

◇ 研究报告 ◇

基于被动声学的超声速武器脱靶量解算方法

王磊 陈昭男[†]

(中国人民解放军 91550 部队 大连 116023)

摘要 针对武器试验环境日趋复杂,电磁干扰强,且现有主动雷达体制反舰武器矢量脱靶量测量系统存在易受干扰这一问题,该文提出利用多个声学基阵,通过测量超声速武器飞行过程中产生的激波,获取该武器在不同时刻相对声学基阵的方位,进而采用平面相交求解该武器的矢量脱靶量。仿真计算结果表明,当声学基阵测向误差为 1° ,弹道偏角为 45° 时,中靶点解算精度优于 1.2 m,航向角和俯仰角解算精度优于 0.5° ,测量精度满足试验评定要求,可为被试武器性能评定提供有效支撑,具有十分重要的军事意义。

关键词 被动声定位,超声速,脱靶量

中图分类号: TJ761.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)03-0385-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.03.011

Supersonic anti-ship weapon miss-distance using passive acoustic location

WANG Lei CHEN Zhaonan

(91550 Troops, People's Liberation Army, Dalian 116023, China)

Abstract Miss-distance measurement of anti-ship weapon is very important for performance evaluation. Nowadays, weapon tests almost are carried out under complex electromagnetic environment. It causes miss-distance measuring system using active radar to be jammed. A new approach using multi-passive-acoustic system is brought forward to solve this question. The shock wave of weapon is survived and is used to obtain the direction between weapon and acoustic sensors. After that, the track of weapon is calculated using plane intersection. The results of simulation show the calculation precision can be used in performance evaluation.

Key words Passive acoustic positioning, Supersonic, Miss-distance

2017-11-08 收稿; 2018-01-05 定稿

作者简介: 王磊 (1979-), 男, 辽宁抚顺人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 靶标技术及数据处理。

[†] 通讯作者 E-mail: 13050513211@163.com

1 引言

矢量脱靶量(弹靶遭遇段,靶船中心距武器攻击轨迹最短距离及方向)测量结果,对被试武器性能评定具有十分重要的意义。然而试验区域电磁环境日趋复杂,主动雷达体制矢量脱靶量测量系统易被干扰,难以满足试验测量需求。

基于被动声学测量的矢量脱靶量测量系统,因其不受外界电磁环境干扰、不受试验区域能见度的影响及体积小、成本低、测量范围大等优点,已成为靶场提高脱靶量测量可靠性的主要研究方向。

目前国内外对超声速反舰武器被动声定位的研究还相对较少,且相关研究大都集中在狙击手定位、武器来袭预警及快速报靶等方面。万建伟、石践等利用激波到达时间,提出时间梯度和波前方向矢量的算法,确定目标的速度和位置,并对其进行仿真计算^[1-2],但该算法需要在较大的几何尺度上布设多个测量站(测站间隔80 m),这在靶船上是难以实现的;肖峰、孙俊伟等先后提出利用声学基阵作为预警雷达的必要补充,进行巡航导弹预警,但文中并未给出详细的解算模型和解算精度^[3-4];笔者曾提出通过建立空间锥面方程,利用最小二乘解算出导弹脱靶量,以此为先验信息与弹速、射向联合建立搜索空间,采用极大似然估计寻求最优解,该方法需要事先获取导弹飞行的相关信息,用于缩减搜索空间大小,且存在搜索到次优解的风险^[5]。此外,国内诸多学者提出利用四元阵^[6-7]、五元平面阵^[8]、五元空间阵^[9]、正四棱锥阵^[10]、七元空间声阵^[11]、T型靶^[12]等解析求解方法,在阵型不规则时并不适用,且仍需先验信息的帮助。

针对上述方法的不足,本文结合反舰武器试验实际环境,提出一种新方法。该方法利用多个声学基阵,通过测量超声速武器飞行过程中产生的激波,获取该武器在不同时刻相对声学基阵的方位,并利用平面相交求解该武器矢量脱靶量。

2 超声速武器的声学特征分析

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(Mach wave)。马赫波可以叠加起来形成超音速流,演变成为一种激波(Shock wave),这种激波又叫马赫波波前(Mach wave front),如图1

