

一种超声速运动目标的被动声定位算法

石 践 万建伟 周良柱

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

1997年6月26日收到

摘要 超声速运动目标在空气中飞行时产生激波,本文利用激波到达时间,提出了一种基于波前方向矢量的算法,确定目标的速度和位置。最后,通过对三站均匀圆阵的估计精度的分析计算,讨论了该算法的有效性。

关键词 超声速运动目标,声探测,激波,被动定位

A passive localization algorithm of supersonic object

Shi Jian Wan Jianwei Zhou Liangzhu

(Institute of Electronic Engineer, NUDT, Changsha 410073)

Abstract A supersonic object generates a shock wave during its flight in the air. Utilizing the arrival time of the shock wave, we present an algorithm based on the directional vector of the wavefront to determine the speed and location of the object. We tested the effectiveness of the algorithm by computing the estimation accuracy of a 3-station evenly-distributed circular array.

Key words Supersonic object, Acoustic detection, Shock wave, Passive localization

1 引言

在以精确制导武器为主要打击力量的现代战场上,炮位侦察的重要性越来越突出。在七十年代初,炮位侦察雷达兴起,并在海湾战争等局部战争中发挥了重要作用。但随着电子干扰,反辐射导弹,隐身技术应用,它们正面临着严重的挑战^[1]。而被动声探测技术,以其隐蔽性、全天候、低成本、不易被干扰等独特优点,重新受到人们的重视。国内某研究所曾根据火炮的炮口声波进行了炮位探测器的研制,但它的声传感器阵列的尺寸在公里级以上,还远不能真正应用于野外实战环境^[2]。据报道,美国已研制成功利用火炮弹道波实现的实时炮

位探测器,代表了当前声测炮位技术的最新成果,其核心就是超声速运动目标的被动声探测技术,它主要利用了波前方向矢量信息^[3]。所谓波前方向矢量,就是指波前切面的法向矢量。

超声速运动目标在空中产生激波。在短距离内,我们可以近似认为目标做匀速直线运动,则它所产生的激波为标准的圆锥面。利用激波到达各个声压传感器的时间,来确定目标的速度和飞行路线,Reid最早研究这个问题,他提出了一种算法^[4]。但该算法的传感器阵列的数量庞大,而且只利用了激波到达时间梯度信息。

在该算法的基础上,本文通过选择适当的

坐标系, 建立较为简单的激波锥面方程, 提出了一种基于波前方向矢量的被动定位算法, 减小了传感器数量, 取得了满意的效果。并以三站均匀圆阵为例, 讨论了该算法的有效性。

2 超声速运动目标的被动定位算法原理

若一组声压传感器的位置已知, 利用激波到达各个传感器的时间, 我们通过如下算法可以完成被动定位。首先假设两个角度参数, 通过坐标旋转, 以目标的运动方向为一坐标轴, 建立锥面方程; 然后适当选取传感器阵列, 对

激波到达时间进行处理, 获取波前方向矢量; 最后由空间几何关系估计出锥面顶点。

2.1 激波锥面方程的建立

根据传感器阵列位置, 首先确立一个空间直角坐标系, 我们称之为原坐标系。建立较为简单的激波锥面方程, 是激波定位算法的一个首要问题, 它直接关系到整个算法的繁简。我们选取目标的飞行方向为新坐标系的 $-X'$ 轴方向, 进行坐标轴旋转, 如图 1 所示。为减少参数个数, 我们采用欧拉角的坐标旋转公式, 则新坐标系、原坐标系之间的坐标变换公式为

$$\begin{bmatrix} X' \\ y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \gamma & \cos \phi \sin \gamma & \sin \phi \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ -\sin \phi \cos \gamma & -\sin \phi \sin \gamma & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

我们简记为

$$X' = RX = (r_{ij})X \quad (2)$$

或

$$X = R^T X' \quad (3)$$

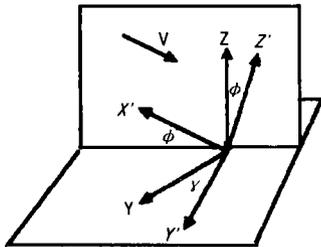


图 1 坐标轴旋转示意图

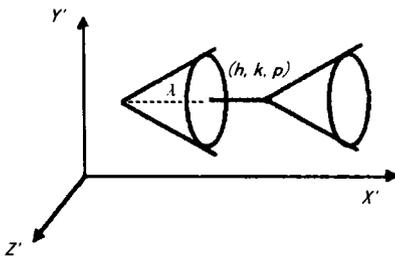


图 2 激波锥面示意图

时刻的初始位置 (锥面顶点) 是 (h, k, p) , 速度为 v , 锥面半锥角为 λ , 如图 2 所示, 则我们可以得到 t 时刻的激波锥面方程:

$$q^2(x' + vt - h)^2 = (y' - k)^2 + (z' - p)^2 \quad (4)$$

式中 (设声速为 a)

$$\begin{aligned} \sin \lambda &= v/a \\ q &= \tan \lambda \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 参数 v , ϕ , γ 的估计

