

时延估计与双线阵左右舷分辨

何心怡¹ 蒋兴舟² 李启虎³

(1 海军装备研究院 北京 100773)

(2 海军工程大学 武汉 430033)

(3 中国科学院声学研究所 北京 100080)

2003 年 3 月 3 日收到

摘要 针对双线列阵的左右舷分辨问题,特别是双线阵间距较大时的左右舷分辨问题,文中提出了一种以时延估计为理论基础的左右舷分辨方法,将双线阵的左右舷分辨问题转变成对轴向对称的两路波束信号进行时延估计,然后根据时延值的符号判断出目标所处的左右舷。该方法具有算法简单、对阵形畸变不敏感的优点。经过湖试实验数据分析验证,证明是一种简单、有效、可行的左右舷分辨技术。

关键词 双线列阵,左右舷分辨,时延估计

Time delay estimation and the twin-line arrays port/starboard discrimination

HE Xin-Yi¹ JIANG Xing-Zhou² LI Qi-Hu³

(1 Naval Academy of Armament, Beijing 100073)

(2 Navy Engineering University, Wuhan 430033)

(3 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract To be aimed at the twin-line arrays port/starboard discrimination problem, especially when the twin-line gap is quite large, this paper presents a twin-line arrays port/starboard discrimination method based on the theory of time delay estimation. It transfers the problem of twin-line arrays port/starboard discrimination to that of time delay estimation of the two channel beam signals which are rotational symmetric, and then discriminates the port/starboard of the target by the sign of the time delay value. This method has a very simple algorithm and is not sensitive to the aberration of the twin-line arrays shape. Lake experiment proves that it is a simple, effective and practical port/starboard discrimination technology.

Key words Twin-line, Port/starboard discrimination, Time delay estimation

1 引言

左右舷模糊是拖曳线列阵声呐的主要不足

之一,即使是采用双线阵的基阵形式也是如此,因此必须要加以解决。在双线阵的实际使用中,为避免两根线阵搅在一起,而造成拖曳

线列阵声呐无法正常工作, 或者是为了更灵活地安装配置两根线列阵, 有时希望两根线列阵的间距要比较大, 这对左右舷分辨提出了更高的要求。因此, 寻找合适的拖曳式双线列阵声呐左右舷分辨技术尤为重要^[1~4]。

文中提出了一种解决双线阵左右舷模糊问题的方法, 特别适用于双线阵间距较大的情况, 该方法以时延估计为理论基础, 将双线阵的左右舷分辨问题转变成对轴向对称的两路波束信号进行时延估计, 根据时延值的符号判断出目标所处的左右舷: 双线阵的两根线列阵分别对应着左/右舷一侧 180° 的空间进行多波束形成; 当检测到目标后, 根据双线阵的间距和目标的大致方位, 判断两路轴向对称波束信号的时延值是否大于 1: 若大于 1, 则将目标所处的呈镜像轴对称左/右舷两路波束信号取出, 以测相关的方法进行时延估计; 若不大于 1, 则将目标所处的呈镜像轴对称左/右舷两路波束信号取出, 以求互功率谱的方法进行时延估计; 根据时延值的正负号, 判断出目标所处的左右舷。

2 时延估计左右舷分辨方法的原理

图 1 是以双线阵为基阵的拖曳线列阵声呐示意图, 左/右舷的线列阵分别用线列阵 L 和线列阵 R 表示, 每根线列阵均由 M 个无指向性水听器组成, 两根线列阵的间距为 d 。将线列阵 L 在左舷 180° 的空间范围内形成 F 个波束, 与左舷 F 个波束成镜像轴对称的位置上, 利用线列阵 R 在右舷 180° 的空间范围内也形成 F 个波束。

