

多冲击声源定位算法

于平, 吴波, 谢胜

(广东湛江 91388 部队, 广东湛江 524022)

摘要: 为了解决导弹、空投鱼雷等各种类型物体入水点精确定位问题, 针对多个冲击声源产生的复杂抵达序列, 提出先排序组合定位, 再对最小方差项排序, 然后用组合关联模型选取最优解组合的算法, 实现对多个冲击声源目标的精确定位。误差分析给出了阵位误差和测时误差对定位精度的影响。仿真测试了 13 枚弹头在 130m×30m 区域内、1s 时间内均匀分布的冲击定位情况, 13 点定位误差与阵位预置误差基本相当, 并且, 冲击区域在阵中心时的定位精度高于冲击区域在阵边缘时的定位精度。港内试验验证了该算法能够有效地对多个点进行解算定位, 其定位精度在 5m 以内。

关键词: 多冲击声源定位; 时延序列; 排序组合; 组合关联模型

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-06-0619-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.06.018

Positioning algorithm for multi-impact sound sources

YU Ping, WU Bo, XIE Sheng

(Unit 91388, PLA, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

Abstract: In order to solve the problem about accurate positioning for the dropping areas of objects such as missiles and airborne torpedoes, a new model is proposed aiming at the complex arrived-in sequence generated by multi-impact sound sources. It first sorts sequence combination and carries on integrated positioning, then sorts the minimum variance item. Finally, the rational model is used to select the optimal solution. The algorithm achieves accurate positioning of multi-impact sound source targets. Based on engineering practices, the error analysis is performed, and the influences of array position error and time error on positioning error are analyzed. The uniformly deployed impact positioning for 13 warheads is simulated in 130m*30m area within 1 second. The errors of 13 targets are equivalently to the errors of the preset array position, and the positioning accuracy in the middle of the array is higher than that at the edge. Simulation and sea trial are both carried out. Tests in the harbor verify that the algorithm can effectively realize the solving orientation of multi-dots, and the positioning accuracy achieves less than 5 meters.

Key words: multi-impact sound source positioning; delay sequence; sequence combination; combinatorial association model

0 引言

在武器系统试验与训练中, 常常会遇到各种类型物体入水问题。多目标溅落于海面时, 由于水中的声速较低, 以及空间位置、溅落时刻的差异, 将造成浮标接收信号的时序关系发生混乱。例如, 第一个抵达的信号有可能是第二个冲击产生的。即使是单个目标的情况, 信号识别也有可能发生虚警, 掺杂有虚假的多余信号。事实上, 90 年代中期美国已经完成了用于导弹入水弹着点的第一代“轻便式冲击定位系统”(Portable Impact Location System),

简称 PILS 系统^[1,2]。

本文针对多个冲击声源产生的复杂抵达序列, 提出先排序组合定位, 再对最小方差项排序, 然后用组合关联模型选取最优解组合的算法, 实现对多个冲击声源目标的精确定位, 并进行了误差分析、仿真测试及港内验证性试验。

1 多冲击声源定位算法模型

布设至少 4 枚测量浮标构成基阵, 测量并记录自身 GPS 位置; 多个声源冲击发生在阵内的任意位置。设一个基准同步时刻作为 0 时刻, 各浮标阵元测量并记录从 0 时刻开始的声信号接收时延, 形成抵达时间序列, 建立多冲击声源定位算法模型进

收稿日期: 2012-05-18; 修回日期: 2012-09-10

作者简介: 于平(1977—), 女, 山东莱州人, 工程师, 研究方向为水声测控技术。

通讯作者: 于平, E-mail: yuping.yy@foxmail.com

行多目标定位。

1.1 排序组合定位

对于多个几乎同时发生的冲击声源定位,需要对接收时延序列重新排序,以便匹配相应声源的假定抵达结构。任意选取一个浮标作为参考阵元,对应其每个接收时延,其他三个浮标存在冗余的信号时延序列。以 $3\text{km} \times 3\text{km}$ 阵形为例,对角线距离为 4242.6m ,南海声速一般为 $1520\sim 1540\text{m/s}$,因此阵内目标相对于两两阵元的时延差不超过 $\pm 3\text{s}$ 。以参考阵元的信号时延为基准,囊括其他三个阵元 $\pm 3\text{s}$ 内的所有可能时延值进行重新排列,组合 4 个浮标的脉冲抵达时刻,得到解算模型如式(1):

$$\sqrt{(X-X_i)^2+(Y-Y_i)^2+Z_i^2}-\sqrt{(X-X_0)^2+(Y-Y_0)^2+Z_0^2}=c(t_i-t_0) \quad (1)$$