被动定位中的参数估计有许多方法, 如最大似然法、卡尔曼滤波、高斯-牛顿法等, 但它们有的需要某些先验统计特性, 有的运算量大且收敛速度慢, 而最小二乘法这一经典方法简单有效, 并且在一定条件下与一些估计方法是等价的, 具有良好的估计性能。

我们令 ∇ 为对坐标 x , y , z 的梯度运算符, 对式 (2) 作梯度运算, 有

那么, 在新坐标系 $X'Y'Z'$ 中, 设目标在 $t = 0$

$$\nabla X' = R \quad (6)$$

易知 $\nabla x', \nabla y', \nabla z'$ 是两两正交的单位矢量。对式 (4) 两边作梯度运算, 有

$$q^2(x' + vt - h)(\nabla x' + v\nabla t) = (y' - k)\nabla y' + (z' - p)\nabla z' \quad (7)$$

再用 $\nabla x'$ 对上式两边作标量积, 可得

$$1 + v\nabla x' \cdot \nabla t = 0 \quad (8)$$

令 $\nabla t = \{\mu, \rho, \xi\}$, 上式可写成

$$(vr_{11})\mu + (vr_{12})\rho + (vr_{13})\xi = -1 \quad (9)$$

如果在测站 i , $i = 1, 2, \dots, N (N \geq 3)$, 时间梯度数据 $\{\mu_i, \rho_i, \xi_i\}$ 已知, 应用最小二乘得到 $vr_{11}, vr_{12}, vr_{13}$ 的估计, 再由式 (1)、(5) 即可得到参数 v, ϕ, γ 和 ϕ 。

现在我们来计算时间梯度, 根据

$$\nabla t = (\partial t / \partial x, \partial t / \partial y, \partial t / \partial z) \quad (10)$$

设测站 $i(x_i, y_i, z_i)$ 的声传感器位置为

$$(x_i, y_i, z_i) + \Delta_{lji}(\delta_{1j}, \delta_{2j}, \delta_{3j}) \quad (11)$$

$j = 1, 2, 3$

式中, $l = 1, 2, \dots, n_{ji} (n_{ji} \geq 3)$,

$$\delta_{kj} = \begin{cases} 1 & k = j \\ 0 & k \neq j \end{cases}$$

即测站 $i(x_i, y_i, z_i)$ 是由三组 ($j = 1, 2, 3$) 声传感器构成, 它们分别平行于原坐标系的 x, y, z

轴, 个数为 n_{ji} , 如图 3 所示。

对任一组声传感器的激波到达时间, 我们近似用二次多项式进行拟合, 即

$$t(\Delta) = a_{ji} + b_{ji}\Delta + c_{ji}\Delta^2 \quad (12)$$

应用最小二乘估计得到这三个拟合参数 a_{ji}, b_{ji}, c_{ji} , 那么对测站 i , 时间和时间梯度我们取为

$$t_i = (a_{1i} + a_{2i} + a_{3i})/3 \quad (13)$$

$$\nabla t_i = (b_{1i}, b_{2i}, b_{3i}) \quad (14)$$

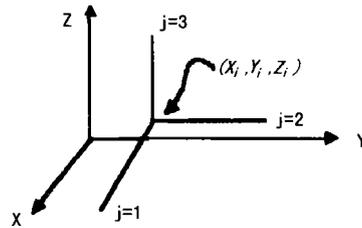


图 3 测站传感器分布图

2.3 波前方向矢量的估计

根据激波锥面方程式 (4), 点 (x', y', z') 的波前方向矢量为

$$\{q^2(x' + vt - h), -(y' - k), -(z' - p)\} \quad (15)$$

归一化为

$$\vec{F} = \left\{ \sin \lambda, \cos \lambda \frac{-(y' - k)}{q(x' + vt - h)}, \cos \lambda \frac{-(z' - p)}{q(x' + vt - h)} \right\} \quad (16)$$

简记为

$$\vec{F} = \{\sin \lambda, \cos \lambda \cos \alpha, \cos \lambda \sin \alpha\} \quad (17)$$

根据上式, 式 (7) 可改写为

$$\nabla y' \cos \alpha + \nabla z' \sin \alpha = -q(\nabla x' + v\nabla t) \quad (18)$$