由于双线阵的所有水听器都没有指向性, 因此线列阵 L 或线列阵 R 都存在左右舷模糊。若在左舷第 K 号波束内有一个目标, 其入射方向与线列阵 L 的轴向夹角为 α , 那么在右舷第 K 号波束内也将检测到一个目标 (即镜像源, 为假目标)。每个波束对应着一个等效声学中心, 将左舷第 K 号波束和右舷第 K 号波

束分别用 L'_K 和 R'_K 两个等效声学中心表示, 上述等效的声学场景如图 2 所示。

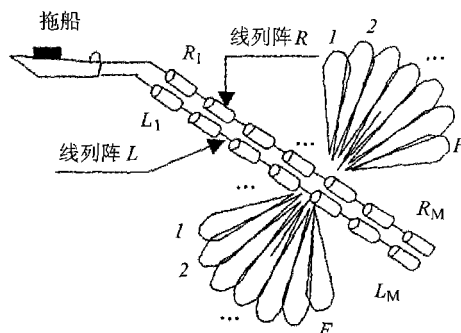


图 1 以双线阵为基阵的拖曳线列阵声呐示意图

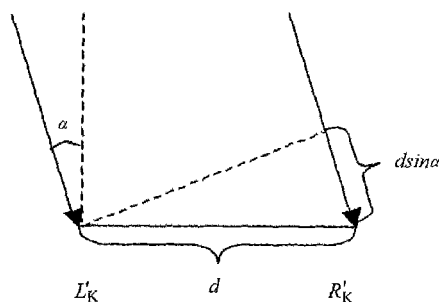


图 2 等效的声学场景

那么, L'_K 和 R'_K 的输出可以表示为:

$$x_L(n) = s(n) + n_1(n) \quad (1A)$$

$$x_R(n) = As(n - D) + n_2(n) \quad (1B)$$

式中,

$s(n)$ 是经波束形成后的目标信号, 与单个水听器接收到的目标信号相比, 附加了空间增益, 它可以是目标的辐射噪声, 也可以是目标回波;

$D = \text{Round}(d \cdot \sin \alpha \cdot f_s / c)$ 是 $x_L(n)$ 与 $x_R(n)$ 两路信号的整数时延值, 符号由目标所处的左右舷决定: 当目标位于左舷, 符号为正, 反之为负; $\text{Round}(\cdot)$ 是四舍五入操作; f_s 是信号的采样频率; c 是声速;

$n_1(n)$, $n_2(n)$ 是 L'_K 和 R'_K 信号中的加性噪声, 若 d 大于接收信号中心频率的半波长,

通常可认为它们是相互独立的;

A 是 R'_K 接收到的信号与 L'_K 接收到的信号的幅度比, 在一般情况, 由于 d 远小于目标到双线阵的距离, 由此带来的传播损失可忽略不计, 即 $A = 1$ 。

此时, 双线阵的左右舷分辨问题转变成了对两路轴向对称波束信号的时延估计问题, 更确切地说, 转变成了使用两路轴向对称波束信号, 对时延值符号进行估计的问题, 时延值的正负号代表了目标所处的左右舷。可采用测相关的方法, 计算 $x_L(n)$ 和 $x_R(n)$ 的互相关:

$$\begin{aligned} R_{LR}(v) &= E\{x_L(n)x_R(n+v)\} \\ &\approx R_{ss}(v-D), \quad -\infty < D < \infty \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $R_{ss}(v) = E\{s(n)s(n+v)\}$ 是信号 $s(n)$ 的自相关序列。由自相关序列的性质可知: $R_{LR}(v)$ 在 $v = D$ 处有峰值。但在实际中采样数据是有限长的, 所以 $R_{LR}(v)$ 在 D 处不一定取峰值。但对于双线阵的左右舷分辨而言, D 的精确性并不十分重要, 关键是 D 的符号, 符号的正负表明了目标所处的左右舷。

