

宽带信号检测中自适应门限设定方法

张学森^{1,2}, 郭霖¹, 孔繁慧^{1,2}, 冯海泓¹

(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 在水声定位中, 常常需要估计声波从发射端到接收端的传输时间。但由于传输距离的影响, 接收到的声波信号强度变化范围很大, 给检测带来不便。基于线性调频脉冲信号相关检测, 提出了一种自适应门限设定方法, 可以在一定的条件下替代自动增益控制电路。这一方法根据发射信号、传输信道、发射系统和接收系统的参数, 依据声信号到达接收端的时刻, 自动调整相关峰检测时的门限值, 简便易行。仿真和湖上试验结果表明, 这一方法可以有效地保证计算信号到达时刻的准确性。

关键词: 水声定位; 线性调频脉冲信号; 自适应门限; 自动增益控制

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-02-0183-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.02.015

Adaptive threshold setting for wideband signal detection

ZHANG Xue-sen^{1,2}, GUO Lin¹, KONG Fan-hui^{1,2}, FENG Hai-hong¹

(1. Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The transmission time of acoustic wave between transmitter and receiver needs to be estimated in underwater acoustic positioning. Because of the influence of transmission distance, the amplitude of receiving signal varies greatly, which is unfavorable for signal detection. Base on the correlation detection of liner frequency modulated pulse signal, a method of adaptive threshold setting is proposed, which can replace the automatic gain control circuit in some conditions. This method can set threshold of correlation detection automatically and easily, according to the parameters of signal, channel, transmission system, receiving system, and the arrival time of signal. Simulation and experiment indicate that this is an effective method of calculating arrival time of acoustic signal.

Key words: underwater acoustic positioning; liner frequency modulated pulse signal; adaptive threshold; automatic gain control

0 引言

在合作目标上安装声信标, 利用声波到达测量基阵的声程差或相位差进行定位, 是水声定位的常用方法。准确计算出声波到达的时刻, 是提高定位精度的必要条件。但由于受到声波传输距离远近变化的影响, 接收机接收到的信号强度变化范围很大, 可能达到几十分贝。目前, 解决这一问题主要采用自动增益控制(AGC)电路^[1], 根据接收信号的强度调整接收机增益, 压缩接收信号的动态范围, 抑制大信号和增强小信号, 使接收信号大小维持在一个合适的范围之内^[2]。

一些定位系统对作用距离的要求不高, 仅为几十到几百米。在这种情况下, 可以使用自适应调整

检测门限的方法, 来代替自动增益控制。这种方法依靠软件实现, 有利于减少系统的功耗, 降低开发成本。

本文以水声定位中常用的线性调频(LFM)脉冲信号为例, 讨论自适应门限的设定方法。

1 线性调频脉冲信号的特性

设线性调频脉冲信号^[3]的频率下限和上限分别为 f_L 和 f_H , 脉宽为 T , 那么该信号可以表示为:

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_L t + \pi k t^2) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, A 表示信号的幅度; $k = (f_H - f_L)/T$ 是信号频率的变化率, 称为调频斜率。当 $(f_H - f_L) \cdot T \gg 1$ 时, 线性调频脉冲信号的带宽 $B \approx f_H - f_L$, 即调频的宽度近似等于信号的带宽。

线性调频脉冲信号的自相关函数绝对值的包络为^[4]:

收稿日期: 2010-04-18; 修回日期: 2010-07-28

作者简介: 张学森(1983-), 男, 河北人, 博士研究生, 研究方向为阵列信号处理。

通讯作者: 张学森, E-mail: zhangxuesen@mail.ioa.ac.cn

$$R_s(\tau) = \begin{cases} \frac{A^2}{2} \left| \frac{\sin[\pi k \tau (T-|\tau|)]}{\pi k \tau} \right| & |\tau| \leq T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)表明, 相关峰包络主瓣宽度约为 $2/B$, 当信号带宽较大时, 主瓣很窄, 并且主瓣的峰值比第一副瓣峰值高 13.5 dB, 易于检测。因此, 线性调频脉冲信号在水声定位领域有着广泛的应用。