由各个测站的时间梯度、参数 v, ϕ, γ , 应用最小二乘估计可得 $\cos \alpha, \sin \alpha$, 则我们就获得了每一个测站的波前方向矢量。

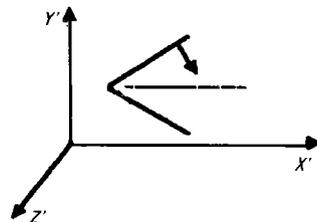


图 4 波前方向矢量示意图

2.4 锥面顶点的估计

在新坐标系中, 锥轴方向矢量为 $\{-1, 0, 0\}$, 设测站 $i(x'_i, y'_i, z'_i)$ 的波前方向矢量为 $\{F_{xi}, F_{yi}, F_{zi}\}$, 由图 4, 易得过该点的锥面母线的方向矢量 $\{m_{1i}, m_{2i}, m_{3i}\}$:

$$\begin{cases} m_{1i} = F_{yi}^2 + F_{zi}^2 = \cos^2 \lambda \\ m_{2i} = -F_{xi}F_{yi} = -\sin \lambda \cos \lambda \cos \alpha \\ m_{3i} = -F_{xi}F_{zi} = -\sin \lambda \cos \lambda \cos \alpha \end{cases} \quad (19)$$

$$\frac{x' - x'_j + F_{xj}a(t_i - t_j)}{m_{1j}} = \frac{y' - y'_j + F_{yj}a(t_i - t_j)}{m_{2j}} = \frac{z' - z'_j + F_{zj}a(t_i - t_j)}{m_{3j}} \quad (22)$$

求其交点即可得在时间的锥面顶点, 即

$$\begin{cases} m_{1i}s_i - m_{1j}s_j = x'_j - x'_i - F_{xj}a(t_i - t_j) \\ m_{2i}s_i - m_{2j}s_j = y'_j - y'_i - F_{yj}a(t_i - t_j) \\ m_{3i}s_i - m_{3j}s_j = z'_j - z'_i - F_{zj}a(t_i - t_j) \end{cases} \quad (23)$$

应用最小二乘估计得到 s_i, s_j , 分别代入两直线方程可得两点, 我们取其中点为锥面顶点。

设测站个数为 N , 为了进一步提高精度, 对任一测站 i 可令 $j = 1, 2, \dots, N (j \neq i)$, 用上述方法求解, 然后取均值并作为时间 t_i 的锥面顶点估计值 $(x'_{di}, y'_{di}, z'_{di})$ 。

根据目标 (锥面顶点) 匀速直线运动的方程:

$$\begin{cases} x' = h - vt \\ y' = k \\ z' = p \end{cases} \quad (24)$$

由上面所得到的 N 个锥面顶点, 采用均值估计, 可得

$$\begin{cases} h = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x'_{di} + vt_i) \\ k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y'_{di} \\ p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z'_{di} \end{cases} \quad (25)$$

将上式结果 (h, k, p) 代入 (3) 式, 进行坐标旋转变换, 最终得到目标在原坐标系中的位

那么锥面上过点 (X'_i, y'_i, z'_i) 的母线方程为

$$\frac{x' - x'_i}{m_{1i}} = \frac{y' - y'_i}{m_{2i}} = \frac{z' - z'_i}{m_{3i}} \quad (20)$$

易知, 这些母线与锥轴的交点都在同一直线上, 设两条母线 L_i, L_j 的激波到达时间分别为 t_i, t_j , 将母线 L_j 平移到母线 L_i 的同一锥面上, 易得两直线方程分别为

$$\frac{x' - x'_i}{m_{1i}} = \frac{y' - y'_i}{m_{2i}} = \frac{z' - z'_i}{m_{3i}} = s_i \quad (21)$$

置 (x_0, y_0, z_0) 。

3 计算机模拟结果

设三站均匀圆阵, 其半径为 80m, 每个测站的传感器分布相同, 在每个方向上有 3 个传感器, 分布为 $\Delta_{lji} = -3.5, 0, 3.5$, 即一个测站共有 7 个传感器。易知对于最小二乘估计而言, 上述阵列设置的测站和传感器的个数是最少的, 总共需要 $3 \times 7 = 21$ 个传感器。

设目标的飞行参数真值为 $(v, \gamma, \phi, h, k, p) = (500, 10, 50, 200, 40, 30)$, 声速 $a = 340\text{m/s}$, 激波到达时间噪声为零均值、标准差 $\sigma = 100/3\text{ms}$ 的高斯噪声。根据高斯分布的特性, 那么 99% 的到达时间误差在 $3\sigma = 100\text{ms}$ 以内。

在上述假定下, 用 MatLab 进行蒙特卡罗仿真, 仿真结果列于表 1。我们可以看出: 虽然估计不是无偏的, 但偏倚很小, 目标位置估计误差的标准差小于 1 米, 算法显示了良好的估计性能, 具有较高的定位精度。