当目标不断靠近双线阵的端射方向时, 则时延值 D 不断越小, 减小到等于 0 (经四舍五入后等于 0), 这时使用测相关的方法就无法分辨目标所处的左右舷。此时, 可以把时延估计问题转换到频域, 可以将用于分裂波束精确定向的互功率谱法用于判断时延值的符号 [5~8]。设长为 N 的两路轴向对称波束信号的时间序列分别为:

$$x_L(0), x_L(1), \dots, x_L(N-1) \quad (3A)$$

$$x_R(0), x_R(1), \dots, x_R(N-1) \quad (3B)$$

对 (3A) 和 (3B) 做 N 点的离散傅里叶变换, 可得:

$$X_L(l) = \sum_{k=0}^{N-1} x_L(k)e^{-j2\pi kl/N} \quad (4A)$$

$$X_R(l) = \sum_{k=0}^{N-1} x_R(k)e^{-j2\pi kl/N} \quad (4B)$$

如果 N 比较大时, 有:

$$X_L(l) \approx \exp(j2\pi l\tau/(NT_s))X_R(l) \quad (5)$$

其中, $\tau = d \sin \alpha / c$ 为时延。作 $X_L(l)$ 和 $X_R(l)$ 的互功率谱, 得:

$$\begin{aligned} X_{LR}(l) &= X_L(l)X_R^*(l) \\ &= |X_R(l)|^2 \exp(j2\pi l\tau/(NT_s)) \end{aligned} \quad (6)$$

把互功率谱第 l 条谱线对应的相位记作 φ_l , 有:

$$\varphi_l = \frac{2\pi l\tau}{NT_s} = \arctg \left\{ \frac{\text{Im}[X_{LR}(l)]}{\text{Re}[X_{LR}(l)]} \right\} \quad (7)$$

从 (7) 式可见, 时延值 τ 的符号与互功率谱相位 φ_l 的符号相同, 因此通过计算 $x_L(n)$ 和 $x_R(n)$ 的互功率谱, 也可以得到时延值的符号, 从而判断出目标所处的左右舷。

当然, 如果是主动声纳情况, 双线阵的间距 d 大于单频信号的半波长时, 那么发射信号就不能采用单频信号, 因为单频信号的周期性会给时延估计带来错误。

此外, 如果空间中存在着相干噪声源 (点源) 干扰, 则必然会影响到对时延值的估计。但文中所提出的方法是使用两路轴向对称波束信号, 对时延值符号进行估计。由于波束形成器实质上是一个空间滤波器, 只允许空间一定范围内的噪声通过。因此, 如果相干噪声源与目标信号不在同一个波束内, 可近似认为相干噪声源不影响对目标所处左右舷的分辨; 如果相干噪声源恰好与目标信号在同一个波束内, 估计出的是目标和相干噪声源两者的等效声学中心对应的时延值, 有可能会造成对目标所处左右舷的错判。考虑到线列阵声纳形成的波束主瓣宽度一般都较窄, 目标和相干噪声源处于同一个波束内的概率较小, 因此, 文中所提出的基于时延估计的双线阵左右舷分辨方法还是具有广泛的适用性。

综上所述,基于时延估计的双线阵左右舷分辨方法是依靠呈轴向对称的两路波束信号的时延值符号来判断目标所处的左右舷,因为它关心的是时延值的符号,而不是具体的时延值,而时延值是由双线阵的阵形决定,所以这种方法有一个突出的优点:对阵形畸变不敏感。

为简化分析,湖试实验数据分析中,仅采用测相关的方法实现对目标的左右舷分辨。

3 湖试实验

2002年7月和2002年12月,在浙江千岛湖鹿岛附近湖面分别进行了两次双线阵左右舷分辨实验。将这两次湖试实验数据对本文所提的左右舷分辨方法进行验证。

湖试实验数据分析一: 2002年7月的湖试实验方案如图3所示: 将间距为0.5m的双线阵平行吊放于实验船1的水下8m处,而距该实验船左舷0.29海里处的实验船2水下5m处吊放一个发射换能器,发射以1000Hz为中心、带宽为200Hz、脉宽为200ms、周期为4s的线性调频波。双线阵附近的信噪比大约为20dB,采样频率为12000Hz。

