

# 水下目标跟踪系统中的抗多途专家系统<sup>\*</sup>

赵 羽 梁国龙 陈晓忠 杨 春

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

2003年2月13日收到

**摘要** 众所周知,水下声信道是相干多途信道,信号在信道中的多径传播使得接收信号序列复杂化,因而极大地增加了信号处理的难度。对于水下目标跟踪系统,从带有干扰的接收数据中挑选出直达脉冲是系统正常工作的必要前提。本文着重介绍了系统软件的核心部分——专家系统,它用于实时跟踪系统的数据预处理,负责在多途干扰背景中提取定位解算所需的有效信息。通过计算机仿真、松花湖试验和海上试验的验证,专家系统可以准确地挑选出直达脉冲和最佳解算阵元,因而确保了系统的定位精度与测深精度。

**关键词** 专家系统,水声跟踪,多途干扰,水声定位

## Anti-multichannel expert system for underwater target tracking system

ZHAO Yu LIANG Guo-Long CHEN Xiao-Zhong YANG Chun

(Underwater Acoustic Engineering Dept., Harbin Engineering University, Harbin 150001)

**Abstract** It's well known that underwater acoustic channel is a coherent multi-path channel, which brings difficulties in signal processing because of the complexity of the received signal sequence. For the Underwater Target Tracking System, it is essential to select the direct pulses correctly for proper operation. The expert system used for selection of valid information in the multi-path sequence is presented in this paper. By means of simulation, lake trial and sea trial, it is proved that the expert system can sort out the direct pulses and the right buoys effectively so as to ensure the precision of position and depth location for the underwater target tracking system.

**Key words** Expert system, Underwater acoustic tracking, Multi-path interference, Underwater acoustic location

### 1 引言

水下目标跟踪系统(UTTS)是一个同步与异步工作方式兼容的水声跟踪定位系统,主要任务是精确跟踪和定位加装合作声信标的多个

水下目标的运动轨迹。

系统的定位原理是通过测量 Pinger 信号(双窄 CW 脉冲信号,依次为测距脉冲和测深脉冲)中的测距脉冲从目标声源传播到各个接收阵元(浮标)的时延(对同步系统)或时延差

<sup>\*</sup> 全国优秀博士论文基金(199939)和高等学校优秀青年教师基金资助项目

(对非同步系统),采用球面交汇(对同步系统)或双曲面交汇(对非同步系统)来确定目标在发射信号时刻的水平位置;目标深度则是通过Pinger双脉冲深度遥测译码得到的。系统中的十个浮标级联成长为16km、宽为5km的典型测量区域,用于可同时测量5个水下目标的轨迹,各目标信号分频工作。为抗各频率通道间的通道串漏,采用了瞬时频率方差检测器<sup>[1]</sup>。因而,时延和频率分别为定位解算及信号检测所需的重要参数。本文重点介绍系统的抗多途专家系统部分,关于系统的详细资料另文介绍。

由于界面反射的影响<sup>[2,3]</sup>,信号在信道中是多径传播的,其结果是使接收信号序列除直达声外还有多次反射声,成为脉冲干扰,使脉冲结构复杂化。直达脉冲的时延值是系统的重要信息,一方面,直达测距脉冲的选取直接影响到目标定位;另一方面,测距、测深脉冲间代表目标的深度信息。因此,能否从脉冲序列中正确地选择直达测距、测深脉冲,对于定位精度和测深精度是十分关键的。上述这些问题,正是专家系统所要解决的问题,也是本文的主要内容。

