出现局外数据或断点。

如果采用波束稳定技术, 就能使上述问题得到很好的解决。所谓波束稳定技术, 就是: 不论声纳载体的航姿如何变化(例如, 航向、纵倾以及横摇等同时发生变化), 声纳波束总是能准确地对准目标。

1 三维声纳与软件声纳

常规的三维声纳要实现波束稳定, 例如同时对抗载体的航向角、纵倾角以及横摇角的变化, 会使问题变得比较复杂。因为三维声纳基阵中有数百个

收稿日期: 2012-10-11; 修回日期: 2013-01-30

作者简介: 毕彦(1976—), 男, 山东烟台人, 工程师, 研究方向为水声导航。

通讯作者: 毕彦, E-mail: by58713780@sohu.com

甚至近千个独立阵元，同时还可能要求形成数百个波束，如果要同时对抗载体的航向、纵倾以及横摇的变化，则声纳应该具有相应个数的发射/接收通道，而且所有的通道应该具有很高的 consistency。大量的阵元电缆进舱以及大量的发射/接收通道与发射/接收多波束形成器互联也不是一个很简单的问题。随着软件无线电^[2]的出现，国内对软件声纳^[3,4]的讨论也渐渐多了起来。如果我们利用软件声纳的一些特点来改变常规三维声纳的结构，就能使上述那些复杂问题得以简化。

在软件声纳中，发射机已简化为宽带功率放大器，接收机也简化为宽带接收信号调理器(它由差分输入的低噪声前置放大器、程控增益放大器、反折叠滤波器和差分输出放大器所组成)。正因为这两种部件十分简单，所以声纳就可以拥有数百个独立的发射/接收通道，又由于这些通道都是宽带运行的，因此，很容易地在声纳比较窄的工作频段内保持高度一致性。当声纳载体中有多部声纳同时工作时，为了满足声兼容性，宽带接收信号调理器必需有足够宽的动态范围，另外，在接收波束形成器中必需具备数字滤波的功能。

在软件声纳中，发射/接收多波束形成器也演变为“声纳刀片”。“声纳刀片”这个别名是取自于 IBM 的“刀片服务器”。“声纳刀片”由多个 24bits 高采样率的 Sigma-Delta AD、多个高数模转换率的 DA、高性能的 FPGA 以及高性能的 CPU 所组成。

由于宽带功率放大器、宽带接收信号调理器和“声纳刀片”的体积小、功耗低以及可靠性高，因此可以将它们集成到声纳的基阵中去。从而使得“穿舱密封管节”的数量大大降低。如果采用光缆传输数据，则还能同时提高对抗电磁干扰的能力。

“声纳刀片”不但可以宽带工作，而且通过改变软件，就可以实现声纳功能和声纳性能的升级。若采用软件声纳的概念，利用一个基阵，还可以实现多种不同声纳的功能。例如，实现波束稳定的多普勒计程、多普勒分层流速测量、海底地貌测量以及单/多波束测深。

软件声纳还可以缩短项目的开发周期、开发经费和降低声纳的造价。特别是采用 Mills 交叉阵的软件声纳，几乎不采用如变压器或铁心电感等自制件，从而简化了制造工艺。此外，不同型号的声纳，可以公用很多的部件，从而可以降低基地的备件数量，使得人员培训以及设备维修变得非常简单。

软件声纳的关键技术有：波束稳定技术、复矢量分解技术、波束形成方法与技术、栅瓣抑制技术、

频分多波束技术以及宽带恒定波束技术等。本文将对软件声纳的关键技术之一，软件声纳的波束稳定技术进行介绍。并将对稳定波束在软件声纳中的实现途径，作一简单的分析。

2 坐标系与坐标系统轴旋转

为了便于波束稳定技术的分析，首先建立一个导航坐标系，即坐标系 N。坐标系 N 的原点 o_n 位于载体的等效中心 o ，其三个轴 x_n 、 y_n 和 z_n 分别指向北、东和垂直向下，如图 1 所示。图中 T 是目标。

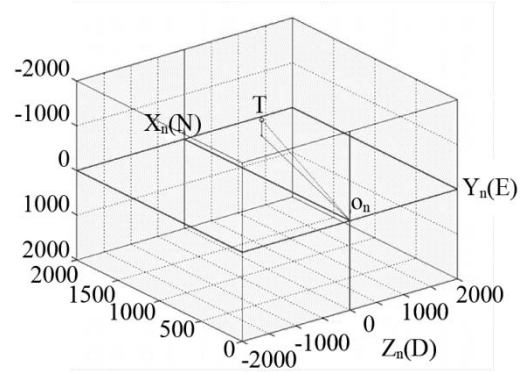


图 1 导航坐标系
Fig.1 Navigation coordinates

再建立一个载体坐标系，称作坐标系 B。坐标系 B 的原点为 $o_b = o$ 。 x_b 轴与 y_b 轴所构成的平面与载体的底平面平行。 ox_b 指向载体的正前方， oy_b 指向载体的右横方向， oz_b 的方向根据右手法则确定。

