一种多途环境下水下运动目标被动定位方法

陈励军

(东南大学无线电系　南京 · 210018)

本文根据实际情况建立多途信道传播模型。由此模型提出了一种利用单水听器进行目标距离事先预估, 事后修正的被动测距方法。文章分析了测距误差。在此基础上又提出了利用 3 个水听器组成的基阵进行运动目标被动跟踪定位的方案。根据该方案建立的定位系统进行了海上试验, 数据处理结果令人满意。海上试验表明, 该方案是一种易于实现而又非常实用的方法。

A Method of passive localization of underwater maneuvering target in multipath water channel

CHEN Lijun

(Radio Engineering Department, Southeast University Nanjing · 210018)

In this artical a multipath transmission model is selected acoording to the real situation. A passive localization method is raised with which the range is estimated first and corrected after the measurement is completed. We have analyzed the estimation error and established a passive localization method using a three-hydrophone array to track a moving target. A system from this idea was tested in the ocean and the results are satisfied. Acording to the results this scheme is very practical and can be realized easily.

1　引　言

在水下靶场或某些其它应用场合, 常常需要对水下运动目标的位置进行实时或准实时的精确跟踪测量。传统的方法是在测量现场的水底较大范围内布放多个水听器构成测量基阵, 在目标载体上安装声信标或应答器实现对目标的跟踪定位。近年来国内外研究部门在水下目标定位方面进行了卓有成效的研究。这些定位系统有的采用同步钟方法, 即在运动载体上安装声信标, 测量船上安装可收放式接收基阵, 声信标装置与接收系统之间用高精度同步钟同步的方法实现对目标的实时跟踪定位; 有的采用纯被动工作方式, 即目标载体上不需要安装任何附加装置, 利用目标的辐射噪声进行实时被动定位跟踪。目前国内外在近距离水下运动目标实时跟踪测量的手段上已日趋完备, 测量精度也较高。

以上所述方法, 虽然其测量精度都比较高, 但从设备造价、使用的方便性的角度来看, 值得我们探讨。海底布阵无疑是代价巨大的, 且难以维护。被测目标载体上安装附加设备会给使用者带来不便。被动定位方式对基阵的基元位置精度要求极高, 对声波到达各基元的相对时间延迟估计的精度亦有极高要求, 处理方法比较复杂。以上方法所需水听器数较多, 从基阵结构到电子机柜的工程量都比较大, 造价较高。

据此, 本文提出一种低成本, 结构简单而

作者: 陈励军, 男, 1962 年 12 月生, 讲师

收稿日期: 97-3-3; 修回日期: 97-5-13

实用的被动测量系统。该系统根据水下多途传播模型,以单水听器进行距离估计,事后取得目标航行深度的内测记录数据后,可以通过校正取得目标的精确运动轨迹。其特点是结构较简单,所需水听器数量少,可方便地组成便携式系统,同时结合其它一些已知信息,通过事后修正可以达到一定的测量精度。

2 原 理

2.1 声传播模型及距离估计方法

图 1 表示多途 环境下的声传播模型。在此仅考虑一次反射。水听器接收到的信号除了目标的直达声信号外,还包括海面反射和海底反射声信号。直达声信号到达水听器在传播时间上存在相对延迟。我们用 $_s$ 代表海面反射与直达声之间的相对延迟, $_b$ 代表海底反射声与直达声之间的相对延迟,H_r、H_s 分别代表接收器深度和声源深度。则被测目标与水听器之间的距离 r_d 可由下式解算[1]:

$$r_d = \{(\frac{H}{H_r} - 1)[HH_r - (\frac{_sc}{2})^2] - (\frac{_bc}{2})^2\} / \{\frac{_bc}{2} + \frac{_sc}{2}(\frac{H}{H_r} - 1)\} \quad (1)$$

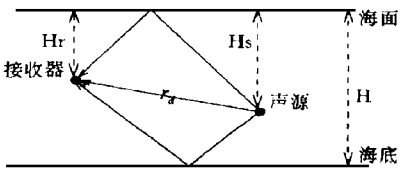


图 1 仅考虑一次反射的水下多途传播模型

由于海底反射特性的复杂性,海底反射时延 $_b$ 不易测出。若我们事先知道目标航行的预定深度 H_s,则目标距离可按下式解算:

$$r_d = \frac{2H_rH_s}{_sc} - \frac{_sc}{2} \quad (2)$$

由于 $_s$ 一般为毫秒级,因此后面一项常常可以忽略,这时(2)式变成:

$$r_d \approx \frac{2H_rH_s}{_sc} \quad (3)$$

如果目标实际航行深度变化不大,则 r_d 可大体上反映目标的距离。事后取得目标载体内部深度记录数据后,我们可以根据目标的实际航行深度对 r_d 进行修正,使距离测量精度得以提高。

