

利用多普勒信息的多途被动定位方法^{*}

陈励军

(东南大学无线电系 南京·210096)

本文提出一种利用目标辐射噪声多普勒信息的多途被动定位方法,推导了该方法的参数估计方差下限。对海上实录的一条鱼雷辐射噪声信号进行了处理,给出了鱼雷深度、速度、运动轨迹的估计值,结果与实际相符,证明了算法的有效性。

关键词: 被动声纳, 被动测距, 多途信道

A multipath passive location algorithm using Doppler information

CHEN Lijun

(Radio Engineering Department, Southeast University Nanjing · 210096)

A multipath passive location algorithm is presented here using Doppler Shift information of the radiated noise of target. The lower bound of the variance of parameter estimation is derived. The radiated noise of a torpedo recorded in the field of sea is processed and the depth, speed and moving trace of this torpedo are estimated. The experimental results indicated that the algorithm is effective.

Key words: passive sonar, passive location, multipath channel

1 引言

在浅海多途环境下利用声波多途反射的特点进行被动定位的方法称多途被动定位方法^[1]。文献[2]对利用海面和海底的声信号多途时间延迟进行目标被动定位作了讨论,指出如果能够同时测出目标噪声经过多途信道到达接收点的海面和海底反射时延,即可确定目标的深度和距离参数;本人曾讨论了在仅能测出海面反射时延的情况下利用被测目标的先验和后验知识进行目标被动定位及修正的问题^[3],并给出了海上实际目标的测量结果。[3]文所述方法的缺点,一是如果事后不能精确得到目标的深度信息,则最终测量结果的精度也得不到保证;二是不能进行实

时或准实时测量。本文所述方法将噪声目标的多普勒信息引入多途被动定位,能够克服[3]文所述方法的缺点,对匀速定深直线运动目标进行准实时测量,给出位置和深度估计。

2 基本原理

William S. Burdic 指出^[1],在多途环境下,当一个声源通过两个以上不同的途径传播到达接收点时,只要能测出声路径间的声程差,就能确定声源的距离。J. C. Hassab 给出了利用海面和海底反射路径进行被动测距的计算公式^[2],并分析了两种时延估计方法——自相关法和倒谱法的性能。本文作者讨论了利用海面反射路径及目标深度信息进行被动测距的方法,并给出了海上实验结果^[3]。

* 第一作者: 陈励军,男,1962年12月生,讲师

收稿日期: 98-1-5; 修回日期: 98-5-6

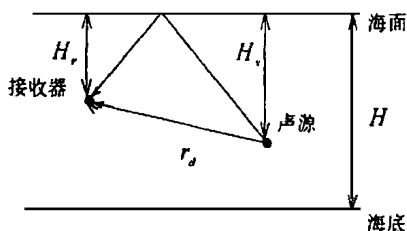


图1 测距原理示意图

图1中,声源的辐射噪声除了经过直达途径到达接收点外,还可能通过海面或海底的反射途径到达接收点,在此我们仅考虑海面反射情况。由[3]文,假设 τ 代表海面反射路径相对于直达路径的时间延迟, H_r 、 H_s 分别代表接收器深度和声源深度, H 代表海深。则被测目标与水听器之间的距离 r_d 可由(1)式计算:

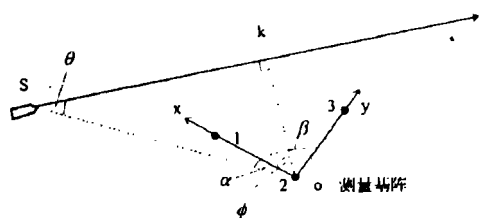
$$r_d \approx 2H_r H_s / \tau c \quad (1)$$