式中: (X, Y) 表示目标的坐标,为未知量; (X_i, Y_i, Z_i) 表示浮标的三维坐标,由 GPS 测得; $i=0$ 为参考浮标; c 表示海水的平均声速; t_i 表示各浮标接收信号的时刻。

由于采用了信号抵达时间的差值,因此交汇几何属于双曲面定位的概念。按照双曲面交汇模型进行配组解算,得到备选的定位数组序列。

由于发生了多点位冲击,使得定位解出现排列组合现象。假设 N 是冲击信号的个数, n 为测量阵元个数,那么所有可能的定位解为 W 个,其中只有 N 个真解。以 $N=13, n=4$ 为例,共有 $W=28561$ 个可能解,其中包含了无几何交汇意义的虚解和 13 个真实解。

1.2 最小方差项排序

由于可能的定位解为数众多,因此需要采用某种规则进行筛选。本文提出最小方差项的排序原则,目的是缩小真实解的搜索范围,将全部的真解限定在 100 个左右的可能解中。对应每个定位解均建立最小方差项判据,数值上从小到大进行排序,在实际声源的位置应有较小的方差,出现在序列的前端。

将一组定位可能解记作 (X_k, Y_k) , 那么距离第 i 号浮标的斜距可表示为

$$R_{ki}=\sqrt{(X_k-X_i)^2+(Y_k-Y_i)^2+Z_i^2}$$

换算成各阵元的传播时延为

$$t_{ki}=R_{ki}/c$$

各阵元的传播时延与参考阵元的时延差记作

$$\tau_{ki}=t_{ki}-t_{k0}$$

根据该定位可能解的实测时延配组关系,构建

实测时延差为

$$\tau_{di}=t_i-t_0$$

考虑所有阵元,定义时延差方差项函数为

$$L_k=\sum_{i=1}^{n-1}(\tau_{ki}-\tau_{di})^2 \quad (2)$$

于是,当没有任何测量误差且时延配组为真解时,对应的时延差方差项应为零。而实际存在 GPS 误差、测时误差,以及海中声线的复杂性等情况,针对所有可能解的时延差方差项,在数值上从小到大进行排序,并不能保证最小方差项即对应着定位真解。因此按最小方差项排序选取的备选定位解的个数,一般需要远远大于实际的溅落点数目,以确保不发生漏解。

1.3 组合关联模型

对瞬间发生的多点冲击事件,由于水中声速较低,以及空间位置、溅落时刻的差异,将造成阵元接收信号的时序关系发生混乱^[1,2]。时空关联算法主要解决由于时间、空间差异造成的时序混乱问题。

假设经最小方差项排序选取了 M 个备选定位解,任意选取其中与目标个数相等的 n 个解作为一个组合,于是共有 C_M^n 个组合。例如 $M=80, N=13$, 则有 C_{80}^{13} 个组合。

对于某一个组合,假设有两个定位解重复利用了同一浮标阵元的同一接收时延值,则可以断定这两个定位解中至少有一个野解。因此,同一组合中的各个解不得重复利用同一浮标阵元的同一接收时延值,符合此判据的某个组合即为真实解组合。

显然,这种组合关联算法有助于消除信号识别的虚警事件,即在最初的 W 排序组合定位中,将疑似冲击信号扩充进来,以免发生漏报,并通过组合关联模型予以剔除。

2 误差分析

浮标阵位误差和测时误差是主要的随机误差源,也是系统误差的主要来源,所以我们用仿真方法分析阵位误差及测时误差对定位误差的影响^[3-5]。

首先,假设所有浮标的位置都存在系统偏差,即所有浮标都向右偏移了 $X\text{m}$, X 是一个 $0\sim 20\text{m}$ 的变量。这相当于在波浪运动方向上,阵形发生了偏移。两个声源的处理结果表明,每发生 1m 偏移,声源定位也将发生 1m 偏移。

其次,需要考虑每个浮标存在随机误差的情况。 $1\sim 4$ 号浮标的偏移方向,分别记为 \uparrow 、 \downarrow 、 \leftarrow 和 \rightarrow 。偏移量变化范围为 $1\sim 10\text{m}$,每步增加 2m 。

对于单一声源的情况，即使浮标的位置误差为 10 m，偏移导致的传播时间差也只有几个毫秒。

对于测时误差，还通过对某个浮标增加 1 ms 误差进行检验。仿真结果表明，每 1 ms 的传播时间误差，大约引起 1 m 的声源误差。

以上分析主要是测试定位程序的稳健性，并没有穷举所有应该考虑到的误差情况。

3 仿真分析

仿真测试多弹头导弹击水的定位情况。4 枚浮标组成 3 km × 3 km 的矩形阵，13 枚弹头在 130 m × 30 m 区域内均匀分布，在 1 s 的时间内先后冲击浮标阵内的任意位置，平均声速设定为 1530 m/s。阵元位置及接收时延测量均设定正态高斯误差^[3,6]。