所示。

锥面的半角 θ 称为马赫角,它和弹速 v 、声速 c 有如下关系:

$$\sin \theta = c/v = 1/Ma, \quad (1)$$

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

子弹在飞行过程中,其尾部会形成真空区,因此,激波的生成过程如图2所示。

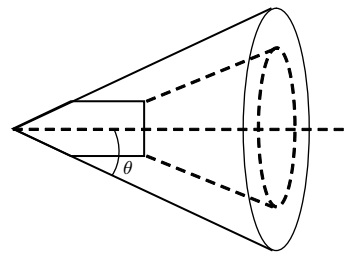


图1 弹头激波示意图

Fig. 1 The shock wave of bullet head

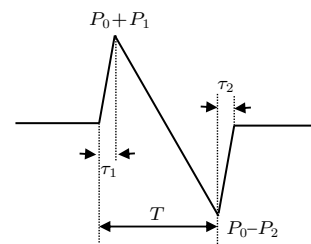


图2 超声速目标圆锥状激波压力曲线

Fig. 2 Conical shock pressure curve of supersonic object

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 , τ_1 、 τ_2 、 T 为时间间隔。

超声速武器在飞行过程中,由于尾部发动机持续工作,其尾部不能形成真空区,因此,其飞行所形成的激波并不是典型的N波形式。某次武器试验中,利用4个声传感器(AWA14435,采样频率100 kHz,动态范围0~140 dB)录取武器过靶段的激波信号,如图3、图4所示。

从图3可以看出,录取到的波形并没有呈现出N波特性,而且由于武器飞行声音较大,传感器已出现限幅。但从图4可以看出,超声速反舰武器飞行过程中形成的激波前沿非常陡峭,不到2个采样周

期(0.02 ms)即完成上升过程,在这个过程中,被试武器仅仅飞行很短的一段距离,这为后续仿真分析提供坚实基础。

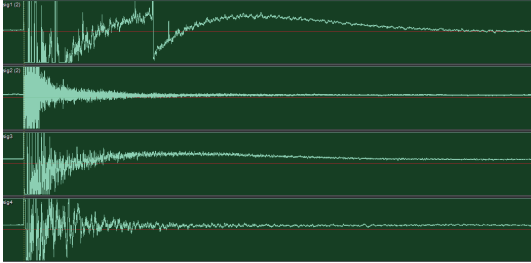


图3 超声速武器激波信号实测图

Fig. 3 The shock wave signal measurement diagram of supersonic weapon

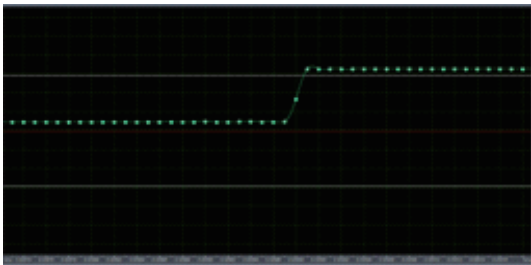


图4 激波前沿

Fig. 4 The shock wave front

3 观测模型的建立

如图5所示,靶船建立载体坐标系,坐标原点为靶船甲板的中心, y 轴沿靶船纵向中线指向船首, x 轴指向靶船右舷, z 轴指向天顶,构成右手坐标系。靶船上安装5个超短基线声基阵 $S_1 \sim S_5$ (可不规则布设),假定武器过靶段为匀速直线运动,过靶面时为 B 点;声基阵 S_1 收到声信号时,武器运动到 P_1 点;声基阵 S_4 收到声信号时,武器运动到 P_4 点。线段 P_4S_4 与武器攻击轨迹 P_1P_4 的夹角为 θ ,为武器超声速飞行产生激波的锥面半角,同理,线段 P_1S_1 与武器攻击轨迹 P_1P_4 的夹角也为 θ 。

武器与声基阵的几何关系如图6所示, C_i ($i = 1, 2, 3$)为发声点, S_i ($i = 1, 2, 3$)为超短基线声基阵,需注意的是,武器运动轨迹与 C_1S_1 、 C_2S_2 、 C_3S_3 不在同一平面。

以声基阵 S_1 收到声信号时为例,此时武器已运动到 P_1 点,而发声点为 C_1 点, P_1S_1 与武器攻击轨迹的夹角为 θ , S_1C_1 与 P_1S_1 垂直, S_2 、 S_3 的关系同理。这里 S_iC_i 不共面。

