

一种适用于浅海小信噪比条件的声源目标定位技术

孙青虎¹, 刘景维²

(1. 海军司令部军训部, 北京 100841; 2. 华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

摘要: 文章将匹配场处理技术引入一种新的目标运动分析方法——长时间积分法中, 用根据实际海洋传播条件计算所得的声场作为拷贝场向量, 替代传统方法中所采用的平面波模型。由于充分利用了声场的空间结构, 使得该方法不仅能够完成传统目标运动分析中定出目标方位的功能, 而且还可以定出其距离和深度。同时, 因积分时间的增加还大大提高了对目标的检测性能。该方法可用于解决小信噪比条件下, 声源目标的检测和定位问题。尤其适用于浅海、在声信号的传播因受波导和多途现象影响而严重偏离平面波的情况。仿真结果表明: 采用平面波模型时, 在信噪比低于 -28dB 时, 声源目标参数就已相当模糊; 而当采用匹配场处理技术, 在信噪比降为 -33dB 时, 仍可精确地得到声源目标的参数。

关键词: 匹配场; 长时间积分; 定位; 浅海

中图分类号: TB566 **文献标识码:** A

A technique of source target localization for low SNR case in shallow water

SUN Qing-hu¹, LIU Jing-wei²

(1. Department of Naval Military Training, Beijing 100841, China; 2. Department of Electronic Science and Technology, Central China University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper combines matched-field processing with a novel method of target motion analysis, i. e., long-time integration approach. The acoustic field calculated on the basis of real ocean propagation conditions is used to produce the modeled vector instead of using the plane wave model. This method can not only estimate the source target in bearing that can be accomplished by the conventional target motion analysis, but also the source range and depth because it fully utilizes the unique spatial structure of the acoustic field. Moreover, because of the increment of integration time, it improves the detection performance substantially. This method can be used to handle source target detection and localization in low SNR cases. Simulated results indicate that when a plane wave model is adopted, the estimated source target parameters are very ambiguous with a SNR of -28dB . However, if the matched-field processing technique is adopted, the source target parameters can be precisely estimated even when the SNR is as low as -33dB .

Key words: matched-field; long-time integration; localization; shallow water

1 引言

用目标运动分析对水下运动目标进行定位与跟踪是现代被动声呐系统常用的技术。尽管目前已有多种目标运动分析的算法, 但通常都是用方位估计值的时间序列作为输入, 目标辐射的信号为窄带时, 还同时采用频率的估计值作为输入。因此在进行目标运动分析之前, 必须先完成对目标频率和方位的估计。最简单的参数估计方法就是在二维频率-方位谱上测定其峰值的坐标。为此, 要求在声呐的处理周期内, 目标方位的变化必须保持在一个波束方向内, 同时, 目标运动的频率飘移也不得超过一个分析频率间隔, 因此处理器的积分时间十分有限。

另一方面, 信号由于受海洋介质复杂的传播结构和噪声的干扰影响, 往往存在较大的起伏, 时而出现, 时而消失, 有时可能持续消失几个声呐处理周期, 致使对二维谱的峰值检测和跟踪发生困难, 在信噪比较低的情况下, 甚至不能工作。

近几年发展起来的长时间积分方法, 在一定程度上能够克服上述困难, 它将目标运动分析逆向问题转为大量的正问题处理。通过假定的目标航速、航迹所得到的相应的目标频率与方位随时间的变化关系, 在一定的观察时间段内, 对相应的一系列短时二维频率-方位谱进行非相干积累, 用整个观察时间段内的短时谱值系列构成一长项谱值, 当假定的目标运动轨迹与真实轨迹一致时, 长项积分功率应达到最大, 由此得到目标参数的估计值。由于该算法对在时间和空间上变化的波数谱直接积分, 避免了对短时谱的谱峰的检测、跟踪等难点, 同时摆脱了处