在实际应用中, 当接收到的线性调频信号过大时, 会出现信号的限幅。极端的情况是限幅成方波信号, 可表示为:

$$c(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \text{ 或 } t > T \\ C & 0 \leq t \leq 0+T \text{ 且 } s(t) \geq 0 \\ -C & 0 \leq t \leq 0+T \text{ 且 } s(t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, C 表示接收信号的最大幅度, $s(t)$ 定义见式(1)。

$c(t)$ 与 $s(t)$ 的互相关函数包络为:

$$R_{cs}(\tau) = \begin{cases} \frac{2CA}{\pi} \left| \frac{\sin[\pi k \tau (T-|\tau|)]}{\pi k \tau} \right| & |\tau| \leq T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

对比式(4)与式(2), 相关峰包络的形状并没有发生变化, 只是幅度有所改变。当 $C=A$ 时

$$\frac{R_{cs}(0)}{R_s(0)} = \frac{4}{\pi} \quad (5)$$

式(5)表明, 若参与相关运算的参考信号相同, 那么深度限幅情况下的相关峰包络主瓣的峰值, 比刚好不限幅条件下的峰值高出 2.1 dB; 各副瓣高度也有相同的提升。

$R_{cs}(\tau)$ 的第一副瓣比 $R_s(\tau)$ 的主瓣低了 11.4 dB。

2 时延估计方法

利用参考相关法可非常方便并且准确地检测出线性调频信号, 信号的传输和接收过程如图 1 所示。

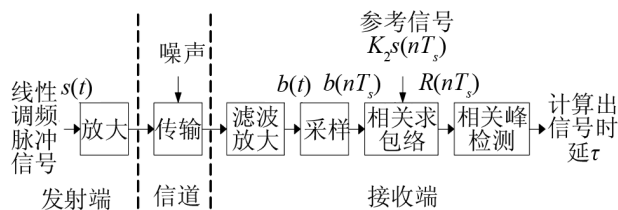


图 1 信号发射及接收示意图

Fig.1 Structure of signal transmitting and receiving

由图 1 可见, 接收到的信号经过滤波放大得 $b(t) = K_1 s(t - \tau) + n(t)$, 其中 K_1 表示原始线性调频脉冲信号经发射端放大、传输衰减和接收放大后幅度的变化(这里假定接收的到信号不出现限幅情况, 关

于限幅情况的讨论, 将在后文中进行), τ 表示传播的时延, $n(t)$ 是高斯加性噪声。

以采样率 F_s 对信号 $b(t)$ 进行采样, 得到 $b(nT_s)$, 其中 $T_s = 1/F_s$ 。与 $b(nT_s)$ 进行相关运算的信号为 $K_2 s(nT_s)$ 。相关运算的结果绝对值的包络为:

$$R_{bs}(m) \approx \begin{cases} \frac{K_1 K_2}{T_s} \left| \frac{\sin[\pi k (mT_s - \tau)(T - |mT_s - \tau|)]}{2\pi k (mT_s - \tau)} \right| + R_{sn}(m) & |m| \leq \frac{T}{T_s} \\ R_{sn}(m) & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, $R_{sn}(m)$ 表示参考信号与噪声信号相关的结果。当噪声信号为理想加性高斯信号时, $R_{sn}(m) = 0$; 当噪声信号不是理想加性高斯信号时, 由于 $n(t)$ 与 $s(t)$ 的互相关性很弱, 故 $R_{sn}(m)$ 的值也很小。