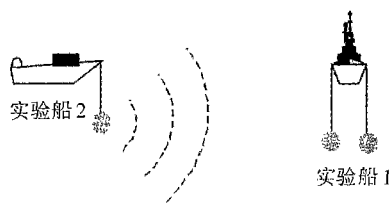


图3 2002年7月湖试实验方案

图4是双线阵的两根线阵分别进行波束形成的水平波束指向性图,其中虚线是左舷线列阵的水平指向性图,对应于左舷180°的水平波束输出;实线是右舷线列阵的水平指向性图,对应于右舷180°的水平波束输出。从图4中可以看出,信号的入射方向在双线阵的正横方向附近。

入射信号的方向在双线阵的正横方向,双

线阵间距0.5m对应的理论时延值是4,符号为正。由于信噪比较强,为简化分析,直接以两路呈轴对称的水听器接收信号做时延估计,这样,与波束形成后的信号做时延估计相比,信噪比低一些,但不影响对时延估计方法的验证。数据共有16组,图5中的实线为理论时延值,虚线为对16组数据分别运用测相关方法处理后得到的实际时延值,符号均为正,可判断出声源来自双线阵的左舷。图6是第1组数据的左右两路水听器信号的互相关函数,根据互相关函数可得到该组数据的实测时延值为3。时延估计值存在误差的主要原因在于:混响干扰、多途效应、线列阵存在着阵形畸变、线列阵中各水听器的幅相特性不尽相同以及入射信号方

