

# 超声速反舰导弹被动声定位算法研究

王磊, 张国强

(91550 部队, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 脱靶量测量对鉴定被测导弹的实际效能具有十分重要的意义; 随着反舰导弹武器试验越来越多的在复杂电磁环境下进行, 现有雷达体制脱靶量测量系统易受有源和无源电子干扰系统的干扰, 测量数据的有效性大幅降低, 难以满足试验鉴定需求; 由于声学系统不受外界复杂电磁环境的干扰, 为此, 提出利用声学方法进行脱靶量测量; 该方法在建立超声速导弹飞行的锥面方程后, 以时间差为观测量, 利用最小二乘法进行求解; 并建立导弹飞行姿态及速度的搜索空间, 基于极大似然估计思想, 采用搜索方式, 经有效性分析后, 解算出反舰导弹攻靶段飞行轨迹的最优解; 仿真计算结果表明, 当反舰导弹在靶船上空飞过, 绝大部分区域脱靶量解算精度优于 2m, 满足试验评定要求。

**关键词:** 被动声定位; 超声速; 脱靶量

## An Research on Passive Acoustic Location of Supersonic Anti-ship Missile

Wang Lei, Zhang Guoqiang

(91550 Troops, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The miss distance measurement is very important for the tested missile to evaluate the actual performance of it. Nowadays, more and more missile tests are carried out under complex electromagnetic environment. It leads to RF-based miss distance measurement system often is jammed by active jamming system and passive jamming system, the validity of measurement data is poor and does not meet the test requirements. Because the sound cannot be jammed under complex electromagnetic environment, an approach on miss distance measurement using acoustic method is brought out in this paper. After building the cone equation of supersonic missile, the time differences are used to resolve the miss distance by LS. Based on the idea of maximum likelihood estimation, the optimization results are searched in the search-space of missile attitude and velocity. The result of simulation indicates, the calculation precision of flight path is better than 2m in most area when the missile fly over target-ship.

**Keywords:** passive acoustic location; supersonic; miss distance

## 0 引言

导弹的性能较为集中的体现在弹靶遭遇段。根据遭遇段弹与靶的相对位置, 可以鉴定被测导弹末制导精度、评估引战配合效能和判定杀伤效果, 对鉴定导弹实际效能具有十分重要的意义。随着导弹试验越来越多的在复杂电子干扰环境下进行, 现有雷达体制的矢量脱靶量测量系统易被干扰(如, 靶载有源干扰系统、大功率雷达信号模拟器, 箔条云等), 难以满足试验测量需求, 急需开展新体制脱靶量测量系统研制。

目前, 除雷达体制外, 可用于脱靶量测量的主要有光学测量系统、卫星定位测量系统和声学测量系统。光学系统受能见度影响较大, 不能实现全天候使用; 卫星定位测量系统不适用于不加装卫星定位系统的反舰导弹试验; 而声学定位系统与前者相比, 具有良好的适用性, 若测量精度能够满足要求, 则具有非常良好的应用前景。为此, 本文提出一种基于被动声学定位的脱靶量测量方法, 该方法根据先验信息建立导弹运动矢量搜索空间, 以极大似然估计思想为基础, 采用搜索方式获取弹靶遭遇段飞行轨迹的最优解。

## 1 超声速导弹的声学特征

当物体以超音速飞行时会对附近的空气产生扰动, 形成马

赫波。在流体力学中, 马赫波是一种压力波, 以声速进行传播。马赫波可以叠加起来形成超音速流, 演变成为一种激波, 这种激波又叫马赫波波前<sup>[1-2]</sup>, 如图 1 所示。

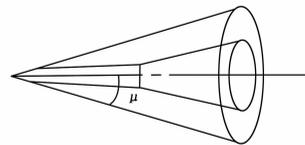


图 1 弹头激波示意图

赫波的半角  $\mu$  称为马赫角, 它和弹速 ( $v$ )、声速 ( $c$ ) 有如下关系:

$$\sin \mu = c/v = 1/M_a \quad (1)$$

$M_a$  称为马赫数, 形成马赫锥的必要条件是  $M_a > 1$ , 也即弹速高于声速, 弹速越高马赫角越小。

利用传感器接收到的马赫波有较为明显的“N”型特征, 当传感器距离弹道较近时, 马赫波有极高的强度, 很容易被检测到。弹丸激波压力变化如图 2 所示, 超音速弹丸头部锥体形成的凹角转折使压力从常压  $P_0$  急速上升至  $P_0 + P_1$ , 锥柱界面形成的凸角转折使压力从  $P_0 + P_1$  降至  $P_0$ , 柱面膨胀又使压力从  $P_0$  降至  $P_0 - P_1$ , 弹丸底端的界面变化又使压力从  $P_0 - P_2$  急速回升至  $P_0$ 。N 波的幅值和两幅值间的宽度取决于弹丸的特性, 弹速以及弹道到检测点的法线距离等。