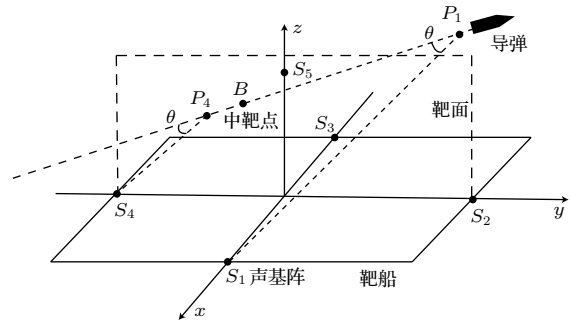


图5 超声速武器过靶示意图

Fig. 5 The schematic diagram of supersonic missile over target

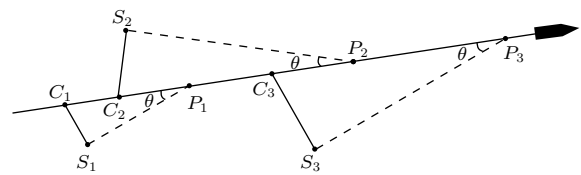


图6 武器运动轨迹与声基阵的几何关系

Fig. 6 The geometric relationship between missile and acoustic array

假定武器攻击轨迹的单位向量为 (l, m, n) ,利用声基阵可测量出 S_1C_1 的单位向量 (l_1, m_1, n_1) ,根据余弦定理且考虑到 (l, m, n) 和 (l_1, m_1, n_1) 为单位向量,则:

$$(l_1, m_1, n_1) \cdot (l, m, n)^T = \cos(90 - \theta). \quad (2)$$

同理5个声基阵可构建5个观测方程:

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & -1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_5 & m_5 & n_5 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \\ \cos(90 - \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式(3)为齐次方程,未知数为 (l, m, n, θ) 。

在试验中,武器的飞行速度可通过遥测数据时候获得,进而可利用式(1)求解出 θ ,因此,式(3)可改写为

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ l_5 & m_5 & n_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin \theta \\ \dots \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式(4)中, (l_i, m_i, n_i) 为观测值, $\sin \theta$ 为已知值,可求解出未知数 (l, m, n) 。

在无法获取武器末段飞行速度时,则 $\sin\theta$ 为未知值,可以将式(4)进行改写:

$$\begin{bmatrix} -1 & l_1 & m_1 & n_1 \\ -1 & l_2 & m_2 & n_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & l_5 & m_5 & n_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\theta \\ l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{令 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & l_1 & m_1 & n_1 \\ -1 & l_2 & m_2 & n_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & l_5 & m_5 & n_5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \sin\theta \\ l \\ m \\ n \end{bmatrix}, \quad \text{可得}$$

$\mathbf{AX} = 0$, 两边同时乘 \mathbf{A}^T 可得 $\mathbf{A}^T\mathbf{AX} = 0$ 。

由于 $\mathbf{C}_1\mathbf{S}_1$ 、 $\mathbf{C}_2\mathbf{S}_2$ 、 $\mathbf{C}_3\mathbf{S}_3$ 并不在同一平面内,因

$$\text{此, 其各自方向向量构成的矩阵} \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ l_5 & m_5 & n_5 \end{bmatrix} \text{满秩,}$$

则 $\text{rank}(\mathbf{A}^T\mathbf{A}) = 3$, 因此, 齐次方程(5)有解。

对矩阵 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 进行QR分解:

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ 0 & r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\theta \\ l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

考虑到矩阵 \mathbf{Q} 为满秩矩阵, 其逆矩阵存在, 方程两边同时乘以 \mathbf{Q}^{-1} , 可得

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ 0 & r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\theta \\ l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

可解得

$$\begin{aligned} r_{33}m + r_{34}n &= 0, \\ r_{21}l + r_{22}m + r_{23}n &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

进而可得

$$\begin{aligned} m &= -r_{34}, \\ n &= r_{33}, \\ l &= -(-r_{22}r_{34} + r_{23}r_{33})/r_{21}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中, m 的符号可根据预先知道的武器来袭方向进行确定。对 l 、 m 、 n 进行归一化处理, 即可得到武器攻击轨迹的单位向量 (l, m, n) 。

向量 $\mathbf{S}_1\mathbf{C}_1$ 可通过声基阵测量得到, 则平面 $S_1C_1P_1$ 的法向量 $(l_{S_1C_1P_1}, m_{S_1C_1P_1}, n_{S_1C_1P_1})$ 为

$$\begin{aligned} &(l_{S_1C_1P_1}, m_{S_1C_1P_1}, n_{S_1C_1P_1}) \\ &= \overrightarrow{(l, m, n)} \times \overrightarrow{(l_1, m_1, n_1)}, \end{aligned} \quad (10)$$

利用平面法向量和声传感器的坐标可构建平面方程 $S_1C_1P_1$:

$$\begin{aligned} &l_{S_1C_1P_1}(x - x_{s1}) + m_{S_1C_1P_1}(y - y_{s1}) \\ &+ n_{S_1C_1P_1}(z - z_{s1}) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