3D 声纳基阵的等效中心 $o_n = o$ 。基阵的 0° 方向与 x_b 轴的方向完全一致。基阵的垂直轴与 z_b 轴完全一致。

为了推导方便再建立一个辅助坐标系，即坐标系 P。坐标系 P 的原点也位于 o 。坐标系的 x_p 轴是这样规定的，即 ox_p 指向目标 T。

若有一个直角坐标系 xyz ，首先绕 z 轴旋转一个角 ψ ，则相应的方向余弦矩阵 Ψ 为：

$$\Psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

继而，绕首次旋转后的 y 轴旋转一个 θ 角，则相应的方向余弦矩阵 Θ 为：

$$\Theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

最后，绕第二次旋转后的 x 轴旋转一个 φ 角，

则相应的方向余弦矩阵 Φ 为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 次旋转后的新坐标系为 $x'y'z'$ 。 φ 、 θ 和 ψ 称作欧拉角, 欧拉角与 3 次旋转所对应的转换矩阵 A 的关系如式(4)所示:

$$A = \Phi \Theta \Psi \quad (4)$$

若矢量在老坐标系中表示为 r_α , 矢量在新坐标系中表示为 r_β , 而转换矩阵用 $A_{\alpha\beta}$ 表示, 则有:

$$r_\beta = A_{\alpha\beta} r_\alpha \quad (5)$$

$$r_\alpha = A_{\alpha\beta}^{-1} r_\beta \quad (6)$$

由于方向余弦矩阵的逆矩阵等于方向余弦矩阵的转置, 因此

$$r_\alpha = A_{\alpha\beta}^T r_\beta \quad (7)$$

3 目标在导航坐标系中的位置

由于目标在坐标系 P 的 x_p 轴上, 因此目标在坐标系 P 中的位置矢量为:

$$r_p = [x_p, y_p, z_p]^T = [\rho, 0, 0]^T \quad (8)$$

上式中 ρ 是目标的斜距。

如果坐标系 N 经过三次旋转成为坐标系 P, 三次旋转的角度分别是 ψ_{np} 、 θ_{np} 和 φ_{np} (并且 $\varphi_{np} = 0$), 则由式(1)到式(3)可以算得三个方向余弦矩阵 Ψ_{np} 、 Θ_{np} 和 Φ_{np} , 转换矩阵为

$$A_{np} = \Phi_{np} \Theta_{np} \Psi_{np} \quad (9)$$

目标在坐标系 N 中的位置矢量为

$$r_n = [x_n, y_n, z_n]^T \quad (10)$$

$$r_n = A_{pn} r_p = A_{np}^T r_p \quad (11)$$

4 目标在载体坐标系中的位置

如果坐标系 N 经过三次旋转成为坐标系 B, 三次旋转的角度分别是 ψ_{nb} =航向角、 θ_{nb} =纵倾角、 φ_{nb} =横摇角, 则由式(1)~(3)可以算得三个方向余弦矩阵 Ψ_{nb} 、 Θ_{nb} 和 Φ_{nb} , 而转换矩阵是

$$A_{nb} = \Phi_{nb} \Theta_{nb} \Psi_{nb} \quad (12)$$

目标在坐标系 B 中的位置矢量为

$$r_b = [x_b, y_b, z_b]^T \quad (13)$$

$$r_b = A_{nb} r_n \quad (14)$$

利用式(14)和式(11)可得:

$$r_b = A_{nb} A_{np}^T r_p \quad (15)$$

5 稳定波束的波束偏转角

如果坐标系 B 再经过三次旋转成为一个新的坐标系 S, 三次旋转的角度分别是 ψ_{bs} 、 θ_{bs} 和 φ_{bs} , 则由式(1)~(3)可以算得三个方向余弦矩阵 Ψ_{bs} 、 Θ_{bs} 和 Φ_{bs} , 而转换矩阵是

$$A_{bs} = \Phi_{bs} \Theta_{bs} \Psi_{bs} \quad (16)$$

目标在坐标系 S 中的位置矢量为

$$r_s = [x_s, y_s, z_s]^T \quad (17)$$

且

$$r_s = A_{bs} r_b \quad (18)$$

利用式(18)和式(15)可得

$$r_s = A_{bs} A_{nb} A_{np}^T r_p \quad (19)$$

如果令

$$A_{bs} A_{nb} A_{np}^T = I \quad (20)$$

则

$$r_s = r_p \quad (21)$$

并且

$$r_s = [\rho, 0, 0]^T \quad (22)$$

正因为作了如式(20)所示的假设, 由式(22)和式(8)显见: 目标在坐标系 S 中和在坐标系 P 中有相同的位置矢量, 并且 x_s 轴完全瞄准了目标。如果声纳的波束动态地保持在这种方向上, 则不论载体的航姿如何变化, 波束总是对准了目标, 从而实现了波束的动态稳定。