仿真过程中发现，利用上述多冲击声源定位算法，大多数情况可以得到唯一一组解，可以认定为真解。但有少数情况出现得到多个组合解的情况，也就是说，多个组合中每个组合内的 13 个解均不共用同一个浮标的同一接收时延，这样又出现不能判除的野解。

多次仿真测试发现：如果冲击声源群靠近浮标阵中心位置，不能判除的野解出现在声源群冲击区域的水平或垂直中心线上，且一上一下或一左一右对称分布，如图 1 所示，此时可以通过经验判除野解；如果声源群冲击位置靠近浮标阵边缘，野解出现位置呈现随机分布，如图 2 所示，不容易判别，可结合航拍照片予以判别。所以，布阵时应尽量使冲击区域靠近阵中心为宜。

仿真测试多冲击声源定位精度，设置高斯正态分布的阵位误差为(-3 m, 3 m)，测时误差为(-20 ms, 20 ms)。仿真结果如表 1 所示，13 点定位误差与阵位误差基本相当，并且阵中心附近的定位精度比阵边缘高。

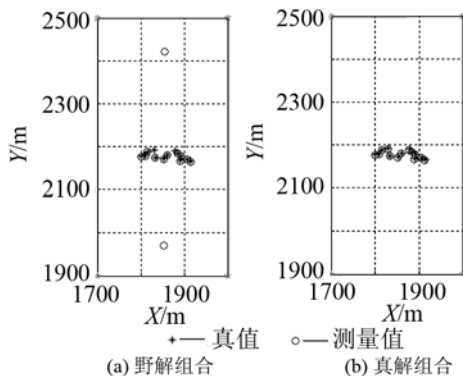


图 1 冲击声源群靠近浮标阵中心位置，仿真定位得到两组解
Fig.1 Two sets of solutions in positioning simulation when impact sound source group is closed to the center of buoy array

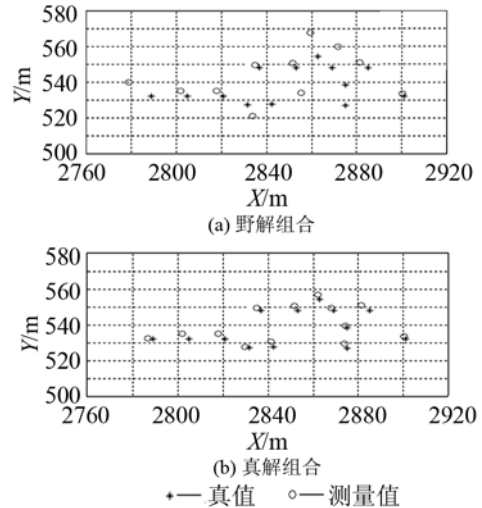


图 2 声源群冲击位置在浮标阵边缘，仿真定位得到两组解
Fig.2 Two sets of solutions in positioning simulation when impact sound source group is at the edge of buoy array

表 1 多冲击声源定位算法仿真误差统计表
Table 1 Simulation error of positioning algorithm for multi-impact sound source

点位号	阵中心/m			阵边缘/m		
	ΔX	ΔY	ΔR	ΔX	ΔY	ΔR
1	1.3	0.7	1.5	0.7	1.3	1.5
2	1.7	0.2	1.7	1.2	1.9	2.3
3	0.3	0.7	0.8	1.0	1.3	1.7
4	1.4	0.7	1.5	1.4	1.7	2.2
5	1.3	0.2	1.3	1.2	1.8	2.2
6	1.7	0.1	1.7	1.3	1.0	1.6
7	1.1	0.2	1.1	1.3	1.6	2.0
8	1.0	0.3	1.1	1.0	2.0	2.2
9	1.3	1.2	1.8	1.2	1.4	1.8
10	1.9	0.2	1.9	1.5	1.8	2.3
11	1.4	0.7	1.5	1.1	2.0	2.3
12	1.6	0.1	1.6	0.7	2.0	2.1
13	1.4	0.6	1.5	1.2	1.7	2.1

