

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.08.022

立体五元十字阵定位算法与精度分析

王宏凯, 房立清, 熊超

(军械工程学院火炮工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为提高立体阵中俯仰角的定向精度, 对立体五元十字阵的基本定位算法进行了推导。以往文献中常用正弦值来计算俯仰角大小, 但这种方法不能同时反映 2 个结构尺寸参数对俯仰角精度的影响。针对这一情况, 在俯仰角的计算上采用正切值。经过与传统平面五元十字阵的定向精度进行比较, 发现用正切值来表示俯仰角, 不但能更加精确地描述影响俯仰角精度的各种因素, 同时此法表示的俯仰角在精度上也较正弦值表示法高。立体五元十字阵的定向性能较好, 具有较好的工程应用价值。

关键词: 定向; 五元十字阵; 俯仰角精度

中图分类号: TJ302 **文献标志码:** A

Location Algorithm and Precision Analyzing of Solid Five-Element Cross Array

Wang Hongkai, Fang Liqing, Xiong Chao

(Dept. of Artillery Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to improve the directional accuracy of the pitch angle of solid array, the localization equations of an acoustic array using solid five-element are derived. Previously used to calculate the elevation angle with sine, but this method is not conducive to describe the influences of both the two structure dimension parameters on the accuracy of elevation angle. Aiming at the situation, on the elevation angle calculate use the tangent value. Compared the localization ability with the traditional planar five-element array, find that characterizing the elevation angle using the tangent can gain a higher directional accuracy, and at the same time can describe various factors that affect pitch angle accuracy more accurately. The solid five-element cross array has good performance, and engineering application value.

Keywords: localization; five-element cross array; precision of the elevation angle

0 引言

被动声探测技术是一种利用声学原理, 通过电子装置获取并处理声波信息, 以实现目标识别和定位的技术。由于雷达在低空或地面目标的探测上存在盲区^[1-2], 近年来已深入开展了声探测技术的研究。传声器阵列技术是被动声探测技术的关键技术之一, 文献[3]对高低四元阵的定位精度进行了深入研究, 通过对低仰角和高仰角的算式进行加权平均, 提高了仰角的探测精度。文献[4]研究了平面五元十字阵的定向算法, 对平面五元十字阵的低空探测性能进行了研究; 由于平面十字交叉阵定位精度较低, 文献[5]提出了空间交叉阵, 研究了其定位算法及性能。笔者研究的对象是立体五元十字阵, 其模型构成与四元对称立体方阵^[6]相似, 给出立体五元十字阵的定位公式, 并进行精度分析, 通过仿真可以看出立体五元十字阵具有良好的定向性能。

1 定位模型

对任意给定的立体五元十字阵, 可选定如图 1

坐标系。各传声器布置如图 1, 其中 T 表示点状声源, M_0 、 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 表示 5 个传声器。传声器 M_2 、 M_4 在 xoy 面上的投影点与 M_1 、 M_3 的连线构成正四边形。设阵元 M_0 到正四边形各顶点的距离为 $\frac{\sqrt{2}}{2}a$, 阵元 M_2 、 M_4 到平面 xoy 的垂直距离为 h , 则各阵元的坐标分别为 $M_0(0,0,0)$ 、 $M_1(0.5a, 0.5a, 0)$ 、 $M_2(-0.5a, -0.5a, h)$ 、 $M_3(-0.5a, -0.5a, 0)$ 、 $M_4(0.5a, -0.5a, h)$, 声波从声源 T 到达阵元 M_0 与阵元 M_i 的时间差即时延, 可表示为 $\tau_i (1 \leq i \leq 4)$, 声源 T 到达阵元 M_i 距离表示为 TM_i , 则声源 T 到达阵元 M_0 与阵元 M_i 的距离差 $d_i = TM_i - TM_0$ 。

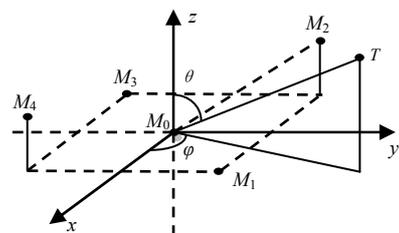


图 1 立体五元十字阵原理图

收稿日期: 2011-04-28; 修回日期: 2011-06-09

作者简介: 王宏凯(1986—), 男, 黑龙江人, 硕士研究生, 从事武器实验、性能检测与故障诊断研究。

2 定位算法

r_0 (即 r), r_1, r_2, r_3, r_4 为点声源 T 到传声器 M_0, M_1, M_2, M_3, M_4 的距离, 由几何关系可得如下方程组:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \\ \left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{a}{2}\right)^2 + z^2 = (r + d_1)^2 \\ \left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{a}{2}\right)^2 + (z - h)^2 = (r + d_2)^2 \\ \left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{a}{2}\right)^2 + z^2 = (r + d_3)^2 \\ \left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{a}{2}\right)^2 + (z - h)^2 = (r + d_4)^2 \end{cases}$$