## 2 超声速导弹脱靶量声学解算方法

被动声定位是声学技术中一门重要的分支, 其理论和方法

收稿日期:2015-11-27; 修回日期:2016-01-02。

作者简介:王磊(1979-),男,辽宁抚顺人,博士,高级工程师,主要从事导弹试验测量数据处理方向的研究。

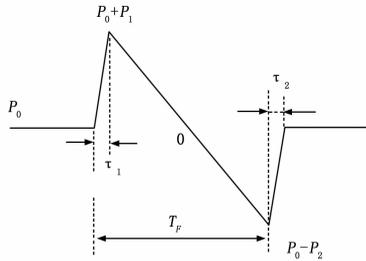


图 2 超声速目标圆锥状激波压力曲线

在当今得到广泛的应用。它是一种利用声传感器阵列和电子装置接收目标噪声信号，再通过计算信号到达不同声传感器阵列的时间延迟，进而估计出目标方位的技术。目前较多地应用在智能雷弹、武装直升飞机、地面坦克车辆等一些低速目标物体的定位上。国内外最常用到的被动声阵列有四元阵<sup>[3-4]</sup>、五元平面阵<sup>[5]</sup>、五元空间阵<sup>[6]</sup>、正四棱锥阵<sup>[7]</sup>、七元空间声阵<sup>[8]</sup>等。考虑到靶船安装限制条件较多，难以采用规则的布阵方式实现声学测量，需要采用不规则布阵方式。为此，本文给出了一种适用于靶船条件的声学脱靶量解算方法。

2.1 坐标系的建立

导弹飞行坐标系：假定靶船中心为坐标原点，导弹飞行方向为 X 轴正向，Z 轴正向指向天顶，构成右手坐标系。

靶船载体坐标系：假定靶船中心为坐标原点，船首方向为 X 轴正向，Z 轴正向指向天顶，构成右手坐标系。

当地水平坐标系：假定靶船中心为坐标原点，其 X 轴的正方向指向正东 E、Y 轴的正方向指向正北 N、Z 轴则是垂直于地面指向天空 U，所以有时候又称为北东天坐标系。

2.2 观测模型的建立

在导弹飞行坐标系下，导弹激波圆锥面在 t 时刻的方程为<sup>[8-9]</sup>：

$$(\tan^2 \mu) \cdot (x - vt - x_0)^2 = (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \quad (2)$$

式中，μ 为导弹激波圆锥半角；v 为导弹运动速度，(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>) 为初锥面定点坐标。

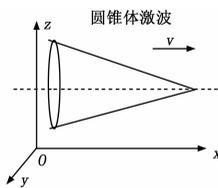


图 3 激波波形示意图

假定靶船上安装 n 个声传感器，利用导弹及靶船上安装的姿态测量系统所测得姿态信息，对其进行坐标转换，得到传感器在导弹飞行坐标系下的坐标为 (x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>)、(x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>, z<sub>2</sub>)、…、(x<sub>n</sub>, y<sub>n</sub>, z<sub>n</sub>)，且接收到激波的时刻分别为 t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, …, t<sub>n</sub>，令导弹过靶时刻为零时刻，则时延为 Δt<sub>12</sub>, Δt<sub>13</sub>, …, Δt<sub>1n</sub>，可得不同时刻的锥面方程为：

$$\begin{aligned} (\tan^2 \mu) \cdot (x_1 - x)^2 &= (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \\ (\tan^2 \mu) \cdot (x_2 - v \cdot \Delta t_{12} - x)^2 &= (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 \\ &\vdots \\ (\tan^2 \mu) \cdot (x_n - v \cdot \Delta t_{1n} - x)^2 &= (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中，v 为导弹飞行速度，(x, y, z) 为导弹过靶时锥面顶点

坐标。

令 Δx<sub>i</sub> = x<sub>i</sub> - x<sub>1</sub>, i = 2, 3, 4, …, n，对式 (3) 进行简化可得：

$$\begin{aligned} \tan \mu (\Delta x_2 - v \cdot \Delta t_{12}) &= \frac{\sqrt{(y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \sqrt{(y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2}}{\tan \mu (\Delta x_n - v \cdot \Delta t_{1n})} = \\ &= \frac{\sqrt{(y_n - y)^2 + (z_n - z)^2} - \sqrt{(y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2}}{\tan \mu (\Delta x_n - v \cdot \Delta t_{1n})} \end{aligned} \quad (4)$$