式(6)中, $R_{bs}(m)$ 在 $\tau = mT_s$ 时刻取得最大值, 因此, 可以通过检测相关峰峰值的方法, 求取信号到达的时延 τ 。

3 自适应门限设定方法

检测接收信号与参考信号的相关峰包络主瓣, 需要设定两个门限值——幅度门限和宽度门限。幅度门限的目的在于避免检测过程中误将副瓣识别为主瓣; 宽度门限的目的在于避免检测过程中误将较高的尖刺识别为主瓣。

3.1 幅度门限的选取

根据式(6), 可求得相关峰包络主瓣峰值为:

$$P_f = R_{bs}(\tau) = \frac{K_1 K_2 T}{2T_s} \quad (7)$$

式(7)中, K_2 、 T 和 T_s 是已知参数。 K_1 由发射信号强度 SL 、传播损失 TL 、接收灵敏度 Si 以及接收端的放大倍数 Am 决定, 满足

$$20 \log K_1 = SL - TL + Si + Am \quad (8)$$

式(8)中, SL 、 Si 和 Am 在定位系统的发射端和接收端进行设计时确定, 所以 K_1 随传播损失 TL 的变化而变化。若传播满足球面扩展, 则

$$TL = 20 \log r + \alpha r \quad (9)$$

式(9)中, r 是接收端与发射端之间的距离, α 是吸收系数, 由频率、温度等因素决定^[4,5]。

如果计算出当前发射端和接收端的距离, 当两者相对距离不会变化很大的时候, 即可根据上述公式大致估计出下一时刻相关峰包络主瓣峰值。

理论上讲, 幅度门限可以选择高于第一副瓣峰值并低于主瓣峰值的任意数值。这里选定幅度门限为主瓣峰值的一半, 即

$$P_{th} = \frac{1}{2} P_f \quad (10)$$

这时, 幅度门限低于主瓣峰值 6 dB, 高于第一副瓣峰值 7.5 dB。

3.2 宽度门限的选取

考虑幅度门限选定为主瓣峰值一半的情况, 令:

$$R_{bs}(m) = \frac{1}{2} P_f = \frac{K_1 K_2 T}{4T_s} \quad (11)$$

解得:

$$|mT_s - \tau| \approx \frac{1.896}{\pi k T} \approx \frac{0.60}{B} \quad (12)$$

其中 B 是线性调频脉冲信号的带宽, 那么幅度门限处相关峰包络主瓣的宽度为:

$$W_f = 2 \cdot |mT_s - \tau| = \frac{1.2}{B} \quad (13)$$

考虑到实际应用中, 信号可能因为换能器指向性的影响衰减, 宽度门限选择为幅度门限处主瓣宽度的一半, 即:

$$W_{th} = \frac{1}{2} W_f \quad (14)$$

3.3 限幅信号对幅度门限的影响

信号的限幅不会影响相关峰包络的形状, 只会使得主瓣和各副瓣的幅度等比例的提高。式(5)表明, 即便是深度的限幅, 主瓣和各副瓣的高度提升也不会超过 2.1 dB。

因此, 在限幅的条件下相关峰包络第一副瓣的高度, 仍然远远低于恰不限幅条件下相关峰包络主瓣的高度。所以在限幅情况下, 仍然可以使用恰不限幅条件下的幅度门限。

3.4 多径传输的影响

多径传输是影响相关峰包络检测的重要因素。线性调频信号的相关峰包络主瓣宽度为 $2/B$, 峰值到第一个零点的时间间隔为 $1/B$ 。当第一个多径信号到达时刻与直达信号到达时刻相比, 延迟大于 $2/B$, 那么对直达信号相关峰的检测不会造成影响。但当多径信号与直达信号到达时刻过于接近, 那么直接检测相关信号峰值的方法失效, 这时可以采取差分相关的方法解决。