对上式进行叠代求解, 同时考虑到 $r \gg d_i$, 则:

$$\begin{cases} x \approx \frac{r}{2a}(d_2 + d_3 - d_4 - d_1) \\ y \approx \frac{r}{2a}(d_3 + d_4 - d_1 - d_2) \\ z \approx \frac{r}{2h}(d_1 + d_3 - d_4 - d_2) \\ r = \frac{a^2 - (d_1^2 + d_3^2)}{2(d_1 + d_3)} \end{cases}$$

根据阵型中的几何关系, 可推出方位角与俯仰角的计算公式, 由于结构尺寸参数 a, h 均会对俯仰角的精度产生影响, 因此笔者采用俯仰角的正切值来表征俯仰角的值:

$$\tan \varphi = \frac{y}{x} = \frac{d_2 + d_3 - d_4 - d_1}{d_3 + d_4 - d_1 - d_2}$$

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} = \frac{h\sqrt{(d_3 + d_4 - d_1 - d_2)^2 + (d_2 + d_3 - d_4 - d_1)^2}}{a(d_1 + d_3 - d_2 - d_4)}$$

3 误差分析

下面分析 d_i 的误差对定向精度的影响。假设目标声源是点声源其坐标为 $T(x, y, z)$, 声波沿直线传播, 其传播速度是常数 c , 则有 $d_i = c \times \tau_i$ 。因为 τ_i 的统计误差相同, 故 d_i 的统计误差也相同。设 d_i 的方差为 $c\delta_\tau$, 则误差公式为:

$$\delta_\varphi = \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial d_i} \right)^2 \right]^{1/2} (c\delta_\tau)$$

在上述得到的方位角、俯仰角公式中, 涉及多个距离差, 使得计算过程过于繁琐且不利于误差公式的化简。由此, 笔者采用冗余时延^[4]算法的逆运算将 $\tan \varphi, \tan \theta$ 公式进行化简, 并计算得到 $\sin \theta, \cos \theta$:

$$\tan \varphi = \frac{d_{13} + d_{24}}{d_{24} - d_{13}} \quad \tan \theta = \frac{\sqrt{2}h\sqrt{d_{13}^2 + d_{24}^2}}{a(d_{12} + d_{34})}$$

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r} = \frac{\sqrt{2}}{2a}\sqrt{d_{13}^2 + d_{24}^2} \quad \cos \theta = \frac{z}{r} = \frac{1}{2h}(d_{12} + d_{34})$$

3.1 方位角误差分析

根据误差公式, 对方位角 φ 求偏导, 将求出的 $\frac{\partial \varphi}{\partial d_{13}}, \frac{\partial \varphi}{\partial d_{24}}$ 的值带入误差公式并化简, 可得到方位角 φ 的误差公式为:

$$\delta_\varphi = \frac{c}{\sqrt{2}a \sin \theta} \delta_\tau \quad (1)$$

由式 (1) 可以看出, 方位角误差与有效声速、时延误差、结构尺寸、俯仰角大小有关。而前 2 项影响因素在测量场地、测量环境、测量装置选定后即无法改变; 影响方位角精度的另外 2 个因素则是在试验过程中可调节的。因此, 增大阵列的结构尺寸, 或选择较大俯仰角 (趋于 90°) 进行测量可以有效地降低方位角误差, 提高方位角测量精度。

3.2 俯仰角误差分析

同理, 对俯仰角 θ 求偏导, 将求出的 $\frac{\partial \theta}{\partial d_{13}}, \frac{\partial \theta}{\partial d_{24}}$ 的值带入误差公式并化简, 可得到俯仰角 θ 的误差公式为:

$$\delta_\theta = \frac{c\sqrt{h^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta}}{\sqrt{2}ah} \delta_\tau \quad (2)$$

由式 (2) 可以看出, 立体五元十字阵的俯仰角误差与有效声速、时延误差、阵型的 2 个基本结构尺寸及俯仰角的大小有关。而有效声速、时延误差在试验中可认为其数值大小恒定, 可通过改变 2 个结构尺寸及俯仰角大小来改变俯仰角的测量精度。

对俯仰角精度公式求偏倒 (分别以结构尺寸 a, h 为自变量), 所得结果均小于零。所以, 俯仰角误差 δ_θ 随结构尺寸 a, h 的增大而减小。

4 定向性能比较

笔者采用对比的方式对立体五元十字阵的定向性能加以分析。参照文献[4,7], 按立体五元十字阵的建模方式, 对平面五元十字阵进行建模, 并求解其误差公式, 通过计算可得:

$$\delta_\varphi = \frac{c}{\sqrt{2}a \sin \theta} \delta_\tau \quad (3)$$

$$\delta_\theta = \frac{c}{\sqrt{2}a \cos \theta} \delta_\tau \quad (4)$$