## 2 专家系统

专家系统用于实时跟踪系统的数据预处理,负责在多途干扰的背景中提取定位解算的所需数据,包括有效脉冲选择、阵元选择(简称选元)等功能。

### 2.1 基本信息量

每个重复周期目标发射两个同频脉冲,前面的为测距脉冲,后面的为测深脉冲。测距和测深脉冲间的时差为 $\tau$ ,取值范围 $(\tau_{\min}, \tau_{\max})$ , $\tau_{\min}$ 和 $\tau_{\max}$ 分别为目标航行的最小、最大深度对应的时间间隔,即 $\tau_{\min}$ 表示目标工作在最小深度0米, $\tau_{\max}$ 表示目标工作在最大深度。两脉冲的间距确定目标深度,二者之间的关系为:

$$H = H_{\max} \times (\tau - \tau_{\min}) / (\tau_{\max} - \tau_{\min}) \quad (1)$$

其中 $H$ 为目标深度, $H_{\max}$ 为深度最大量程。

每个周期由浮标通过无线电通信链向显控分机提供一组水声信息。一组信息中至多包含浮标接收到的5个脉冲的信息(含测距和测深脉冲的直达和反射信号),每个脉冲含五个参数:载频(或多普勒频移),脉宽,时延,包络幅度(或能量)和瞬时频率方差。

### 2.2 脉冲序列结构

由于多途信道的影响<sup>[2,4]</sup>,浮标接收到的信号序列除直达声外还会接收到反射声,成为脉冲干扰。若把反射声误作直达声进行定位解算,将会导致定位误差加大,甚至产生定位错误。定位精度及测深精度的保证均依赖于专家系统有效地从带有反射声干扰的脉冲序列中挑选出测距和测深脉冲的直达声。

为了合理地设计专家系统软件,同时为浮标处理机的脉冲数据预处理提供依据,首先分析一下各种典型情况下的脉冲结构。图1是根据信道仿真结果并结合实际工作状态给出的各种脉冲序列结构示意图,基本上包含了除通道串漏外的各种可能的情况,其中带黑点的脉冲表示直达测距、测深脉冲。由于通道串漏可在浮标处理器中由瞬时频率序列分析的方法有效剔除,因此在专家系统中不予考虑。

在大多数情况下(图1中a~f),在预处理器中选出幅度最大的四个脉冲作为有效信号均不会丢失直达声信息,但在后三种条件下将可能丢失一个测深直达声信息。在所有可能的条件下,选六个幅度最大的脉冲都不会丢失信息(声场阴影区除外)。为了保留测距直达声信息,可强制保留每个脉冲群中的第一个脉冲(若某脉冲与前一脉冲的时延差大于200ms即可以认为属于另一脉冲群),另保留四个幅度最大的脉冲,则除g情况下可能丢失一个测深脉冲外无信息损失。由于深度信息冗余量较大,而g图所示结构(测距和测深脉冲各有两个以上反射声大于直达声)仅在特定的海况下特定的距离范围内才会发生,丢失某个浮标的一个测深脉冲并不影响定位和目标深度测量。“保留首脉

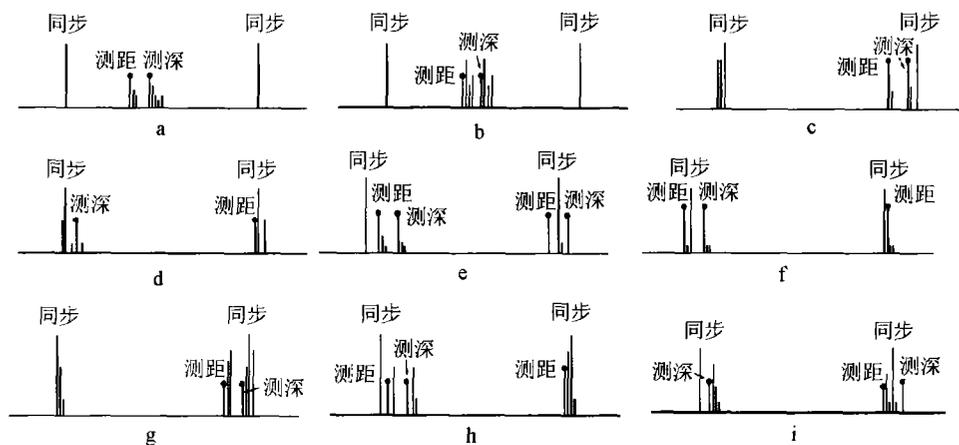


图 1 脉冲序列结构示意图

冲”的重要意义在于最大限度地减小测距直达声的漏报。尽管当测距脉冲有漏报时，只要测深脉冲的信息量完整，同样可以正确定位。但我们还是考虑尽量利用测距脉冲的信息进行定位，毕竟测距脉冲的直达声的特征更明显，挑选出错的概率更小些。

