

一种实现目标定位与跟踪的新方法

钱 进

(东南大学无线电系 南京·210018)

本文介绍了一种采用圆周阵对目标声源进行被动定位和跟踪的方法。与线阵不同,圆周阵可对目标进行全方位跟踪,且测距精度不受目标方位变化的影响。文中给出了圆周阵的测距、测向公式,并从理论上分析了测距性能,计算机仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 被动定位 时延

A novel method for passive locating and tracking a noise source

QIAN Jin

(Radio Engineering Dept. Southeast University, Nanjing · 210018)

In this paper a passive method is presented for locating and tracking a noise source by use of circular array, which is different from linear array. It can track target at all of bearing and the variance of range estimation is not depended on target bearing. The formulas of calculating range and bearing for circular array are derived, and ranging performance are analysed theoretically. The simulation results show that the theoretical analysis is correct.

Key words: passive location, time delay

1 引言

被动定位就是用多个接收基元组成的几何阵形检测来自目标的辐射噪声,从波阵面的曲率变化获取目标方位、距离等参数的估计,其基本观测量是时延——声波抵达各基元的时间差。由于时延测量中噪声的影响,被动定位实现起来比较困难,特别是其中的测距问题一直未得到很好的解决。传统的被动测距系统大都采用的是线列阵^[1~3],从其测距性能分析可知,距离估计方差不但与时延估计方差和基阵孔径有关,还与目标所处的方位有很大关系,当目标位于线阵的端射方向时,线阵将失去测距能力。从 M 元平面阵

结构最佳参数估计理论^[4]可知,选择合适的几何阵形,不但可消除目标方位变化对测距精度的影响,还可抑制时延估计方差对测距性能的影响。本文提出的圆周阵被动定位方法在上述两个方面都显示出较好的特性,所推导出的测距、测向公式简单、合理而有效。

本文就圆周阵定位的方法、原理及其性能进行了理论分析。通过计算机仿真验证了理论分析结果,并就这种方法的工程可实现性作了初步探讨。

2 定位方法

2.1 阵形结构

如图 1 所示,有 M 个接收基元(M 为偶

收稿日期: 95-4-8; 修回日期: 95-12-13

数) 均匀对称地分布在一个圆周上, 另有一基元 H_0 置于圆心。以圆心为坐标原点, 建立坐标系。已知圆周上各基元到圆心处基元的间距等于圆的半径 r 。目标 S 到圆心的距离为 R , 方位角为 α , 俯仰角为 θ 。基元 H_0 、 H_i 连线与目标位置矢量的夹角为 α_i 。

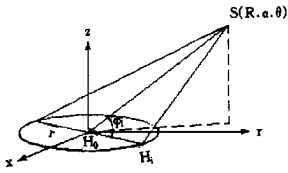


图 1 圆周阵结构示意图

2.2 定位原理

图 1 中, 目标声源的辐射声波传播到第 i 号基元和圆心处第 0 号基元间的声程差可用时延量和声速的乘积表示。若声波以球面波方式在介质中传播, 则由几何关系可知第 i 号基元与圆心处基元间的时延差 τ_i 满足如下的关系式^[5]:

$$\frac{c \tau_i}{r} = \frac{r^2 - c^2 \tau_i^2}{2Rr} + \cos \alpha_i \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

式中, c 为声波在介质中传播的速度, M 为圆周上的基元总数 (M 为偶数)。在上式两边时延量 τ_i 求和, 则得到下列关系式:

$$\frac{c}{r} \sum_{i=1}^M \tau_i = \frac{Mr^2 - c^2 \sum_{i=1}^M \tau_i^2}{2Rr} + \sum_{i=1}^M \cos \alpha_i \quad (2)$$

因阵元分布的对称性, 第 i 个基元、第 $i + M/2$ 个基元与圆心处基元在一条直线上, x 、 y 平面内有 $M/2$ 个这样的三元线阵, 则有:

$$\cos \alpha_i + \cos \alpha_{i+M/2} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, M/2) \quad (3)$$

故(2)式中 $\sum_{i=1}^M \cos \alpha_i = 0$, 则距离 R 为:

$$R = \frac{Mr^2 - c^2 \sum_{i=1}^M \tau_i^2}{2c \sum_{i=1}^M \tau_i} \quad (4)$$

下面的理论分析表明, 圆周阵采用上述测距公式时, 距离估计方差与目标方位无关。这是圆周阵测距的一个明显的优越性。此外, (4) 式还具有简单、明了, 便于实时处理的特点。

若圆周上的基元关于圆心均匀对称分布, 入射声波为平面波, 位于 x 轴上的基元的时延量记为 τ_1 , 位于 y 轴上的基元的时延量记为 $\tau_{1+M/4}$, 则根据线阵测向方法, 有:

$$\cos \alpha_x = c \tau_1 / r \quad (5)$$

$$\cos \alpha_y = c \tau_{1+M/4} / r \quad (6)$$

其中 $\cos \alpha_x$ 、 $\cos \alpha_y$ 分别为 x 、 y 方向的方向余弦。再根据三角关系和几何关系可得:

$$\cos \theta = \pm [r^2 - (c \tau_1)^2 - (c \tau_{1+M/4})^2]^{1/2} / r \quad (7)$$

$$\cos \theta = 1 / [1^2 + \tau_{1+M/4}^2]^{1/2} \quad (8)$$

由(7)、(8)两式可确定目标的方位角和俯仰角。(7)式中符号按如下方式选取: 当目标位于阵平面上方时, 取正号; 反之取负号。也可采用其它方法使圆周阵上的所有基元全部参加测向, 但计算要复杂得多。结合式(4)、(7)和(8)便可实现目标的全方位定位和跟踪。