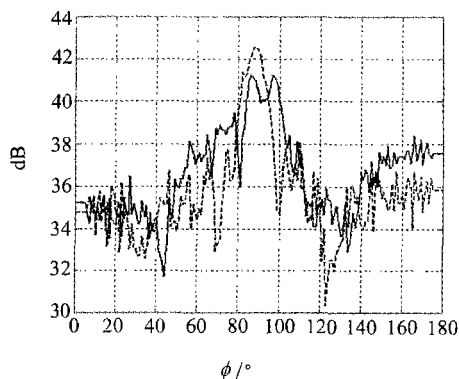


图4 双线阵的两根线阵分别进行波束形成得到的水平波束指向性图

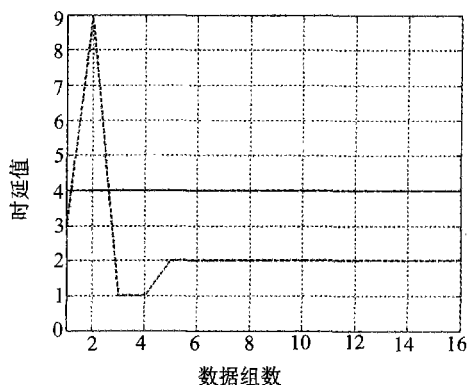


图5 湖试数据的时延估计结果

向不正好在双线阵的正横方向。但这些误差对时延估计左右舷分辨方法的影响较小,因为该方法所关心的仅是时延值的符号,是定性的方法,而不是定量的方法。

图 6 是第一组湖试数据的左右两路水听器信号的互相关函数。

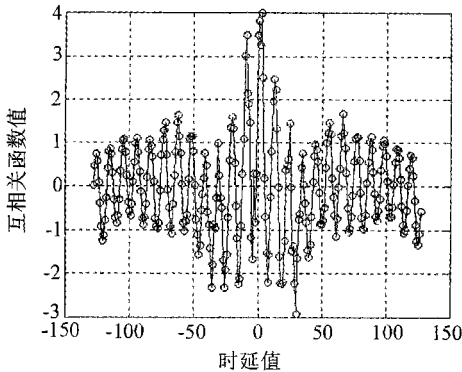


图 6 湖试第一组数据的左右两路水听器信号的互相关函数

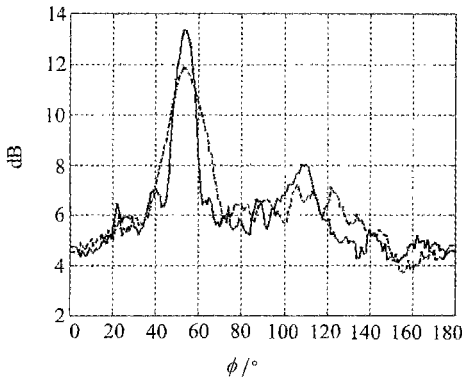


图 7 双线阵的两根线阵分别进行波束形成得到的水平波束指向性图

湖试数据分析二: 2002 年 12 月湖试实验的实验方案与 2002 年 7 月的湖试实验类似,只是双线阵间距改为 0.6m;并且实验中不发射信号,而是采用被动接收噪声的方法。实验中有一合作目标:目标船(实际上是一艘小拖船),由于目标船吨位很小、航速也较低,接收信噪比低于 0dB。双线阵中的两根线阵利用某段噪声数

据分别进行波束形成的水平波束指向性如图 7 所示(利用的噪声频段范围为 750Hz~1250Hz),其中虚线是左舷线列阵的水平指向性图,实线是右舷线列阵的水平指向性图。能够发现:在 53° 舷角存在一个目标,理论时延值约为 2,符号为正。图 8 是 53° 的左右波束信号进行时延估计得到的互相关函数,估算出的时延值为 2,符号为正,因而能够判断出目标处于左舷,这与真实目标场景相符。

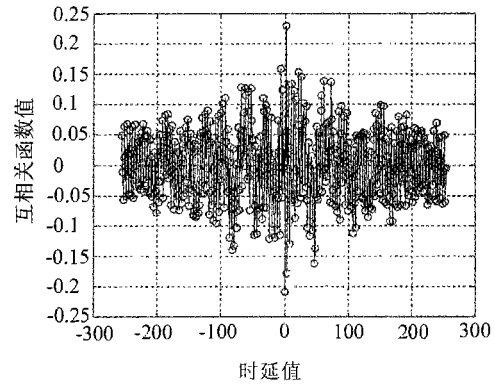


图 8 53° 左右两路波束信号的互相关函数

两次湖试实验数据分析结果充分验证了基于时延估计的左右舷分辨方法是有效可行的,并且简单实用。

4 结论

文中针对双线阵的左右舷分辨问题,特别是双线阵间距较大时的左右舷分辨问题,提出了一种以时延估计为理论基础的左右舷分辨方法,该方法将双线阵的左右舷分辨问题转变成对轴向对称的两路波束信号进行时延估计,根据时延值符号判断出目标所处的左右舷。该方法算法简单有效、对阵形畸变不敏感。该方法要求:如果是主动声纳情况,双线阵的间距 d 大于单频信号的半波长时,那么发射信号就不能采用单频信号。湖试实验充分证明了这种方法的有效性和可行性。

庆祝中国科学院声学研究所建所 40 周年

在中国共产党成立 83 周年之际,中国科学院声学研究所迎来了自己的 40 华诞。1964 年 7 月 1 日,在国家领导人的亲切关怀下,中国科学院声学研究所正式成立。经过几代声学所人的艰苦奋斗、不懈努力,声学所从无到有、从小到大,如今已经成长为专业从事声学领域研究的科技国家队,国际声学领域的知名研究机构。

40 年的风雨征程, 40 年的艰苦创业, 40 年的辉煌业绩,为了纪念这一具有特殊意义的节日,声学所举办了一系列庆祝活动,以回顾声学所走过的辉煌历程,展现声学所全新的发展面貌,彰显声学所更加光辉灿烂的未来。