图2 水听器及被测目标位置几何示意图

为了对被测目标进行定位,还必须测出目标的方位。如图2示,在此设3个基元呈直角布放在1、2、3号位,其构成的平面与海面平行,基元间距为 d 。设目标距离 $r_d \gg d$,这时目标方位与x轴及y轴的夹角 α 、 β 分别为:

$$\alpha = \cos^{-1}(d_{21}/d) = \cos^{-1}(\tau_{21}c/d) \quad (2)$$

$$\beta = \cos^{-1}(d_{23}/d) = \cos^{-1}(\tau_{23}c/d) \quad (3)$$

式中 d_{21} 为直达声到达1号、2号基元的声程差, d_{23} 为直达声到达2号、3号基元的声程差。 τ_{21} 代表1号基元相对于2号基元的延时, τ_{23} 代表3号基元相对于2号基元的延时, c 为声速。目标在 xOy 平面的投影座标为:

$$x_s = r_d \cos(\alpha), \quad y_s = r_d \cos(\beta) \quad (4)$$

因事先不知道目标深度,故只有事后取得目标深度内测数据记录后才能用(1)~(4)式估计目标的运动轨迹。若我们跟踪目标辐

射噪声的线谱,并测得其多普勒频移,则可估计目标的速度,反过来通过(1)~(4)式就可以估计出目标的深度和距离。这样无须等待被测目标的内测数据,在现场即可准实时地估计目标轨迹参数。下面介绍这种估计方法。

由(4)式可以得到被测目标速度的表达式。设 t_1 时刻目标的位置为 $[x_s(t_1), y_s(t_1)]$, t_2 时刻目标位置为 $[x_s(t_2), y_s(t_2)]$, $\Delta t = t_2 - t_1$,则平均速度为:

$$v = \frac{[x_s(t_2) - x_s(t_1)]^2 + [y_s(t_2) - y_s(t_1)]^2}{\Delta t} \quad (5)$$

另一方面,通过测量目标的多普勒频移,亦可估计目标的速度。如图2所示,目标方位与目标航向间夹角为 θ , ϕ 为目标距基阵中心最近点所在位置的方位与x轴的夹角。当目标深度与基阵深度相差不大时,可近似为:

$$\theta = (\pi/2) - \alpha - \phi \quad (6)$$

目标声信号在位置S处的多普勒频偏为:

$$\Delta f = v f_0 \cos \theta / c \quad (7)$$

f_0 为目标辐射噪声线谱的原频率, c 为声速。当多普勒频偏已知时,速度 v 可由上式求出。如图2所示,设 t 时刻目标位置处于距离基阵最近处(位置 k 处),此时阵元接收到的信号频率即为目标辐射噪声的原频率 f_0 ,如果将阵元在 t_1 时刻(目标在 S 处)接收到的目标信号频率记为 f_1 ,则多普勒频偏 $\Delta f = f_1 - f_0$, $f_0 = f$,代入(7)式即得:

$$v = \frac{\Delta f}{f_0 \cos \theta} = \frac{(f_1 - f)c}{f \cos \theta} \quad (8)$$

由(1)、(5)、(8)式可计算目标的深度估计值:

$$H_s = v d \Delta t / (2H_r - R) \quad (9)$$

$$\text{其中: } R = \left[\frac{\tau_{21}(t_1)}{\tau(t_1)} - \frac{\tau_{21}(t)}{\tau(t)} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{23}(t_1)}{\tau(t)} - \frac{\tau_{23}(t)}{\tau(t)} \right]^2 \quad (10)$$

有了目标深度的估计值后就可通过(1)式确定距离估计量,从而计算目标轨迹。

3 误差统计特性

设 τ_{21} 、 τ_{23} 、 f_1 、 f 的估计值互不相关,由

(9) 式可计算 H_s 的估计方差:

$$Var(H_s) = \left\{ \frac{\partial H_s}{\partial v} \right\}^2 Var(v) + \left\{ \frac{\partial H_s}{\partial R} \right\}^2 Var(R) \quad (11)$$

$$Var(v) = \left\{ \frac{\partial v}{\partial f_1} \right\}^2 Var(f_1) + \left\{ \frac{\partial v}{\partial f} \right\}^2 Var(f) + \left\{ \frac{\partial v}{\partial \tau_{21}(t)} \right\}^2 Var[\tau_{21}(t)] \quad (12)$$

$$Var(R) = \left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau_{21}(t_1)} \right\}^2 Var[\tau_{21}(t_1)] + \left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau_{21}(t)} \right\}^2 Var[\tau_{21}(t)] + \left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau_{23}(t_1)} \right\}^2 Var[\tau_{23}(t_1)] + \left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau_{23}(t)} \right\}^2 Var[\tau_{23}(t)] + \left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau(t_1)} \right\}^2 Var[\tau(t_1)] + \left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau(t)} \right\}^2 Var[\tau(t)] \quad (13)$$