若每个周期只能保留 4 个脉冲的信息，则在预处理中对脉冲分群并保留“领头羊”就显得更为重要。一至两个领头脉冲之外，保留两至三个最强的脉冲仍不能保证测深信息被完整地保留下来，虽不至于影响深度测量，但对专家系统确定该测距脉冲的“合法身份”还是有重要影响的，因此有必要采取辅助的预处理措施。如首脉冲后加时间窗，在窗内到达的信号判为无效信号。

为避免测距脉冲的反射波屏蔽测深脉冲的直达波，该屏蔽窗应满足两点基本要求：一是同步时刻左右窗是连续的，窗长度需合并计算，这一点为了保证脉冲分群不受同步周期的影响；二是只能在每脉冲群的领头脉冲后加屏蔽窗，其它脉冲不能加。必须保证抗串漏措施切实有效，以避免对测距直达声产生屏蔽。

### 2.3 有效脉冲的选择

在基站接收到浮标传来的脉冲信息后，为了保证定位解算得出正确解，首要的前提是从带有反射声干扰的脉冲序列中正确地选择直达

脉冲信号。对于直达脉冲的挑选，可根据一定的判据，为每一个脉冲评定测距、测深的品质因数。脉冲的品质因数为该脉冲是有效测距（或测深）脉冲的可能性因子，该值越大即表示该脉冲是有效测距（或测深）脉冲的可能性越大。以测距、测深品质因数的大小和一定的规则为依据，即可选出有效、备用测距脉冲和有效测深脉冲。

设每个浮标记录了  $N$  个脉冲的信息，信号的重复发射周期为  $T$ ，信号的载频为  $f_0$ ，为保留足够余量，目标最高航速按 60 节计算，定义  $Q_a$  为脉冲的测距品质因数， $Q_b$  为脉冲的测深品质因数， $Q_a$  和  $Q_b$  的初值为 0， $t_{ki}$  为第  $k$  个同步周期收到的第  $i$  个脉冲信号的时延值， $t_{k-1}$  表示上个周期选出的有效测距或测深脉冲的时延值， $E_{\max}$  表示最大或次大的能量值， $V_{\min}$  表示最小和次小的瞬时频率方差值，则有效脉冲的选择可按如下方法定义品质因数加以判别：

判据 1: 考虑到多卜勒效应的影响，当同周期双脉冲间距  $\Delta t (= t_{kj} - t_{ki})$  为

$$\tau_{\max}(1 + 0.02) > |\Delta t| > \tau_{\min}(1 - 0.02) \quad (2)$$

$$\tau_{\max}(1 + 0.02) > |\Delta t + T| > \tau_{\min}(1 - 0.02) \quad (3)$$

当同周期两个脉冲的时延差满足 (2) 或 (3)

时, 令

$$\begin{aligned} Q'_{ai} &= Q_{ai} + 2, & Q'_{bi} &= Q_{bi} - 1, \\ Q'_{bj} &= Q_{bj} + 2, & Q'_{aj} &= Q_{aj} - 1. \end{aligned}$$

其中,  $Q_{ai}$  和  $Q_{bi}$  表示当前的测距、测深品质因数, 满足判据后, 用  $Q'_{ai}$  和  $Q'_{bi}$  表示经过更新的品质因数值。具体含义: 第  $i$  个脉冲的测距品质因数增加 2, 测深品质因数减小 1; 第  $j$  个脉冲的测深品质因数增加 2, 测距品质因数减小 1, 以下各个表示式的含义与此类同。