为加强所内外的学术交流,让更多年轻学子了解声学、走进声学,促进声学所的建设与发展,所庆前夕,声学所特邀请国内外知名学者、两院院士、著名声学专家、教授举行了为期两天的系列学术报告会。马大猷院士、应崇福院士、张淑仪院士、张仁和院士、李启虎院士、侯朝焕院士、汪承灏院士、杨士莪院士、马远良院士、宫先仪院士、钱梦骅教授、德国教授 Clemens Ruppel、美国教授卢建宇、海军研究院系统所刘文化所长、南京大学声学研究所程建春所长等 14 名声学界专家做了精辟、精彩、精妙的学术报告,内容涉及基础研究、声空化、声学微机电、水声、声学信号处理等多个领域和方面。他们精彩的报告吸引了所内外广大声学科研工作者,DSP 四层多功能厅座无虚席,每一位学者的报告都赢得了听众的热烈掌声。许多声学科研工作者利用这个难得机会,争先恐后地向各位学者提问、进行探讨、交流,并纷纷表示:难得有这么一次机

会,在这么集中的一段时间里,同这么多专家零距离接触、直接交流,受益非浅。

2004 年 7 月 1 日上午 10 时,庆祝声学所成立 40 周年庆典大会在北京友谊宾馆友谊宫(聚英厅)隆重召开,近千名嘉宾、声学所科研人员、职工和学生参加了庆祝大会。庆典大会的主题是“承历史音符,谱华彩乐章”。田静所长在会上作了主题发言。中国科学院江绵恒副院长在大会上发表了重要讲话,江副院长在讲话中要求声学所广大科研人员围绕中央提出的新的科学发展观,抓住机遇,迎接挑战,为国家创新体系的建设和中华民族的伟大复兴做出新的更大的贡献。许多嘉宾表达了热情的祝贺。

在声学所建所 40 周年来临之前,声学所团委、工会还共同组织了一系列积极向上、激情洋溢的活动。5 月 23 日至 6 月 27 日举办了“所庆杯”7 人制足球赛,共有 8 支代表队参加比赛。6 月 25 日,举办了第三届卡拉 OK 大奖赛决赛,共有 16 位选手参加了决赛。通过组织这些活动,既丰富了职工的生活,展现了声学所人的多才多艺,又在全所内营造了昂扬向上、团结奋进、开拓创新的良好氛围,将全所的创新文化建设推动到了一个新的高度。

建所 40 周年的庆祝活动已经圆满结束,但 40 年来声学所人勇于创新、不断进取的精神将永不磨灭。在新的历史时期,声学所面临着新的历史任务,挑战和机遇同在,压力和动力并存,声学所人必将秉承前辈事业,牢记肩负的历史使命,再接再厉,进一步丰富声学所的光辉历程。

(中国科学院声学研究所办公室)

参 考 文 献

- 1 Bertheas J, Moresco G, Dufourco P. Linear hydrophonic antenna and electronic device to remove right/left ambiguity, associated with the antenna. United States Patent, Patent Number: 5058082, Oct.15, 1991.
- 2 Doisy Y. Port-starboard discrimination performances on actived towed array systems. UDT95, France, 125~129.
- 3 Van Mierlo G W M, Beerens S P, Been R et al. Port/starboard discrimination by hydrophone trip-lets in active and passive towed arrays. UDT97, Germany: 176~181.
- 4 Gjonnes G S, Aagedal H. Left/right discrimination in software with conventional, passive thin-line towed submarine arrays. UDT2000, United Kingdom.
- 5 李启虎. 声呐信号处理引论. 北京: 海洋出版社, 2000.
- 6 Piersol A G. *IEEE Transactions on ASSP*, 1981, **29**(3): 471~477.
- 7 Carter G C. *IEEE Transactions on ASSP*, 1981, **29**(3): 463~470.
- 8 Quazi A H. *IEEE Transactions on ASSP*, 1981, **29**(3): 527~533.