4 试验结果分析

在某海域实施了多冲击声源定位算法验证性试验，水深为 15~20 m。1~4 号浮标呈不等长四边形排列，记录自身的 GPS 位置，同步录取检测多冲击信号。

基于参考文献[7]对于溅落冲击声信号和爆炸声信号特性的分析，并且考虑到本试验只为了验证多冲击声源定位算法，对信号识别检测方法不做讨论，为了便于布放实施，我们用爆炸声源代替冲击声源进行试验。试验态势如图 3 所示，1~4#点位是 4 个测量浮标的布放位置。1 艘试验船阵中 0#点位漂泊，于船舷布放爆炸声源，各个爆炸声源的布放情况如图 4 所示。

4 个浮标接收序列如表 2 所示。第一次试验中

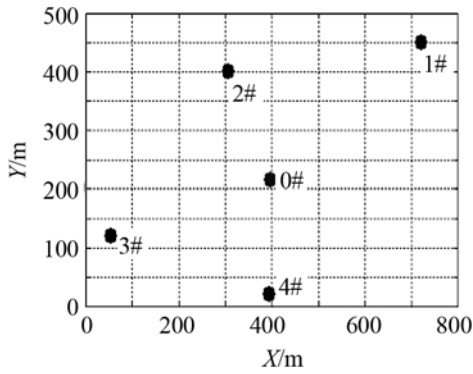


图3 试验态势图
Fig.3 Experimental scenario

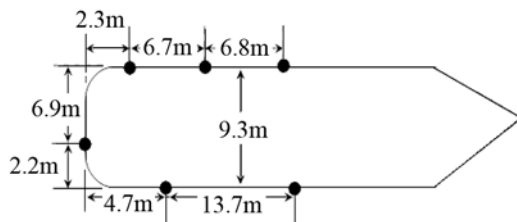


图4 声源布放图
Fig.4 Arrangement of sound sources

表2 各浮标接收到到达时间序列的冲击信号/s
Table 2 Receive sequences of all buoys

	1#	2#	3#	4#
第一次试验	7.9902	7.8934	7.9038	7.8608
	8.0462	7.9487	7.9489	7.9031
	8.0823	7.9982	8.0066	7.9397
	8.1985	8.0188	8.1211	8.0700
	8.2320	8.1375	8.1377	8.0892
	8.4564	8.3717	8.3844	8.3311
第二次试验	24.4584	24.2831	24.4055	24.3593
	24.5251	24.3605	24.4804	24.4231
	24.6016	24.3849	24.5512	24.4347
	24.6926	24.5217	24.6430	24.5918
	24.9093	24.7337	--	24.7998

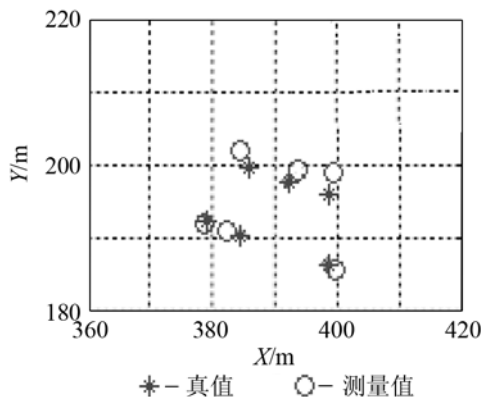


图5 第一次试验定位结果
Fig.5 The first positioning test results

有 6 个声源爆炸, 4 个浮标均检测到 6 个冲击信号。结合浮标 GPS 位置, 利用多冲击声源定位算法解算的定位结果如图 5 所示。

第二次试验中有 5 个声源爆炸(没有加装船艏部的声源), 1#、2#、4#浮标均检测到 5 个冲击信号。3#浮标漏检一个信号, 插一个空信号与 1#、2#、4#浮标接收序列进行排序组合定位。排序组合求解时, 有这一空信号的时延组合可利用 1#、2#、4#浮标接收时延和 GPS 位置进行解算, 最小方差项排序和组合关联模型不变, 定位结果如图 6 所示。