收稿日期: 2001-08-20; 修回日期: 2002-03-04

作者简介: 孙青虎(1972-), 男, 山东平度人, 硕士研究生, 研究方向为声呐目标定位、目标识别。

理周期受方位和频率变化的制约,使积分时间不受限制,从而提高了在小信噪比下的检测能力。

本文将匹配场处理技术引入长时间积分法中,用根据实际海洋传播条件计算所得的声场作为拷贝场向量,替代传统方法中所采用的平面波模型。由于充分利用了声场的空间结构,使得该方法不仅能够完成传统目标运动分析中只确定目标方位的功能,而且还可以定出其距离和深度,并且定位精度大大提高。

2 基本理论

考虑声源目标在时间 T 内作匀速直线运动的情况,并且假定在这段时间内,共有 N_T 个积分周期,用 $s_{p,m}^q$ 和 $d_{p,m}^q$ 分别表示第 q 个积分周期内,由假定声源位置所计算出的接收声压信号和由水听器阵列实际接收到的声压信号的时空抽样值(p 代表时间, m 代表空间)。对于一个匀速运动目标的运动轨迹可由它的初始距离 r_i 、初始方位 β_i 、终点距离 r_f 、终点方位 β_f 、深度 z_s 以及声源频率 f_0 来表征,并且由这些参数可以确定任一积分周期内目标的距离、方位、速度等。因此可写为:

$$s_{p,m}^q = s_{p,m}^q(r_i, \beta_i, r_f, \beta_f, z_s, f_0) \quad (1)$$

在整个积分周期上定义拷贝场矢量 $\mathbf{V}_s = (s^1, s^2, \dots, s^{N_T})$, 这里 s^q 是一个 PM 维复仿真信号采样值矢量,同理可定义测量场矢量 $\mathbf{V}_d = (d^1, d^2, \dots, d^{N_T})$, \mathbf{V}_s 和 \mathbf{V}_d 均为 $PMN_T \times 1$ 维矢量,它们之间的归一化相关函数可定义为:

$$C_T = \mathbf{V}_s^* \mathbf{W} \mathbf{V}_d / \sqrt{\mathbf{V}_s^* \mathbf{W} \mathbf{V}_s} \quad (2)$$

其中 $*$ 代表共轭转置, \mathbf{W} 是加权矩阵,由于测量场的自相关值不影响拷贝场矢量,因此上式分母中省略了 $\sqrt{\mathbf{V}_d^* \mathbf{W} \mathbf{V}_d}$ 项。权矩阵 \mathbf{W} 采取对角形式,若对每一个积分周期都采用相同的加权形式,这些权值用 $\eta_{p,m}$ 表示,这样式(2)可写为:

$$C_T = \frac{\sum_q c^q}{\sqrt{\sum_q (s^q)^2}} = \frac{\sum_q |c^q| e^{i\psi_q}}{\sqrt{\sum_q (s^q)^2}} \quad (3)$$

其中 $c^q = \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{m=0}^{M-1} \eta_{p,m} d_{p,m}^q (s_{p,m}^q)^*$ 表示第 q 个积分周期拷贝场与测量场的相关系数。 $(s^q)^2 = \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{m=0}^{M-1} \eta_{p,m} |s_{p,m}^q|^2$ 为归一化因子。式(3)求和符号中的 q 从 1 到 N_T , φ_q 是第 q 个相关函数 c_q 的相位, P 为在一个积分周期内的抽样点数,考虑到:

$$B(r_i, \beta_i, r_f, \beta_f, z_s, f_0) = \sum_{q=1}^{N_T} |c^q| / \sqrt{\sum_{q=1}^{N_T} (s^q)^2} \quad (4)$$

使 B 取最大值的参数就作为目标参数的估计值。

3 仿真处理

3.1 仿真信号的计算

我们用简正波模型产生水听器的测量场信号,采用了一种快速、稳定的 Modelab 方法^[3],海水深度取为 70m,海洋环境参数如表 1 所示:

表 1 海洋环境参数

深度 z/m	声速 $c/(m/s)$	密度 $\rho/(g/cm^3)$
0	1500.0	1.0
70	1470.0	1.0
70+	1700.0	1.8

所取的拖曳阵列包含 $M = 32$ 个水听器,相邻两个水听器的间距为 $\Delta x = 6m$,声源频率 f_0 取为 100Hz。为了减少需要存贮的数据的数量,我们用一个频率与 f_0 相近的复信号对仿真信号进行正交解调,以降低抽样率。第 q 个积分周期第 m 个水听器接收到的信号为:

$$d_{p,m}^q = x_{p,m}^q + \gamma_{p,m} \quad (5)$$

这里 $x_{p,m}^q$ 为信号, $\gamma_{p,m}$ 为复高斯噪声,当采用简正波模型描述实际接收信号 $x_{p,m}^q$ 时,则有:

$$x_{p,m}^q = \frac{A}{\sqrt{r_0^{(q)}}} e^{i\xi} \sum_{n=1}^N a_n(z_s) \cdot \exp[-ik_n r_0^{(q)}] \cdot \exp[((\omega_0 - \omega_c) - k_n \dot{r}^{(q)}) p \Delta t] \cdot \exp(-ik_n m \Delta x \cos \beta^{(q)}) \quad (6)$$

其中, A 是常数, $\xi = -\pi/4 + (\omega_0 - \omega_c) t_0$, $a_n(z_s) = \varphi_n(z_r) \varphi_n(z_s) / \sqrt{k_n}$, k_n 为第 n 阶简正波的水平波数, $\varphi_n(z_r)$ 和 $\varphi_n(z_s)$ 分别是第 n 阶模函数在接收器深度 z_r 和声源深度 z_s 的值。 $r_0^{(q)}$ 、 $\beta^{(q)}$ 分别为第 q 个时间段内目标相对于水平阵第 m 号基元的距离及方位角, $\dot{r}^{(q)}$ 为同一时刻目标的径向运动速度, ω_c 是正交解调的复信号的角频率。 $\gamma_{p,m}$ 的实部和虚部是均值为 0、方差为 σ^2 的相互独立的白高斯序列。我们计算第 0 号水听器上第 0 个时间抽样点声压的幅度,然后其它所有的声压值都由此归一化。就第一个计算的声压来说,信噪比可写为 $-20 \log \sigma$ 。

在计算中,降样频率取为 20Hz,积分周期取为 25.6s,因此在每个积分段中共有 512 个抽样点,即 $P = 512$ 。假定声源目标的初始距离为 $r_i = 22km$,

初始方位 $\beta_i = 90^\circ$, 终点距离 $r_f = 22\text{km}$, 终点方位 $\beta_f = 60^\circ$, 积分周期个数 $N_T = 120(51.2\text{min})$ 。拖曳船以 10km/h 的速度一直向东航行, 声源目标和拖曳船运行的示意图如图 1 所示。

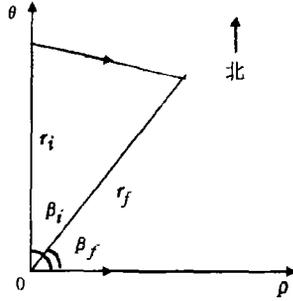


图 1 声源目标和拖曳船运行示意图

3.2 拷贝场信号计算

我们首先采用平面波作为计算拷贝声场的声学模型, 以分析当拷贝场与测量场在模型失配情况下的处理性能, 观察能使处理过程尽可能简单的模型的实用效果, 随后用与计算测量场相同的海洋声学环境来产生拷贝场信号, 进行匹配处理。