3.5 门限的动态设定

首先计算接收信号限幅的临界距离。设放大后信号的最大幅度为 K_0 , 并设信号幅度恰好为 K_0 时, 发射端与接收端的距离为 R_0 , 有:

$$20 \log K_0 = SL - (20 \log R_0 + \alpha R_0) + Si + Am \quad (15)$$

式(15)中, K_0 、 SL 、 Si 及 Am 是已知参数, 由系统本身决定, α 由频率、温度等因素决定, 可通过查表的方式获得。根据式(15), 可解得限幅临界 R_0 。

然后计算临界距离处幅度门限值, 设参考信号的幅度为 K_2 , 则此时幅度门限为:

$$P_{cri} = P_{th}|_{R_0} = \frac{K_0 K_2 T}{4T_s} \quad (16)$$

式(16)中, T 是线性调频脉冲信号长度, T_s 是采样周期。

接下来计算最大作用距离下的幅度门限。系统的最大作用距离为 R_{max} , 设在此作用距离下, 接收信号的幅度 K_{min} 满足:

$$20 \log K_{min} = SL - (20 \log R_{max} + \alpha R_{max}) + Si + Am \quad (17)$$

根据式(17)可以解得 K_{min} , 由此可以解得此时幅度门限为:

$$P_{min} = P_{th}|_{R_{max}} = \frac{K_{min} K_2 T}{4T_s} \quad (18)$$

最后计算宽度门限

$$W_{th} = \frac{1}{2} W_f \approx \frac{0.6}{f_H - f_L} \quad (19)$$

在测量过程中, 宽度门限 W_{th} 始终不变。

幅度门限初始值设为 P_{min} 。幅度门限根据上一次测量中计算出的峰值位置而变化, 其计算方法为: 根据上次测量出的峰值位置计算出接收端与发射端的距离 r , 然后利用式(8)和式(9)计算对应的接收信号幅度 K_1 , 最后再利用式(7)计算出相关峰包络主瓣的高度, 进而计算幅度门限。

幅度门限的最大值为 P_{cri} , 当接收端与发射端的距离小于 R_0 时, 采用 P_{cri} 做为幅度门限; 幅度门限的最小值为 P_{min} , 当接收端与发射端的距离大于 R_{max} 时, 采用 P_{min} 做为幅度门限。

4 仿真实验

下面用 Matlab 仿真来验证上述方法的有效性。仿真中, 信号的采样率为 $F_s = 250 \text{ kHz}$ 。线性调频信号的频率下限和上限分别为 $f_L = 45 \text{ kHz}$ 和 $f_H = 55 \text{ kHz}$, 扫频时间 $T = 10 \text{ ms}$ 。

接收电路的电压范围为 $-5 \text{ V} \sim 5 \text{ V}$, 即信号最大幅值为 $K_0 = 5 \text{ V}$, 参考信号的幅值为 $K_2 = 0.2 \text{ V}$ 。

发射声源级为 $SL = 180 \text{ dB}$, 吸收系数为 $\alpha = 8 \times 10^{-4} \text{ dB/m}^{[4]}$, 接收灵敏度为 $Si = -190 \text{ dB}$, 放大倍数为 $Am = 80 \text{ dB}$ 。系统的设计最大作用距离为 $R_{max} = 2000 \text{ m}$ 。

噪声谱级为 35dB/Hz (三级海况, 50 kHz 附近), 考虑到带宽为 10kHz, 折算得到电噪声为 -35dB (ref: 1V)。

仿真中声源的轨迹如图 2 所示。接收换能器的位置为坐标原点 (0,0); 发射换能器沿图 2 中箭头所示方向呈“8”字型运动, 起点位于 (10,0) 位置, 最远点坐标为 (2010,0)。设声源在圆周上匀速运动, 定位周期为 1s, 每个定位周期移动 1°(约合 8.7m), 沿轨迹从起点运动到最远点, 最后再返回起点。