设频率估计方差为 σ_f^2 , 互相关时延估计的方差为 σ_c^2 (即 τ_{21} , τ_{23} 的估计方差), 水面反射多途时延估计的方差为 σ_s^2 (即 τ 的方差), 则:

$$Var(v) = \left[\left\{ \frac{\partial v}{\partial f_1} \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial v}{\partial f} \right\}^2 \right] \sigma_f^2 + \left\{ \frac{\partial v}{\partial \tau_{21}(t)} \right\}^2 \sigma_c^2 \quad (14)$$

$$Var(R) = \left[\left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau_{21}(t_1)} \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau_{21}(t)} \right\}^2 \right] \sigma_c^2 + \left[\left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau_{23}(t_1)} \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau_{23}(t)} \right\}^2 \right] \sigma_c^2 + \left[\left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau(t_1)} \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial R}{\partial \tau(t)} \right\}^2 \right] \sigma_s^2 \quad (15)$$

当采用周期图法进行谱估计时, 频率估计方差的 CRAMER-RAO 下界为^[4]:

$$[CRLB]_f = 3/[2\pi^2 T^3 (SNR)] \quad (16)$$

其中 T 表示观察时间, SNR 表示 1Hz 带宽内的信噪比。采用互相关法对两个阵元间的时延进行估计时, 其估计方差的 CRAMER-RAO 下界为:

$$[CRLB]_c = \left\{ 2T \int_{-T/2}^{T/2} \frac{Y(f)^2}{[1 - Y(f)^2]} df \right\}^{-1} \quad (17)$$

其中 T 为观察时间, $Y(f)$ 为相关函数:

$$Y(f)^2 = \frac{S^2(f)}{S^2(f) + N^2(f)} \quad (18)$$

其中 $S(f)$ 、 $N(f)$ 分别为信号和背景噪声的谱密度函数。

用自相关法对单个阵元的水面反射多途时延进行估计时, 其估计方差的 CRAMER-RAO 下界为^[5]:

$$[CRLB]_s = \left\{ \frac{T}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[2\alpha \cos(\alpha D_0) S(\omega) / [1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos(\alpha D_0)] S(\omega) + N(\omega) \right]^2 d\omega \right\}^{-1} \quad (19)$$

其中 α 为水面反射系数, D_0 为多途时延值, $S(\omega)$ 和 $N(\omega)$ 分别为信号和背景噪声的谱函数。当满足大的时间带宽积条件且信号和噪声具有平坦的连续谱时, (19) 式可表为^[6]:

$$[CRLB]_s = \frac{1}{BT} \frac{6}{\pi^2 B^2} \left[\frac{1}{(1 - R^2)} - 1 \right]^{-1} \quad (20)$$

这里 $R = 2\alpha S / [(1 + \alpha^2) S + N]$

其中 B 为信号带宽, T 为观察时间, S 和 N 分别为信号和背景噪声的谱值。由式 (12) ~ (20) 可以计算被测目标深度和距离的估计方差下界。图 3 和图 4 分别给出了一组目标