重写式(20):

$$A_{bs} A_{nb} A_{np}^T = I$$

上式可以改写成

$$A_{bs}^T = A_{nb} A_{np}^T$$

而 $A_{bs} = (A_{nb} A_{np}^T)^T = A_{np} A_{nb}^T$

于是, 稳定波束的波束偏转角分别为

$$\psi_{beam} = \text{atan} \left(\frac{A_{bs}(1,2)}{A_{bs}(1,1)} \right) \quad (23)$$

$$\theta_{beam} = \text{asin}(-A_{bs}(1,3)) \quad (24)$$

从上文分析可知: 若能动态地得到声纳载体的航向角、纵倾角和横摇角, 并且动态地改变波束的方向, 就可以实现软件声纳的波束稳定。

6 稳定波束在软件声纳中的实现途径

在本节中, 将简单地介绍稳定波束在软件声纳

中的实现途径：以二维等间隔平面阵的三维前视声纳为例，如果二维等间隔平面阵在水平方向有 M 个阵元，在垂直方向有 N 行，共有 $M \times N$ 个阵元。三维前视声纳的基阵在水平方向要求形成 P 个波束，在垂直方向要求形成 Q 个波束，共有 $P \times Q$ 个波束。若要求三维前视声纳的第 (p, q) 个波束对准空间中某一个假想的目标，如果能从航向传感器和姿态传感器实时地得到航向角、纵倾角和横摇角，则由式(23)和式(24)可知：该三维声纳第 (p, q) 个波束的水平偏转角应该为 ψ_{beam} ，而垂直偏转角应该为 θ_{beam} 。声纳基阵中所有的阵元在空间的位置是已知的，在远场平面波的假设下，以及波束偏转角 ψ_{beam} 和 θ_{beam} 是已知的情况下，可以很方便地得到所有 $M \times N$ 个阵元所对应的 $M \times N$ 个时延补偿量，每一个时延补偿量同时与 ψ_{beam} 和 θ_{beam} 有关。在形成稳定的波束时，我们首先应对 $M \times N$ 个阵元提供 $M \times N$ 个时延补偿量，然后再进行相加运算，相加输出就是稳定波束的输出。时延-相加过程可以在软件声纳中的“声纳刀片”来实现。

若在时延-相加过程中，利用复矢量分解公式，即

$$e^{j(\xi+n)} = e^{j\xi} e^{jn}$$

就可以将波束形成过程分解成下列 2 个步骤。首先，将每一行的 M 个阵元构成 N 个“水平线阵”，继而对 N 个“水平线阵”实现时延补偿和相加运算，形成 N 个水平子波束。这样，三维声纳的基阵就演化为：具有 N 个指向性阵元的一个“垂直线阵”。然后，再对这个“垂直线阵”，进行时延补偿和相加运算，以形成一个波束，即三维声纳的第 (p, q) 个波束。采用这种复矢量分解技术可以使三维声纳

波束形成器的结构得到很大程度的简化，而且可以在软件声纳中的“声纳刀片”来实现资源的复用。如果三维声纳的基阵是一个三维阵，例如是一个等间隔圆柱阵，也可以类似的方法进行分解。

7 结束语

基于软件声纳概念设计的三维声纳，具有硬件量低、结构合理、能方便地实现性能升级和功能扩展等特点。当声纳载体的航向角、纵倾角和横摇角是已知的情况下，可以在这种三维声纳中方便地实现声纳波束的稳定。波束稳定技术可以在三维前视声纳、地形匹配导航声纳、多波束鱼探仪、多普勒计程仪、多普勒分层流速测量仪以及单/多波束测深仪等采用软件声纳结构的声纳中得到广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] 向大威, 邹洪, 景永刚. 提高多普勒计程仪性能的矩阵算法[J]. 声学技术, 2007, 26(4): 545-550.
XIANG Dawei, ZOU Hong, JING Yonggang. Matrix algorithm for enhancing the performance of DVL[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(4): 545-550.
- [2] Cory Clark, Software Defined Radio [M]. McGraw-Hill, 2008.
- [3] 蔡志明, 王希敏. 软件声纳的概念与趋势[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 968-971.
CAI Zhiming, WANG Ximin. Concept and development of the software-defined sonar[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 968-971.
- [4] 曾劲松, 朱岩, 姚善梁. 软件声纳的目标自动跟踪系统建模[J]. 现代电子技术, 2010(14): 73-75.
ZENG Jingsong, ZHU Yan, YAO Shanliang. Modeling of Target Auto-tracking System on Software-defined Sonar[J]. Modern Electronics Technique, 2010(14): 73-75.