2.2 多途时延估计

多途时延估计的方法很多[2~3]。本文采用自相关法进行多途时延估计。在此我们仅考虑双路径传播模型,即仅考虑存在直达声路径和海面一次反射声路径的情况。这时的接收信号可表为:

$$r(t) = s(t) + as(t - _s) + n(t) \quad (4)$$

其中 a 为海面反射系数。将水面看成绝对软边界,则可近似认为 $-1 \le a \le 0$。设背景噪声 $n(t)$ 与目标辐射噪声 $s(t)$ 不相关,R_s 代表信号 $s(t)$ 的自相关函数,R_n 代表环境噪声 $n(t)$ 的自相关函数,则接收到的信号 $r(t)$ 的自相关函数为:

$$R_r(D) = R_s(D) + aR_s(D - _s) + aR_s(D + _s) + R_n(D) \quad (5)$$

由上式可见自相关函数 $R_r(D)$ 除了在 $D=0$ 处有一个主极大值外,还在 $D = \pm _s$ 处有副极大值,且由于系数 a 是负值,这两个副极大值也是负值。利用这个特性我们可以求出 $_s$ 的估计值 $_s$。

2.3 方位估计

为了对被测目标进行定位,我们还必须测出目标的方位。如图 2 所示,在此假设 3 个基元呈直角布放在 1、2、3 号位,3 个基元构成的平面与海面平行。基元间距为 d。假设目标距离 r_d d,这时目标方位与 X 轴及 Y 轴的夹角 、 分别为:

$$\begin{aligned} &= \cos^{-1}(\frac{d_{21}}{d}) = \cos^{-1}(\frac{_{21}c}{d}) \\ &= \cos^{-1}(\frac{d_{23}}{d}) = \cos^{-1}(\frac{_{23}c}{d}) \end{aligned} \quad (6)$$

d_{21} 为直达声到达 1、2 号基元的声程差,d_{23} 为直达声到达 2、3 号基元的声程差。$_{21}$ 代表 1 号基元相对于 2 号基元的时延, $_{23}$ 代表 3 号基元相对于 2 号基元的时延,c 为声速。

目标在 XOY 平面的投影座标为:

$$x_s = r_d\cos(\quad) \qquad y_s = r_d\cos(\quad) \qquad (7)$$

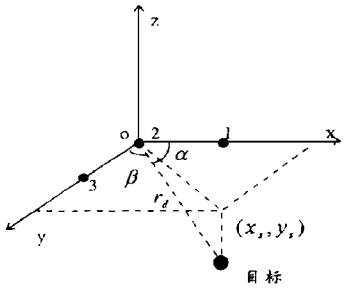


图 2　测量基阵及目标几何位置图

3　误差分析

在一定的时间带宽积条件下,两个基元间的时延估计精度可达微秒级[4],目标方位估计可以达到较高的精度(< 0.5°)。在被动测量问题中,距离测量是关键,在此本文仅讨论测距精度。

3.1　随机误差

据(3)式

$$r_d = 2H_rH_s / {}_sc \qquad (8)$$

其中 H_r 为接收深度,H_s 为目标深度,c 是水中声速为常数,${}_s$ 为海面反射时延。接收深度 H_r 虽为已知量,但由于海面起伏,H_r 的实际值也是起伏的。H_s 是目标深度,其值相对于波动的海面来说也是随机起伏的。${}_s$ 是海面反射波与直达声波的相对时延,它的估计值也存在随机误差。由于 H_r、H_s、${}_s$ 这 3 个量是互不相关的,因此 r_d 的估计方差可写为:

$$Var(r_d) = \left(\frac{r_d}{H_r}\right)^2 {}^2_{H_r} + \left(\frac{r_d}{H_s}\right)^2 {}^2_{H_s} + \left(\frac{r_d}{{}_s}\right)^2 {}^2_{s} = \left(\frac{2H_s}{{}_sc}\right)^2 {}^2_{H_r} + \left(\frac{2H_r}{{}_sc}\right)^2 {}^2_{H_s} + \left(\frac{2H_rH_s}{{}^2_sc}\right)^2 {}^2_{s} = \frac{4}{{}^2_sc^2}\left[H_s^2\,{}^2_{H_r} + H_r^2\,{}^2_{H_s} + \left(\frac{H_rH_s}{c}\right)^2 {}^2_{s}\right] \qquad (9)$$

其中 ${}^2_{H_r}$、${}^2_{H_s}$、${}^2_{s}$ 分别为接收深度,目标深度和时延估计的方差,接收水听器是固定在水下某个深度的,因此海面起伏是引起 ${}^2_{H_r}$、的主要原因。目标的航行深度在短时间内不会发生大的起伏,因此 ${}^2_{H_s}$ 主要也是由波动海面引起的。${}_s$ 的估计尽管可以达到微秒级,但 ${}_s$ 的起伏还与波动的海面有关[5]。当海面的波浪起伏增大时,时延估计的方差也随之增大。另外,在目标深度和接收水听器深度不变的条件下,随着距离的增大,海面反射时延 ${}_s$ 减小,此时(8)式中各项都将增大,$Var(r_d)$ 也将随之增大。

3.2　偏　差

根据误差理论,由(8)式,可得相对测距误差:

$$\frac{r_d}{r_d} = \frac{H_r}{H_r} + \frac{H_s}{H_s} - \frac{{}_s}{{}_s} \qquad (10)$$