同理, 可构建平面方程 $S_2C_2P_2$ 、 $S_3C_3P_3$ 。利用平面相交即可得到武器攻击轨迹:

$$\begin{cases} l_{S_1C_1P_1}(x - x_{s1}) + m_{S_1C_1P_1}(y - y_{s1}) \\ + n_{S_1C_1P_1}(z - z_{s1}) = 0, \\ l_{S_2C_2P_2}(x - x_{s2}) + m_{S_2C_2P_2}(y - y_{s2}) \\ + n_{S_2C_2P_2}(z - z_{s2}) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

两个平面可交出武器攻击轨迹, 多个平面相交可利用最小二乘求解。

4 仿真结果分析

假定声基阵的采样频率为100 kHz, 其布设位置如图5所示。影响定期精度的因素有声学基阵的定位误差、靶船形变误差、声基阵测向误差等。考虑到声基阵与靶船固联, 其安装位置可事先精确标定, 且靶船在航行过程中自身形变较小, 因此, 误差源主要集中在声基阵测向误差上。

假定声学基阵的中心坐标为 $S_1(7, 0, 0)$ 、 $S_2(0, 35, 0)$ 、 $S_3(-7, 0, 0)$ 、 $S_4(0, -35, 0)$ 和 $S_5(0, 0, 15)$ 。在典型试验态势下(武器入射角为 45° 、俯仰角为 3°), 各声学基阵的各向测角误差为 1° , 过靶区域为 $-35 \leq y \leq 35, 0 \leq z \leq 40, x = 0$, 过靶点在过靶区域上服从均匀分布, 对过靶区域进行格网化, 格网大小为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 分别计算在不同过靶点上的误差。

武器矢量脱靶量解算误差仿真结果如图7所示。不难看出, 当声学基阵各向测角误差在 1° 时, 当反舰武器穿过靶面时, 该算法的过靶点解算精度优于1.2 m, 绝大部分区域的解算精度优于0.5 m; 当武器过靶飞行高度在5~15 m时, 俯仰角的解算精