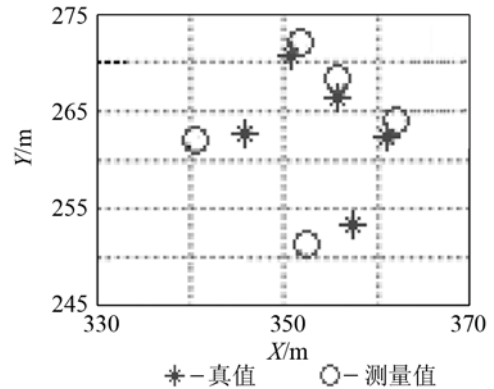


图6 第二次试验定位结果
Fig.6 The second positioning test results

两次试验定位结果与布放真值对比得到测量定位误差如表 3 所示, 可以看出两次测量结果的误差均在 5m 以内。

表3 港内验证试验结果
Table 3 The verification test results in harbor

	测量值/m		真值/m		误差/m		
	X	Y	X	Y	ΔX	ΔY	ΔR
第一次试验	399.6	195.1	398.6	196.0	1.0	-0.9	1.3
	393.7	199.3	392.1	197.9	1.6	1.4	2.1
	384.3	202.1	385.7	199.7	-1.4	2.4	2.8
	378.7	192.0	379.0	192.3	-0.3	-0.3	0.4
	382.3	190.8	384.4	190.4	-2.1	0.4	2.1
	399.6	185.8	398.6	186.3	1.0	3.5	3.6
第二次试验	362.1	263.9	360.2	263.1	1.9	0.8	2.1
	355.9	268.2	355.0	267.5	0.9	0.7	1.1
	351.5	271.9	349.8	271.8	1.7	0.1	1.7
	340.5	261.5	344.9	263.7	-4.4	-2.2	4.9
	352.3	251.2	356.2	254.3	-3.9	-3.1	5.0

5 结 论

本文针对多个冲击声源产生的复杂抵达序列, 提出先排序组合定位, 再对最小方差项排序, 然后用组合关联模型选取最优解组合的算法, 实现对多个冲击声源目标的精确定位。分析了影响定位误差的主要因素, 仿真测试了声源群冲击位置在阵中和阵边缘两种情况野解的不同形态和定位精度。港内试验验证了该算法能够有效地对多个点进行解算

定位, 其定位精度在 5 m 以内。

参 考 文 献

- [1] Jimmy D S, Michael A C. Preliminary results from a GPS-based portable impact location system[R]// Presented at the Institute of Navigation's Satellite Division Meeting, ION GPS-95, Palm Springs, CA., 1995, 12-15.
- [2] Press, W., et al. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, Second Edition[M]. Cambridge University Press, New York, NY, 1992.
- [3] R. J. 尤立克. 水声原理[M]. 洪申译. 哈尔滨船舶工程学院出版社. 1990.
Robert J. Urick. Principles of underwater sound[M]. Harbin: Harbin Shipbuilding Engineering Industry Press. 1990.
- [4] Stotts Steven. Source localization using GPS technology and received arrival time structure analysis in a air-deployed system[C]// 128th Meeting of the Acoustical Society of America, Austin, Texas, 1994.
- [5] Steven A, Stotts J M, Nancy R B. Multiple-source localization using GPS technology and received arrival time structure analysis in a air-deployed system[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1997, 22(3): 576-582.
- [6] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨工程大学出版社, 2002: 69.
LIU Baisheng, LEI Jiayu. Principle of underwater acoustics[M]. Harbin Shipbuilding Engineering Industry Press, 2002: 69.
- [7] 于平. 物体入水溅落信号特性分析与识别方法[J]. 舰船电子工程, 2010, 33(9): 44-46.
YU Ping. Characteristic Analysis and Identification Method of Launching Signal[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(9): 158-161.

“听力与言语医学中心”揭牌

2012年8月28日上午,中国科学院声学研究所东海研究站与中科院上海临床研究中心/上海市徐汇区中心医院共建的“听力与言语医学中心”揭牌仪式在徐汇区中心医院隆重举行。中科院上海分院副院长张旭、东海站站站长胡长青、徐汇区政协副主席黄承刚、卫生党工委书记潘贤利、徐汇区中心医院院长朱建民、党委书记赵桂绒等参加揭牌仪式。上海生命科学院党委副书记司胜利主持仪式。

朱建民院长和胡长青站长签署共建协议书,张旭副院长和黄承刚副主席为中心成立揭牌。

“医学中心”将以临床听力与言语障碍的诊疗和康复为主要研究方向,合作开展听觉补偿、言语评估与康复等技术的转化医学研究,力争用3~5年的时间建成依托声学所东海站和中科院上海临床研究中心的听觉言语与感知科学与临床医学紧密结合的成果临床转化机构。

会上,中科院上海分院副院长张旭对中心的成立给予了充分的肯定。他指出,发展听力言语研究是重要的临床科研方向,东海站是重要的声学技术领域的高科技研究机构,在生命医学方向有深厚的研究基础。他希望,“医学中心”通过努力工作,在原有听力与言语研究的基础上做出更多、更大的贡献。

成立仪式后,“医学中心”选举产生了第一届理事会成员,并召开理事会第一次会议。讨论通过中心管理团队、2012~2013年工作计划等相关事项。

“听力与言语医学中心”揭牌仪式取得了圆满成功。中心的成立将为我国听力与言语科学的临床研究与转化事业开辟出崭新的道路。