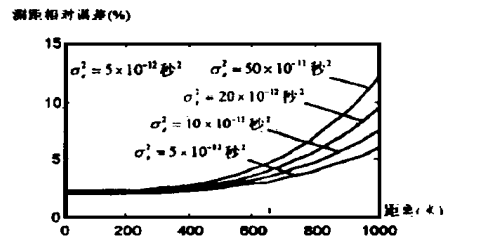


图 3 水面多途时延估计精度对测距精度的影响

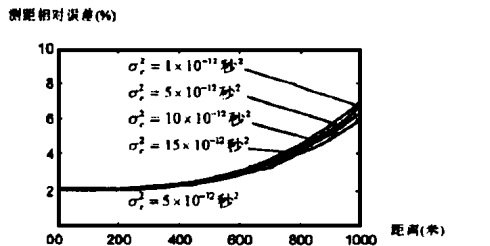


图 4 互相关时延估计精度对测距精度的影响

距离测量精度随时延估计方差变化的计算结果。由图可知, 水面反射时延估计精度是影响

测距精度的主要因素。

4 实验结果

为验证算法的有效性,对海上录制的一航次鱼雷噪声信号进行了处理。该雷按预先的程序设定在 9m 的恒定深度上匀速直线航行,航速 30 节。水听器基阵如图 2 所示布放于水下 4m 处,基元间距为 1m。水听器接收信号经宽带前置放大器放大后录制在磁带机上,事后再进行回放处理。基元间相对时延 τ_{11} 、 τ_{21} 的测量采用互相关时延估计方法,精度到达 $5\mu\text{s}$;水面反射时延 τ_r 的测量采用自相关法对 2 号水听器的接收信号进行处理,精度达到 $20\mu\text{s}$ 。图 5 为基阵接收到的鱼雷辐射噪声时延测量结果。图 6 是接收到的鱼雷线谱频率随时间的变化,图中频率轴使用相对频率表示。图 7 为鱼雷运动轨迹的实际测量结果。鱼雷深度估计值为 9.6m,速度估计值为 15.8m/s 。根据实际所达到的时延估计精度及图 3、图 4 的测距精度分析结果,图 7 的鱼雷轨迹定位精度应不低于 10%。

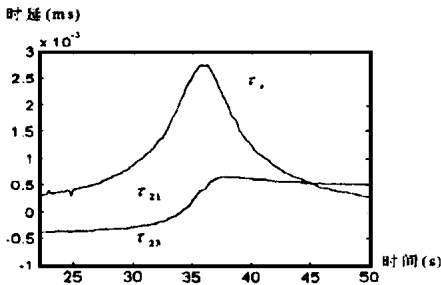


图 5 时延测量结果

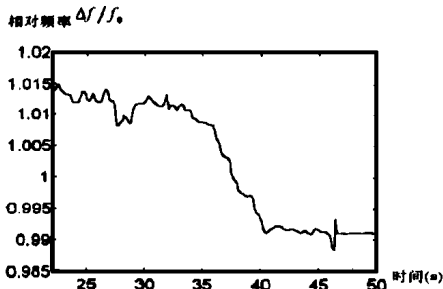


图 6 低频线谱跟踪测量结果

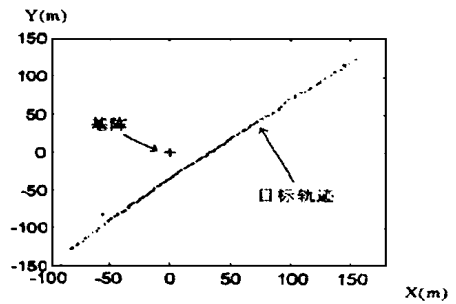


图 7 鱼雷轨迹测量结果

5 结论

本文针对水下运动目标的特定情况——匀速、定深、直线航行的水下移动噪声源的定位跟踪问题,提出了一种利用目标辐射噪声多普勒信息及水面多途反射时延信息的被动定位跟踪算法。从理论的角度推导了该算法的参数估计方差下限。结合实际对海上录制的一航次鱼雷辐射噪声信号进行了处理,给出了鱼雷的深度估计值、速度估计值和运动轨迹。测量结果与实际情况相吻合,由此验证了该方法的实用性。对于匀速、变深、曲线航行的更一般情况下的目标被动定位跟踪问题,作者将在今后的工作中继续深入研究。

参考文献

- 1 William S. Burdic. Underwater acoustic system analysis. Prentice-Hall, Inc Englewood Cliffs, NJ 07632, 1984: 426~429
- 2 J. C. Hassab. Passive tracking of a moving source by a single observer in shallow water. Journal of Sound and Vibration, 1976; 44(1)
- 3 陈励军. 一种多途环境下水下运动目标被动定位方法. 声学技术, 1998; 17(2): 74~77
- 4 郑兆宁, 向大威. 水声信号被动检测与参数估计理论. 科学出版社, 1983: 585~588
- 5 J. P. Ianniello. The cramer-rao lower bound on multipath time delay estimation. NUSC Tech. Memo 831067, May. 1983
- 6 J. P. Ianniello. Large and small error performance limits for multipath time delay estimation. IEEE Trans. on ASSP, 1987; 34(2): 245~251