判据 2: 通过对脉冲结构的分析, 可强制保留每个脉冲群中的第一个脉冲, 若某脉冲与前一脉冲的时延差大于 200ms 即可认为属于另一脉冲群。

对于同一周期, 当  $\min_j(t_{kj} - t_{ki}) > 200\text{ms}$  时, 令  $Q'_{ai} = Q_{ai} + 7, Q'_{bi} = Q_{bi} - 2$ 。

对于相邻周期, 当

$$\begin{cases} t_{ki} = \min t_{kj} \\ t_{ki} + T - \max t_{k-1,j} > 200\text{ms} \end{cases}$$

时, 令  $Q'_{ai} = Q_{ai} + 7, Q'_{bi} = Q_{bi} - 2$ 。

判据 3: 由于目标是运动的, 如果是直达脉冲, 则在相邻周期一定的时延差内必定存在与之对应的脉冲, 这条判据可印证直达脉冲的有效性。为此, 我们将本周期的每个脉冲与上个周期的选出的测距和测深脉冲相比, 则

当  $|t_{ki} - t_{k-1}| < 0.02 \cdot T$  时, 令  $Q'_{ai} = Q_{ai} + 1, Q'_{bi} = Q_{bi} + 1$ 。

判据 4: 以最高航速估算, 接收到的脉冲信号多卜勒  $\Delta f$  应在一定范围内。

当  $|\Delta f| > 0.03 \cdot f_0$  时, 令  $Q'_{ai} = Q_{ai} - 4, Q'_{bi} = Q_{bi} - 4$ 。

判据 5: 由于信道的影响, 声波的能量将逐渐衰减, 一般情况下, 直达声先于反射声到达, 因而能量较大。

$$\text{当 } E_{ki} = E_{\max} \text{ 时, 令 } \begin{cases} Q'_{ai} = Q_{ai} + 2 \\ Q'_{bi} = Q_{bi} + 2 \end{cases}。$$

判据 6: 一般情况, 直达信号的瞬时频率方差较小。

$$\text{当 } V_{ki} = V_{\min} \text{ 时, 令 } \begin{cases} Q'_{ai} = Q_{ai} + 1 \\ Q'_{bi} = Q_{bi} + 1 \end{cases}。$$

比较测距品质因数, 测距品质因数最大的脉冲为首选测距脉冲, 如果最大与次大的测距品质因数相差大于 2, 则只选最大的测距脉冲, 否则选最大与次大的两个测距脉冲送入解算; 比较测深品质因数, 选测深品质因数最大的脉冲为有效测深脉冲。海试和湖试结果表明, 测距直达脉冲的正确选择概率为 100%, 测深直达脉冲的正确选择概率为 98%。

## 2.4 阵元的选择

本系统共布放 10 个声呐浮标, 由于单个浮标作用距离的限制, 通常在阵内有 4 个浮标收到信号, 在个别位置收到信号的浮标数可达 5 至 8 个; 而在阵外, 通常只有两个浮标能收到信号, 靠近阵内时收到信号的浮标数可达 3 至 4 个。当目标初始位置已知时, 同步方式只需 2 个浮标的信息即可定位, 非同步方式则需 3 个浮标信息。当初值未知时, 两种方式各需增加一个浮标信息用于抗距离模糊。

选元的基本准则是选各阵元品质因数最高者, 还应兼顾以下几点:

(1) 由于存在距离模糊问题, 为避免个别阵元当前周期品质因数  $Q_a$  (同前面的脉冲品质因数) 较高, 而与基准阵元同组的测距脉冲丢失的特殊情况, 当有多余阵元信息可供利用时, 选元的同时选出备用阵元;

(2) 尽量选择连续几个最新周期品质因数足够高的阵元;

(3) 在变换基准基元时, 以新基准阵元上次解算所用脉冲的下一测距脉冲所在同步周期作为基准;