上式中 H_r/H_r 是由接收深度测量误差引起的,接收深度可以精确测定,所以该项误差可以控制在很小范围内; ${}_s/{}_s$ 是时延估计的方差,自相关法时延估计是无偏的,此项误差可以做到很小;H_s 是目标深度,由于目标深度内部记录系统只能在目标被回收之后才能得到,因此在取得目标深度数据之前,H_s 的值只能用设定值代替。但实际的目标运动深度并不完全与设定值相符,而且还可能是时变的,这时 r_d 的测量值就存在较大的误差,我们可以把这种误差看成为偏差。由以上分析可以看出,r_d 的测量偏差主要由 H_s 的偏差引起。如果事后能够取得 H_s 的实际数据,这种偏差就可以得到修正,修正后的测距精度取决于内测系统对 H_s 的测量精度。

4　海上试验数据处理结果

我们使用上述方法对在某海区进行的水下鱼雷试验数据进行了处理。试验海区水深约 90m,鱼雷运动深度预定为水下 35m。测量水听器深度 3.5m,水听器间距 1m,鱼雷围绕测量基阵运动。基阵各基元的信号经多通道磁带记录仪记录,在实验室中经数据采集器采集后送入计算机进行处理。图 3 是在取得目标深度内测数据之前,假定鱼雷按设定深

度航行而得到的水平运动轨迹。图 4 是在事后取得鱼雷深度内测数据, 对距离估计值重新修正后的运动轨迹图。图中轨迹的某些位置数据比较离散, 主要原因有以下 3 点: (1) 鱼雷辐射噪声起伏较大, 当基阵接收端信噪比较小时, 多途时延估计的精度降低; (2) 海面波浪的存在实际上可以看成为水面反射平面的随机起伏, 因而海面反射声道的实际长度也存在随机起伏(即(9) 式中的第 2 项) ; (3) 图中的鱼雷轨迹数据未经任何平滑处理。上述原因中第 1 点可以通过适当增加相关数据长度, 提高系统处理增益加以改善; 第 3 点只要采用剔野值及数据平滑技术(如卡尔曼滤波技术) 即可收到良好效果; 而第 2 点即海面起伏的影响是无法避免的。

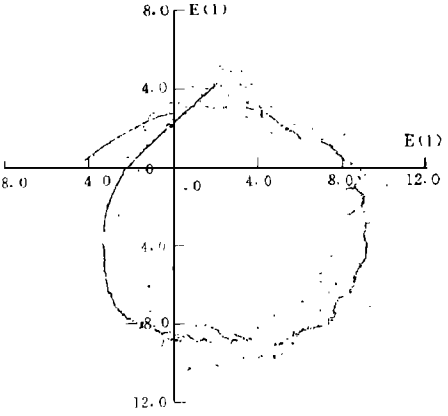
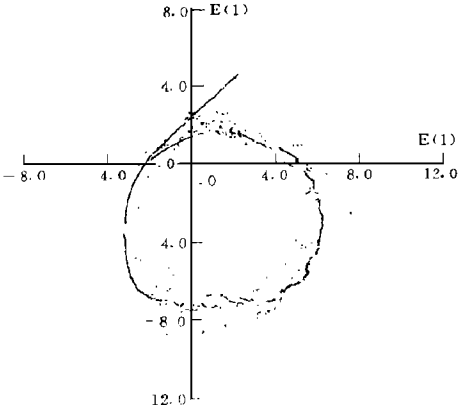


图 3　鱼雷实际深度未知, H_s= 35m 时的鱼雷运动轨迹(座标单位: 米)

5　结　论

由理论分析和海上实际目标测量结果可以看出, 这种利用水面反射路径进行被动定位的方法, 对近距离水下目标的跟踪定位是有效的。系统构成简单经济, 制作成本较低。现场测量结果在未作修正之前可以反映目标的基本运动情况, 在经过修正之后可以达到一定的精度要求, 其精度与鱼雷深度内测系统相当。由于系统组成不会非常庞大复杂, 因而可以做成小巧的、便携式的测量系统, 在测量现场方便地使用。该方法的缺点是在不知道目标确切深度时测量偏差较大, 这种偏差只能通过事后取得目标的深度内测记录数据后才能得到修正。



(座标单位: 米)

图 4　对距离估计值重新修正后的运动轨迹

参考文献

1 J. C. Hassab. Passive tracking of a moving source by a single obeserver in shallow water. Journal of Sound and Vibration 1976; 44

2 J. P. Ianniello. High-resolution multipath time delay estimation for broad-band random signals. IEEE Trans. on ASSP 1988; 36(3) : 320～327

3 J. P. Ianniello. The variance of multipath time delay estimation using autocorrelation. NUSC Tech. Memo 831008, 1983; Jan 24

4 J. P. Ianniello. The Cramer-Rao lower bound on multipath time delay estimation. NUSC Tech. Memo 831067, 1983; May 9

5 V. P. Akulichera and V. M. Frolov. Fluctuation of the levels, angles, and time differences of the arrivals of sound signals received over separate paths in the ocean. Sov. Phys. Acoust 1986; 32(6) , Nov-Dec