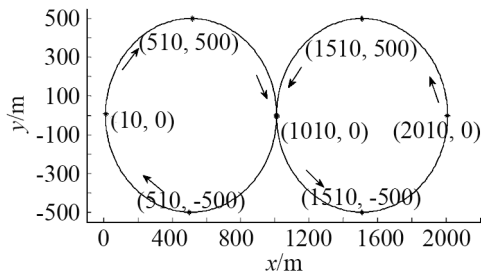


图 2 仿真轨迹图
Fig.2 Orbit of simulation

根据以上设定的参数, 计算可得, $R_0=597\text{m}$, $P_{crit}=625$, $P_{min}=165$, $W_{th}=0.06\text{ms}$, 折合为 15 个采样点。

图 3 是仿真过程中相关峰包络主瓣、第一旁瓣和幅度门限的变化图, 横轴为定位时刻。由图 3 可见, 在仿真开始阶段, 由于预设幅度门限过小, 相关峰的旁瓣被当作主瓣检出。但根据计算出的相关峰的时延信息, 幅度门限及时做出了调整。后续仿真过程中, 幅度门限的设定随相关峰主瓣位置的变化而变化, 保证相关峰能够被正确地检出。

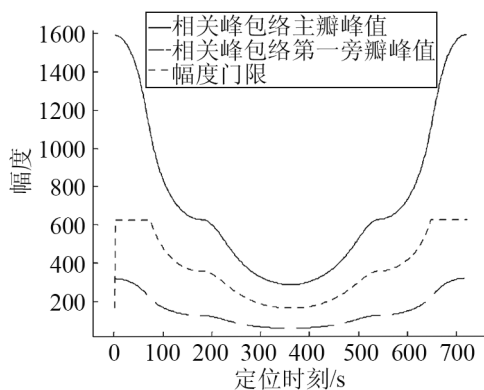


图 3 仿真中主瓣高度与幅度门限对比图
Fig.3 Comparison of main lobe amplitude with amplitude threshold in simulation

5 试验验证

2009 年 9 月, 在某水库进行了拉距实验。

实验中的发射声源级为 185 dB, 水听器接收灵敏度为 -205 dB, 放大倍数为 5000 倍, 接收电路电压范围为 -2.5~2.5 V, 参考信号幅度为 2.5 V, 采样频率为 900 kHz。信号采用 75~85 kHz 的线性调频信号, 扫频时间长 5.4 ms。

图 4 是拉距试验中接收端与发射端之间的距离变化图, 横轴表示定位时刻, 纵轴表示发射端与接收端之间的距离。图 5 是实验测出的相关峰包络主瓣峰值, 以及通过时延计算出的幅度门限对比图; 横轴表示定位时刻, 与图 4 的横轴相对应。由图 5 可见, 相关峰主瓣的峰值并非平稳变化, 而是有一定的震荡, 这是因为声信号在传输过程中受到水声信道的影响。另外, 发射和接收换能器指向性也会对信号的强度造成影响。但从总趋势来看, 峰值随距离远近而相应变化。幅度门限可以保证检测出正确的相关峰。

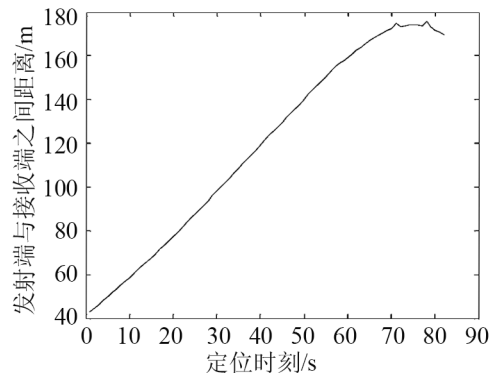


图 4 发射端与接收端之间距离
Fig.4 Distance between transmitting terminal and receiving terminal