由于式 (4) 为非线性方程，求解前需对其进行线性化，可写成如下形式：

$$X = (A^T A)^{-1} L \quad (5)$$

式中，A 为观测矩阵，L 为残差项。

在布设声学传感器时，传感器构成的几何图形对模型解算精度有较大影响，当所有传感器布设在一个平面时，矩阵 A<sup>T</sup>A 将表现为秩亏，当传感器近似布设在一个平面内，矩阵 A<sup>T</sup>A 的条件数较大，求逆后会导致模型解算误差被急剧放大，因此，在靶船安装条件允许时，需尽可能将传感器布设成良好的几何图形，几何图形的优劣可用 DOP 值进行衡量。

2.3 模型求解

在利用最小二乘求解之前，需将靶载传感器的坐标转换到导弹飞行坐标系下，也就是说要根据导弹与靶船的姿态测量信息计算出导弹轨迹与靶船夹角 α, β, γ，并且在导弹飞行速度 v 已知的情况下，才能正确解算。而在导弹飞行过程中，导弹的姿态与速度信息均通过遥测传输至地面站，可用于事后解算。但为获取更高的解精度，这里分别建立导弹飞行速度和姿态的搜索空间，需采用搜索的方式，遍历搜索空间，进而获取全局最优解。

1) 导弹飞行速度搜索空间的建立。在事后解算时，可根据多年实测数据及遥测数据，对飞行速度建立 ±5 m/s 的搜索空间，搜索步长可设为 0.5 m/s。

另外，导弹飞行速度也可以利用式 (6) 进行解算<sup>[10]</sup>：

$$v = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + z_2^2}}{\Delta t_{21}} \quad (6)$$

并以此为初值，建立 ±5 m/s 的搜索空间，搜索步长可设为 0.5 m/s。

2) 导弹方向矢量搜索空间的建立。导弹方向矢量搜索空间的建立可采用两种方式。第一种根据靶船测姿态系统测得的靶船姿态数据结合导弹的理论弹道计算出导弹过靶段的方向矢量，并以此为初值，根据以往飞行试验测量数据，建立 ±10° 的搜索空间。第二种是以弹上惯导数据和靶船姿态数据计算导弹飞行矢量，由于弹上惯导数据的精度较高，为此，可建立相应的搜索空间，搜索步长为 0.1°。一般情况下，第二种方式搜索效率较高，解算精度较好，只有在遥测数据出现异常时，才采用第一种方式进行搜索。

3) 有效性检验。在整个解算中，导弹飞行速度与飞行矢量的确认是求解的最后一个步骤，其主要功能是从搜索过程中获取的可能的候选值的集合中选取最优者，并判断其正确性。虽然在理论上搜索求解方法应该得到正确的候选值，但由于定位模型的不精确和观测数据存在误差，实际上得到的最佳候选值可能不是正确解，需要对得到的最佳候选值进行检验。因此，对于检验方法的选择至关重要。如果条件过宽，将导致整个过程时间延长，不利于快速求解；如果条件太严，很可能将

正确的候选值排除在外。

这里, 在有效性分析上, 采用  $F$ -ratio 检验, 可表示为:

$$F\_ratio = \Omega_{次小} / \Omega_{最小} \quad (7)$$

$F\_ratio$  是两个后验方差因子之比, 分子对应第二可能候选值; 分母对应最可能候选值。在应用中, 若  $F\_ratio$  值足够大, 则认为两个解有明显区别, 所选取的候选值为最优解。 $F\_ratio$  服从  $F$  分布, 在显著水平  $\alpha=0.1$ , 自由度为 (6, 6) 条件下, 两者比值应大于 3。

综上所述, 计算过程如图 4 所示。

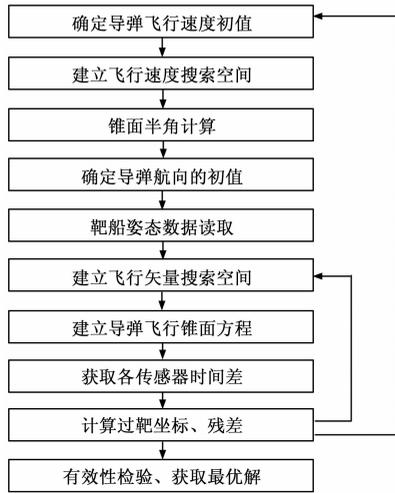


图 4 脱靶量解算流程图

### 3 仿真结果分析

对上述方法进行仿真计算, 假定靶船长 60 m, 宽 7 m, 高 15 m, 根据靶船实际情况, 布设声学传感器 7 个, 声传感器时间测量误差为 0.000 1 s。

当导弹轨迹与靶船首尾线夹角为  $45^\circ$  时, 声学过靶量解算误差如图 5 所示; 当导弹轨迹与靶船首尾线夹角为  $90^\circ$  时, 声学过靶量解算误差如图 6 所示, 横坐标为靶船首尾方向, 纵坐标为导弹过靶高度, 单位为 m。