(下转第 10 页)

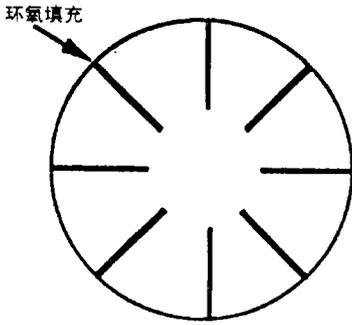


图 13 高频稀土棒的横截面

参 考 文 献

- 1 Eda H, Oyatsu M, Nadmi Z, Kobayashi T. et al. The 10th International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications, Kyoto, Japan, 16-19 May, 1989. 285-302.
- 2 周福洪. 水声换能器及基阵. 北京: 国防工业出版社, 1984. 153.
- 3 Abell J S, Butler D, Greenough R D, Joyce V, et al. *J of Magnetism and Magnetic Materials*, 1982 **62**: 6-14.
- 4 McCollum M D, Hamonic B F, Wilson O B. *Transducers for Sonics and Ultrasonics*. Technomic Publishing Co, INC, 1993. 15.
- 5 ZHU Houqing, Liu Jianguo, Wang Xiurong, et al. *J of Alloys and Compounds*, 1997 **258**: 49-52.

- 6 朱厚卿, 张洪平 刘建国. 1993 年全国水声学学术会议论文集, 1993, 11, 13-16, 宜昌.
- 7 Nakano I, Tsuchiya T, Amitani Y, et al. The International Symposium on Giant Magnetostrictive Materials and their Applications, Tokyo, Japan, November 5-6, 1992, 77-82.
- 8 Claeysen F, Boucher D. Design of Lanthanide Magnetostrictive Sonar Projectors, Undersea Defence Technologies (UDT) 1991, Proc. 1059-1065.
- 9 Claeysen F, Lhermet N, Leletty R, et al. Progress in Magnetostrictive Sonar Transducers, Undersea Defence Technologies (UDT) 1993, Proc. 240-250.
- 10 Kvarnsjo L. *J of Alloys and Compounds*, 1997 **258**: 123-125.
- 11 Joshi C H, Schempp E, Schiff E A. Putting a Chill into the New HTS Applications, Superconductor industry, Fall 1993, 26-29.
- 12 李楚建, 张效昌, 唐云俊等. 第九届磁学和磁性材料会议, 1996 年 10, 21-27, 郑州.
- 13 ETREMA Terfenol-D Magnetostrictive Actuators, ENTEMA Products, INC. 1996.
- 14 Larson L G. International conference on Giant Magnetostrictive Materials, ICGMM'96, Nov. 6-8, 1996 Honolulu, Hawaii, U.S.A.
- 15 McCollum M D, Hamonic B F, Wilson O B. *Transducers for Sonics and Ultrasonics*. Technomic Publishing Co, INC 1993, 160-169.
- 16 *ibid*, 113-118.
- 17 贺西平, 李斌, 孙进才. *应用声学*, 1998, **17**(3): 43-45.

(上接第 43 页)

表 1 计算机模拟的估计结果

目标位置 (m)	估计误差的均值 (m)	估计误差的标准差 (m)
x_0 97.03	-0.01	0.86
y_0 57.73	0.09	0.28
z_0 172.49	-0.07	0.19

4 结论

综上所述, 首先我们对测站的声传感器进行一定的布设, 在简化激波到达时间模型的基础上, 进行二次多项式拟合, 得到了测站中心的时间和梯度梯度的估计. 这实际上是对到达时间噪声的滤波, 在前端进行这样的处理对于整个算法的精度是非常重要的.

然后, 我们应用矢量运算, 对参数进行分

步估计. 由于需要估计的参数较多, 若同时进行估计, 那么参数空间则过大, 这会给估计方法的选择和计算造成很大的困难. 最后, 根据波前方向矢量, 应用空间几何关系得到激波锥面顶点.

本文基于波前方向矢量, 应用最小二乘法, 为超声速运动目标提供了一种有效的被动定位算法. 对于飞行弹丸, 应用该算法得到它在空中不同时刻的几个位置, 再用弹道方程进行外推, 即可得到弹丸的发射点和落点, 这是我们的进一步研究方向.

参 考 文 献

- 1 朱道光. 火控雷达技术, 1995, **24**(4): 13-19.
- 2 陆燕芳, 何巧, 罗晓松等. 电声技术, 1993, (3): 2-6.
- 3 Par Renaud. *Science & Vie*, 1995, (3): 105-107.
- 4 David E O, Edward G M. AD-875500, 1970.