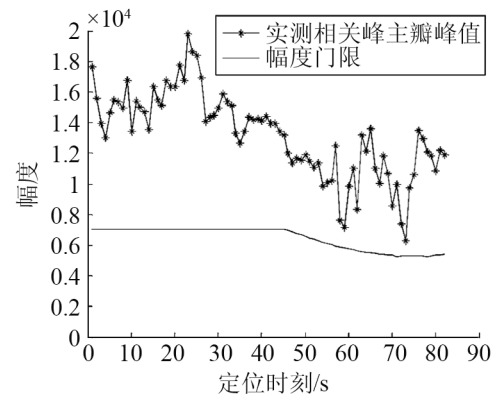


图 5 试验中主瓣高度与幅度门限对比图
Fig.5 Comparison of main lobe amplitude and amplitude of threshold in experiment

6 结论

本文所述的自动门限设定的方法, 有着一定的实用意义。理论分析、数值仿真和实验均表明, 这

一方法是可行的,可以在一定的场合代替自动增益控制电路,适用于中近距离情况下信号的检测。但这一方法有着局限性,易受到外界环境、换能器指向性的影响。

参 考 文 献

- [1] 陈邦媛. 射频通信电路[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
CHEN Bangyuan. RF communication circuits[M]. Beijing: Science press, 2006.
- [2] 郑吉华. 水中超声波接收机自动增益和信号处理技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
ZHEN Jihua. Automatic gain control and signals processing technique of underwater ultrasonic receiver[D]. Nanjing: Institutes of Technology of Nanjing, 2007.
- [3] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声呐技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006.
TIAN Tan, LIU Guozhi, SUN Dajun. Techniques of sonar[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2006.
- [4] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
HUI Junyin, SHENG Xueli. Underwater acoustic channel [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [5] 朱昌平, 韩庆邦. 水声通信基本原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
ZHU Changping, HAN Qingbang. Principles and applications of underwater acoustic communication[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2009.

• 简 讯 •

中国声学学会水声学分会 2011 年学术会议征文通知

经中国声学学会水声分会工作委员会研究决定, 拟定于 2011 年 8 月(暂定)在陕西省西安市召开全国水声学学术会议, 交流近年来我国水声科技工作者在水声学研究领域内的新成果、新工艺和新技术, 欢迎大家积极投稿, 踊跃参加会议。现将有关征文事项通知如下:

征文范围:

1. 海洋中声传播、混响、环境噪声及舰船噪声;
2. 声纳目标反射与散射;
3. 声纳系统的设计和预报;
4. 水声信号处理技术;
5. 水声匹配场技术;
6. 水下目标分类识别技术;
7. 水声对抗;
8. 换能器及水下声系统;
9. 目标环境模拟器与声纳仿真技术;
10. 水声工程在海洋开发及航海中的应用;
11. 海洋物理及观测技术。

征文要求:

1. 论文内容不涉及保密问题, 可以公开发表。
2. 投稿方式: 采用 e-mail 方式投稿, 投稿专用邮箱为: shuishenghui@yahoo.com.cn
3. 提交的论文篇幅不超过3页(包括标题、公式、图表、参考文献等), 经专家审阅后决定是否录用, 未录用的稿件恕不退还。
4. 录用的论文将向作者发出录用通知, 请在通知规定的日期内将版面费寄到秘书处(费用另行通知), 逾期不交者, 将不编入会议论文集。
5. 征文截止日期: 2011 年 6 月 15 日, 录用通知发出日期: 2011 年 7 月 15 日。
6. 论文集将由《声学技术》杂志正式出版。

联系方式:

联系人: 胡长青: Tel: 021-64048159-204, 021-64035270(直)
E-mail: hchq@mail.ioa.ac.cn
丁玉薇: Tel: 021-64048159-222, 021-64174105(直)
E-mail: ssxh-ssxh@vip.163.com
杨益新: Tel: 029-88460373, 13991835275
E-mail: yxyang@nwpu.edu.cn
陶玉萍: Tel: 0571-56782047; 13868142898
E-mail: taoyip@163.com

备注: 会议具体日期和会址另行通知。