(4) 为了尽量减小定位误差, 选元时注意避免选出的三个基元在同一直线上。

## 3 湖试数据分析

2001 年 8 月份, 整个系统在松花湖进行了湖试, 在试验过程中, 信号是由模拟信号发生器发出的固定间隔 (间隔为  $(T_{\max} + T_{\min})/2$ ,

即固定深度 15m) 的双窄 CW 脉冲信号, 下面给出部分湖试结果。图 2 是某条次单目标的湖上实测的同步轨迹图, 同步周期 0.8s。在图 2 中, 具体给出了四个浮标的浮标号、相对位置及每个浮标在设定北东坐标系中的直角坐标 (单位为 m), 整个显示画面以左下方的 9 号浮标为坐标原点, 图的上方指向正北。

受试验水域的限制, 浮标离岸较近, 浮标之间的最大距离约为 3.1km, 这样在接收到的信号中, 除直达声、湖面和湖底反射声外, 还有较强的岸壁反射声脉冲。

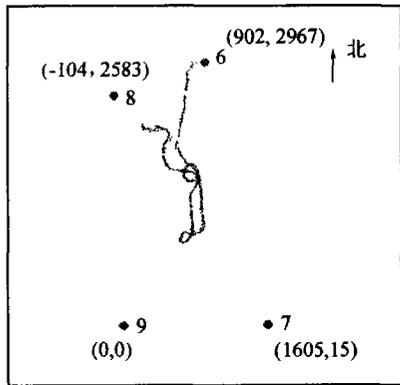


图 2 单目标的运动轨迹实测图

观察图 2 可以看出, 轨迹完整且清晰, 与目标实际运动航路一致, 由此可以验证专家系统对于直达测距脉冲的挑选是切实有效的。

图 3 给出的是与图 2 同条次的深度解算结果。系统初始化设定最大深度 30m, 由 (1) 式计算可以得到目标深度为 15m。观察深度解算结果可以得出, 专家系统对直达测距、测深

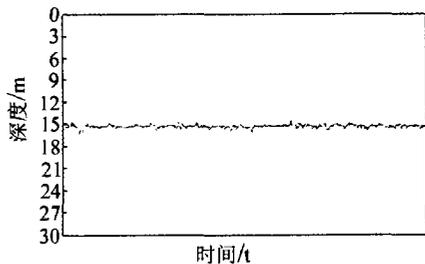


图 3 单目标的深度解算实测结果

脉冲的选取是可靠的, 由目标布放深度与测量一致间距可以充分地证明这一点。

#### 4 海试数据分析

2002 年 3 月, 该系统在南海进行了海试验收, 海试过程中, 令三艘载有同步声信号源的试验船在浮标阵中航行, 按设定深度给出脉冲间距值, 下面给出部分试验的海上实测结果。

图 4 是某条次多目标的同步轨迹图, 同步周期 0.8s, 声速分布为弱负梯度。图 5 是某条次单目标的深度解算结果, 设定深度 45m。

由湖试和海试出的结果可以看出: 专家系统中的有效脉冲选择、有效阵元选择都是切实有效的。由于专家系统可从一串脉冲序列中准确地选出直达测距、测深脉冲, 因而

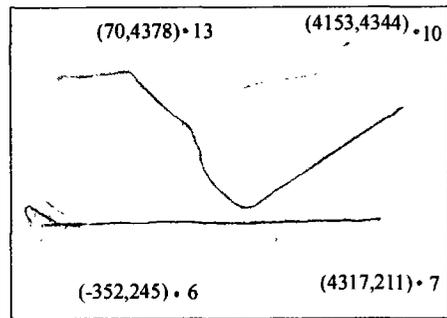


图 4 多标的运动轨迹图

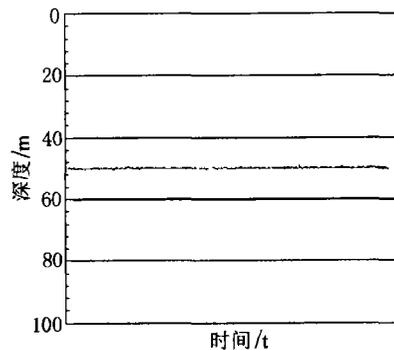


图 5 单目标的深度解算结果

(下转第 5 页)