度较高,在 0.2° 左右,飞行高度在30 m以上时,俯仰角的解算精度较低,在 0.5° 左右;相比较而言,武

器航向角的解算精度较高,在越大部分区域,解算精度优于 0.2° 。

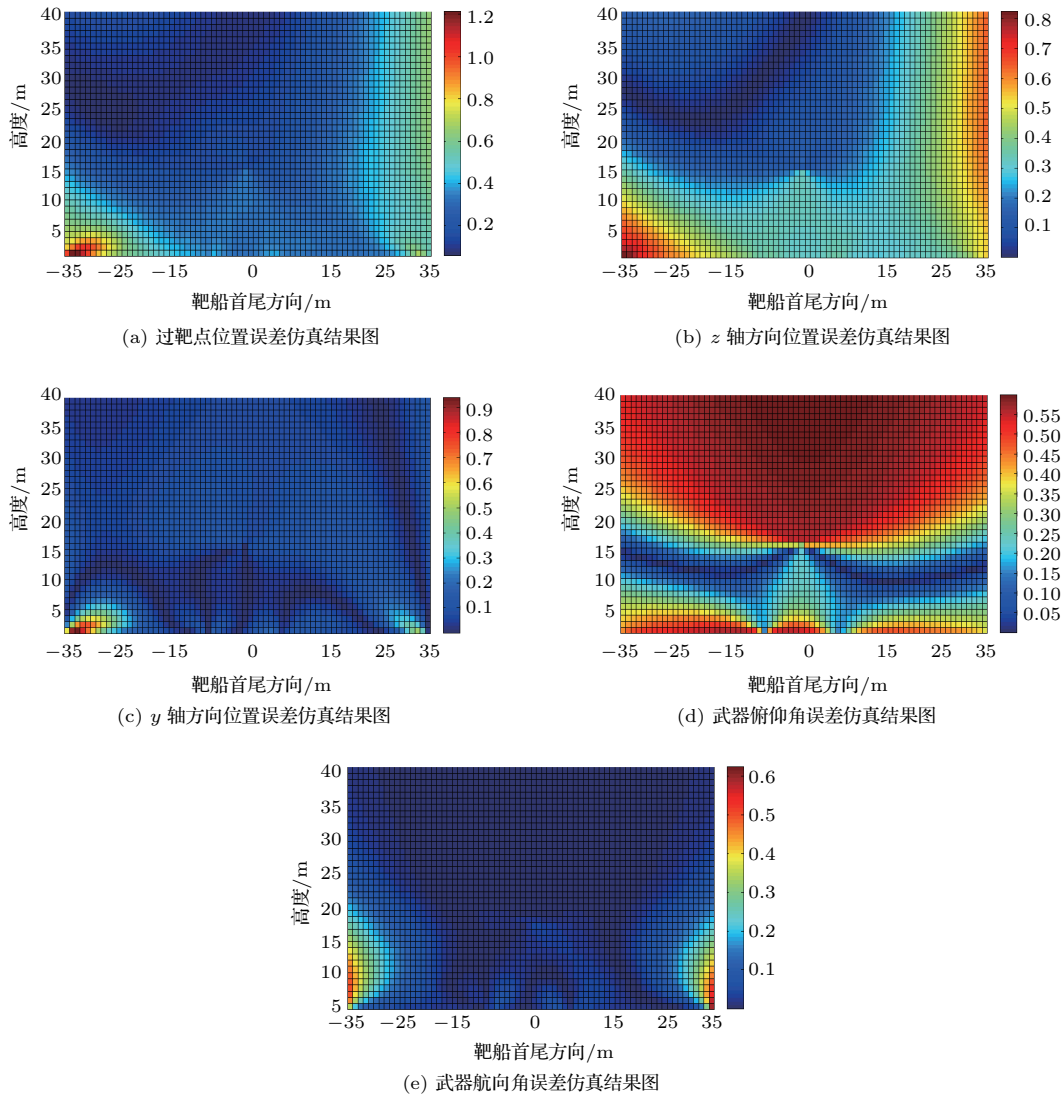


图7 武器矢量脱靶量解算误差仿真结果

Fig. 7 Simulation results of miss-distance

改变仿真条件,可得到以下规律(仿真计算结果图就不一一给出):

(1)当武器与靶船航向垂直时,脱靶量解算精度最高,平行时,解算精度较差;

(2)当武器水平攻击靶船时,脱靶量解算精度最高,垂直攻击时,解算精度较差;

(3)声基阵测角精度 1° 、武器入射角为 45° 、俯仰角为 3° 时,当武器在靶面外过靶时,脱靶量解算精度下降,距靶船中心越远,精度下降越大,在距靶船中心50 m处,解算误差约为2 m,在距靶船中心100 m处,解算误差约为7 m;

(4)当声基阵测角精度提高时,脱靶量解算精度相应提高,两者近似呈线性关系。

5 结论

对超声速反舰武器激波实测数据进行分析可知,由于其激波前沿十分陡峭,利用声学基阵对其进行测量,可得到较高的测向精度。在此基础上,本文提出的平面相交方法与现有方法相比,具有解算过程较为简单、无需获取较为准确的先验信息、无需进行搜索、无需进行规则布阵等优点,具有较好的

适用性。仿真计算结果表明,典型试验态势下,矢量脱靶量的解算精度优于0.5 m,在其他态势时,其解算精度可满足试验鉴定要求。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 石践. 超声速运动目标被动声定位算法的后置处理[J]. 声学与电子工程, 1999(1): 9-12.
- [3] 肖峰. 探测超声速巡航导弹的被动式声学雷达研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(5): 624-629.
Xiao Feng. Passive acoustic radar for the detection of supersonic cruise missile[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(5): 624-629.
- [4] 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.
Sun Junwei, Zhang Ya. A study on sound detection of low altitude supersonic missile[J]. Journal of Projectiles, Rocket, Missile and Guidance, 2008, 28(4): 45-48.
- [5] 王磊, 张国强. 超声速反舰导弹被动声定位算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(6): 121-123.
Wang Lei, Zhang Guoqiang. A research on passive acoustic location of supersonic anti-ship missile[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(6): 121-123.
- [6] 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.
- [7] 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.
Yan Shi, He Ke, Zhao Yan'an. A method to estimate bearing with nonplane quaternion array based on DSP[J]. Audio Engineering, 2007, 31(7): 16-19.
- [8] 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.
Chen Huawei, Zhao Junwei, Guo Yecai. Acoustic passive localization algorithm based on a planar five-element array and performance analysis[J]. Journal of Detection & Control, 2003, 25(4): 11-16.
- [9] 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.
- [10] 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.
Sun Shuxue, Gu Xiaohui, Sun Xiaoxia. Study on localization of acoustic target with a rectangular pyramid array[J]. Applied Acoustics, 2006, 25(2): 102-108.
- [11] 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.
Li Kunyuan, Ye Zhejiang. Study on the application of time delay estimation in seven-element acoustic array's location[J]. Audio Engineering, 2011, 35(10): 43-46.
- [12] 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.
Wang Ying, Zhao Changshou, Liu Yang. The research of acoustic localization algorithm of bullet shooting at arbitrary incidence based on opened T-shape target[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(29): 8751-8754.