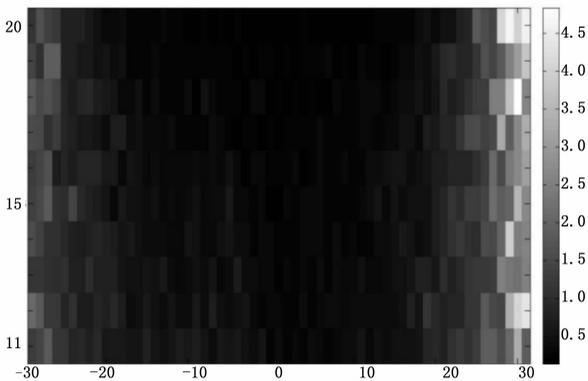


图 5 弹靶夹角  $45^\circ$  时误差分布图

从仿真误差分布图可以看出, 测量精度与导弹入射角有关, 垂直入射时精度较高, 倾斜入射时, 精度相对较低。总体而言, 当导弹在靶船中间穿过时, 声学脱靶量测量结果精度较高, 绝大部分区域优于 2 m, 当导弹从靶船两侧通过时, 测量结果精度较低, 这是由测量几何图形的变化所造成的。但总体

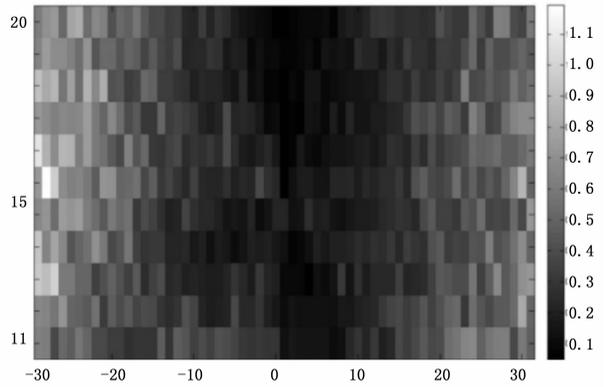


图 6 弹靶夹角  $90^\circ$  时误差分布图

而言, 满足试验鉴定需求。

### 4 结束语

1) 在今后的反舰导弹武器试验中, 抗干扰试验将成为常态, 干扰态势也将日趋复杂。在这种情况下, 基于雷达体制的矢量脱靶量测量系统已难以满足试验保障要求。而声学定位系统与之相比, 具有更好的适用性, 可很好地解决抗干扰试验中, 反舰导弹矢量脱靶量测量问题。

2) 由于现有靶船上各种附属设施较多, 致使声学传感器的布设受到较大的限制, 难以布设成规则的几何图形, 导致常用的解析求解法并不适用于靶船环境, 为此, 本文在建立被动声定位模型后, 基于极大似然估计思想, 采用搜索方式解算反舰导弹攻靶段飞行轨迹的最优解。仿真结果表明, 该方法较为灵活, 其解算精度, 满足试验要求。

3) 在声传感器布设时, 应根据靶船实际条件, 尽可能优化声传感器构成的几何图形, 避免观测矩阵条件数较大所导致的解算精度降低的问题。

#### 参考文献:

- [1] 肖 峰, 李惠昌. 声, 武器和测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 孙俊伟, 张 亚. 低空超声速巡航导弹声探测研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28 (4): 45-48.
- [3] 刘小刚. 基于四元十字阵的声被动定位研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [4] 闫 石, 何 轲, 赵延安. 一种基于四元立体阵的声定向方法 [J]. 电声技术, 2007, 31 (7): 16-19.
- [5] 陈华伟, 赵俊渭, 郭业才. 五元十字阵被动声定位算法及其性能研究 [J]. 探测与控制学报, 2003, 25 (4): 11-16.
- [6] 邱扬刚, 张 亚, 李世中. 五元空间阵声被动定位算法及性能分析 [J]. 四川兵工学报, 2010, 31 (2): 122-125.
- [7] 孙书学, 顾晓辉, 孙晓霞. 用正四棱锥形阵对声目标定位研究 [J]. 应用声学, 2006, 25 (2): 102-108.
- [8] 李昆原, 叶哲江. 七元空间声阵应用时延估计定位的研究 [J]. 电声技术, 2011, 35 (10): 43-46.
- [9] 万建伟, 石 践, 周良柱, 等. 超声速运动目标的被动声定位算法研究 [J]. 国防科技参考, 1998, 19 (1): 36-40.
- [10] 王 颖, 赵常寿, 刘 洋. 基于开放式 T 靶弹丸任意角入射声学定位算法研究 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13 (29): 8751-8754.