在本文中我们分别在不同信噪比条件下对声源目标进行定位, 在用网格法搜索时, 初始距离和终点距离都在 $11\text{km} \sim 33\text{km}$ 之间进行搜索, 步长取为 0.5km , 初始方位在 $80^\circ \sim 100^\circ$ 之间进行搜索, 步长取为 1° , 终点方位在 $50^\circ \sim 70^\circ$ 之间搜索, 步长也取为 1° 。为了减少运算量, 声源频率固定为 100Hz , 目标与拖曳阵深度分别固定在 30m 和 20m 处, 在本文中, 时空权矢量我们都采用汉明窗。

(1) 拷贝信号采用平面波模型

在平面波模型假设下, 经与测量场相同的正交解调、抽样处理后, 第 q 个积分周期第 m 个水听器的拷贝信号可表示成:

$$s_{p,m}^q = \exp[2\pi i f_0 \cdot q t_0] \cdot \exp[2\pi i f_0 p \Delta t] \cdot \exp\left[-2\pi i f_0 \cdot \frac{r_0^{(q)} + m \Delta x \cos \beta^{(q)} + p \Delta t \cdot \dot{r}^{(q)}}{c}\right] \quad (7)$$

声速 c 取为 1500.0m/s , 将式(5)、式(7)代入式(4), 在 $(r_i, r_f, \beta_i, \beta_f)$ 空间内对 B 求取最大值, 就可得到目标的运动参数, 处理结果表明: 在信噪比为 -15dB 时声速目标能被精确定位。但在低于 -28dB 时已得不到正确的定位结果, 此时 $r_i = 25\text{km}$ 、 $r_f = 25\text{km}$ 、 $\beta_i = 90^\circ$ 、 $\beta_f = 63^\circ$, 图 2、图 3 分别给出了信噪比为 -15dB 、 -28dB 时 B 随 r_f 、 β_f 变化的三维图。

(2) 匹配场模型

若采用实际海洋声学环境参数与简正波模型来产生拷贝场信号, 则有:

声学技术

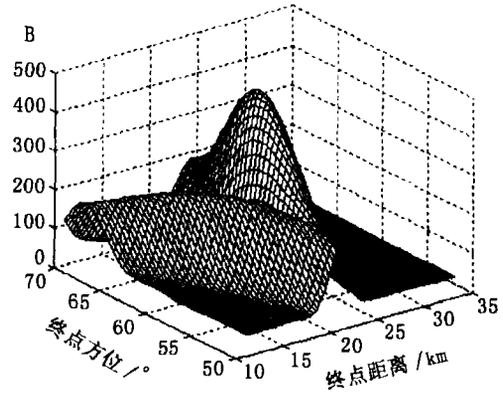


图 2 信噪比为 -15dB 时, B 随 r_f 、 β_f 变化的三维图

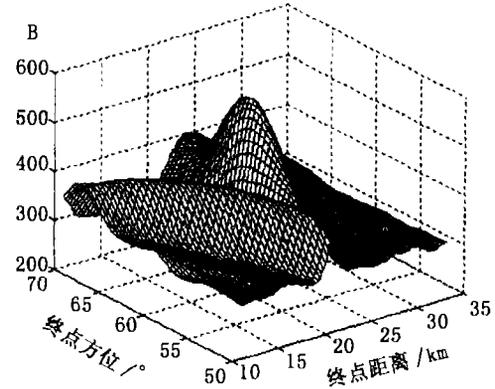


图 3 信噪比为 -28dB 时, B 随 r_f 、 β_f 变化的三维图

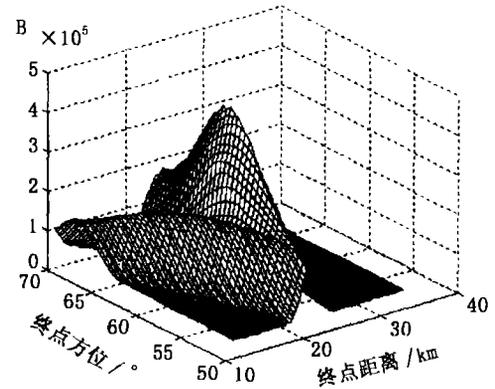


图 4 信噪比为 -15dB 时, B 随 r_f 、 β_f 变化的三维图

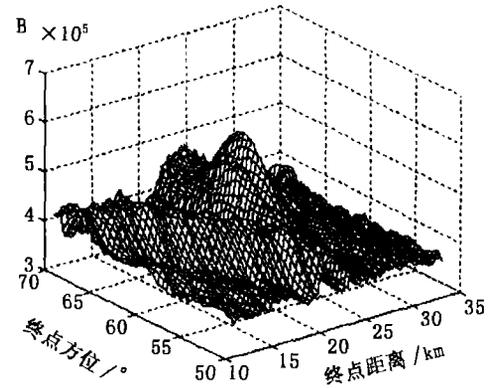


图 5 信噪比为 -33dB 时, B 随 r_f 、 β_f 变化的三维图

$$s_{p,m}^q = x_{p,m}^q = \frac{A}{\sqrt{r_0^{(q)}}} e^{i\epsilon} \sum_{n=1}^N a_n(z_i) \cdot \exp[-ik_n r_0^{(q)}] \cdot \exp[(\omega_0 - k_n \dot{r}^{(q)}) p \Delta t] \cdot \exp(-ik_n m \Delta x \cos \beta^{(q)}) \quad (8)$$

将式(5)、式(8)代入式(4),在 $(r_i, r_f, \beta_i, \beta_f)$ 空间内对 B 求取最大值,就可得到目标的运动参数。处理结果表明:在信噪比大于 -33dB 的条件下,声源目标都能被精确定位($r_i = 22\text{km}, r_f = 22\text{km}, \beta_i = 90^\circ, \beta_f = 60^\circ$)。图4、图5分别给出了信噪比为 -15dB 、 -33dB 时 B 随 r_f, β_f 变化的三维图。

4 结 论

将匹配场处理技术引入长时间积分进行处理是提高声呐在浅海进行水中运动声源目标远程定位与跟踪的一种途径,尤其在小信噪比条件下,这一方法更显优势。通过本文的仿真结果可以看出,用平面波传播模型作为计算拷贝声场的声学模型,在信噪

比不很低的情况下,可以得到满意的处理结果;而以实际海洋声传播模型作为计算拷贝声场的声学模型,不仅能获得比采用平面波模型更好的定位精度(可同时定深),而且在同样的条件下,能使处理增益提高约 7dB 。

参考文献:

- [1] Fawcett J A, Maranda B H. Localization by maximizing long-time integrated spectral power[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1992, 40(2):460-464.
- [2] Fawcett J A, Maranda B H. A hybrid target motion analysis/matched field processing localization method[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1993, 94(3):1363-1371.
- [3] Maranda B H, Fawcett J A. Defection and localization of weak targets by space-time integration[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(1):189-194.
- [4] Scott J Levinson, Evan K Westwood, Robert A Koch, Stephen K Mitchell, Carol V Sheppard. An efficient and robust method for underwater acoustic normal-mode computations[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1995, 97(3):1576-1585.

书 讯

马大猷教授主编的《噪声与振动控制工程手册》出版发行

由我国著名科学家、中科院院士马大猷教授主编的《噪声与振动控制工程手册》已由机械工业出版社出版,新华书店发行。全书共计13篇,1200页,189万字。手册从噪声与振动控制技术的基本理论着手,系统地阐述了隔声、吸声、消声、隔振、阻尼抑振以及最新的有源控制技术,是一部具有科学性、综合性、新颖性、实用性和权威性的大型工具书,体现了当前国内外噪声与振动控制技术水平。可供工程设计、环境保护、劳动保护、安全卫生等领域从事设计、研究、生产制造、监测评价、工程管理等工程技术人员以及有关专业师生使用、参考。每本定价96元。各地新华书店有售。也可与吕玉恒同志联系邮购(地址:上海市武宁路303号第九设计研究院,邮编200063,电话13901865998)。

中国船舶工业第九设计研究院 吕玉恒