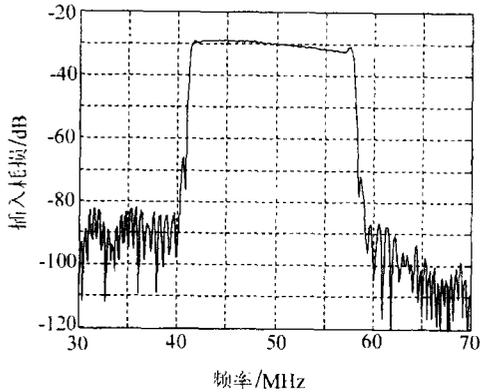


图5 扇形叉指换能器滤波器的频率响应

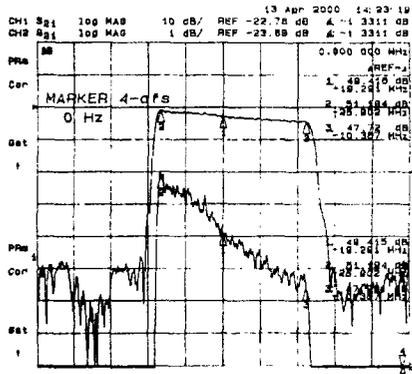


图6 扇形叉指换能器滤波器的实验频率响应

与图 5 相同, 实验结果如图 6 所示; 相对带宽超过 30%, 插入损耗 25.9dB, 带内波纹 0.5dB, 带外抑制 48dB。理论模拟与实验结果比较吻合。

## 7 结论

本文把混合场等效电路模拟方法应用到抽指换能器, 并推出了采用抽指加权扇形叉指换能器滤波器的频率响应。对于指间反射采用复阻抗模型进行了修正。对扇形叉指换能器滤波器的模拟, 等效电路模型与通常采用的脉冲响应模型相比, 有很多固有的优点, 比如能考虑三次行程渡越、指间反射、声电再生等, 尤其对于扇形结构, 能考虑因孔径很大而不能忽略的指条寄生阻抗。

## 参 考 文 献

- 1 Campell C K, Yanglin Ye. *IEEE Trans. Sonics. Ultrason*, July 1982, **29**(6):224~228.
- 2 Hiromi Yatsuda. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Contr.*, **44**(2):453~459.
- 3 Takeshi Aoke Kjell. *IEEE Trans. Sonics. Ultrason*, 1977, **29**(3):224~228.
- 4 武以立, 邓盛刚等. 北京: 国防工业出版社, 1983. 112~114.
- 5 Yongan Shui, Yining Lu. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1995, 269~272

(上接第 33 页)

保证了水平定位及深度解算的精度, 结果是令人满意的。

## 5 结论

专家系统软件是水下目标跟踪系统软件部分的核心, 经仿真数据、湖试数据和海试数据的验证, 专家系统可以有效地从带有干扰的接收数据中挑选出直达脉冲, 因而确保了系统的

定位精度与测深精度。

## 参 考 文 献

- 1 梁国龙, 惠俊英. *声学学报*, 1999, **24**(2):183~190.
- 2 赵羽. 界面反射对水下目标定位的影响分析. 哈尔滨工程大学硕士论文. 2001 年 6 月.
- 3 赵羽, 梁国龙. 界面反射对信号参数估计的影响分析. 2001 年全国水声学学术会议论文集. 2001, 20:79~81.
- 4 惠俊英. 水下声信道. 国防工业出版社. 1992.
- 5 陈晓忠, 梁国龙, 王逸林等. *声学学报*. 2003, **28**(4): 357~362.