2.3 定位性能分析

圆周阵的布阵方式决定了其测距和测向之间不会有耦合^[4], 联合测距和测向时的方位、距离方差与单纯测向、测距时的方差相等。其中测向方差很容易由最大似然(ML)估计的传递性得到^[4], 这里仅给出测距方差分析。若圆周阵各基元的噪声不相关, 各基元相对于圆心处基元的时延 $\{\tau_i, i = 1, 2, \dots, M\}$ 由 M 个相互独立的 ML 时延估计器得到, 估计方差为 σ^2 , 时延测量中的噪声均服从零均值高斯分布, 则对 M 个时延的线性联合估计 $c = \sum_{i=1}^M \tau_i$ 是有效无偏估计, 其方差的 $C-R$ 下界为^[8]:

$$\sigma_c^2 \geq M^{-2} \quad (9)$$

又当 $R = r$ 时, 由(1)式得:

$$\tau_i = \frac{r}{c} \cos \alpha_i + \frac{r}{2Rc} \sin^2 \alpha_i \quad (10)$$

对上述 τ_i 求和, 由于 $\sum_{i=1}^M \cos \alpha_i = 0$, 有:

$$c = \frac{M}{i=1} \frac{r^2}{2Rc} \frac{M}{i=1} \sin^2 \theta_i \quad (11)$$

其方差的 $C-R$ 界由 (9) 式确定。利用 ML 估计的传递性^[4]，由 (11) 式可得到距离 R 的 ML 估计方差下界为：

$$\sigma_R^2 \geq \frac{4R^4 c^2}{r^4 \left(\sum_{i=1}^M \sin^2 \theta_i \right)^2} \quad (12)$$

由于圆周阵各基元的对称分布，当 M 为大于 4 的偶数时，下式成立：

$$\sum_{i=1}^M \sin^2 \theta_i = M(1 - \sin^2 \theta / 2) \quad (13)$$

利用 (9) 和 (13) 式，(12) 式可简化为：

$$\sigma_R^2 \geq \frac{4R^4 c^2}{r^4 M(1 - \sin^2 \theta / 2)^2} \quad (14)$$

与三元线列阵的测距方差^[5]相比，(14) 式完全消除了目标方位因子 $\sin \theta$ 对测距性能的影响。且当基阵孔径一定时，适当增加圆周阵的基元数，可提高系统测距精度。此外，(14) 式还表明目标位于圆周阵的法线方向， $\theta = 0^\circ$ 时，测距效果最好；而目标与阵处于同一平面时，测距效果最差。

3. 模拟结果

下面通过计算机模拟验证上述理论分析结果，并与线阵及球面内插算法^[9]比较，同时就圆周阵有关参数的选取作初步探讨。

图 2 给出了线阵、圆周阵相对测距误差随目标方位 θ 的变化情况。二者的孔径相同，均为 6m，时延估计方差为 1 s，距离 500m。为简单起见，设目标与基阵在同一平面。很明显圆周阵的测距误差基本上不随目标方位变化，而线阵则随着目标方位趋于阵的端射方向，测距误差急剧增大。此外，8 基元圆周阵的测距精度与线阵在正横方向的测距精度相接近，这与理论分析结果相符。理论上当 $\theta = 90^\circ$ ， $M = 8$ 时，(14) 式给出的圆周阵的测距方差与线阵的测距方差^[5]相等。图 2 中还给出了 $M = 16, 32$ 时，圆周阵在不同方位的测距误差。与 $M = 8$ 相比，前者测距误差约减小了

0.707 倍，后者减小了 1 倍。

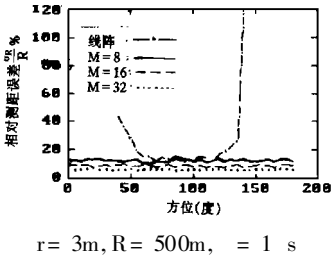


图 2 线阵与圆阵在不同方位的相对测距误差

采用平面圆周阵定位时，目标的距离和方位可以利用上面介绍的圆阵算法进行解算，也可以由球面内插法^[9]得到。图 3(a) ~ (d) 比较了两种算法的性能。基阵半径取 4m，圆周上放置 32 个基元，时延估计方差为 2 s，距离 1000m，目标仍与基阵处于同一平面。由图可见，就测距方差而言，圆阵算法与球面内插法相当，但前者的测距偏差远小于后者。显然，球面内插法有抑制方差的作用，但牺牲了偏差；就测向而言，球面内插法由于 32 个基元全部参加定向，方位测量的偏差和方差小于圆阵算法，但圆阵算法的测向精度也能满足一般定位跟踪的要求，且相对于测距而言，测向精度受时延方差的影响小。更主要的是，平面圆周阵采用球面内插算法只能测定目标的水平距离和方位，如要测斜距，还

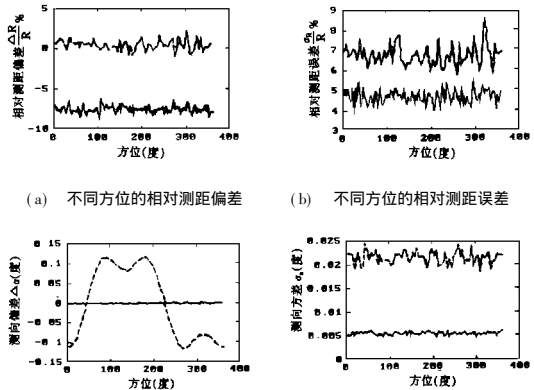
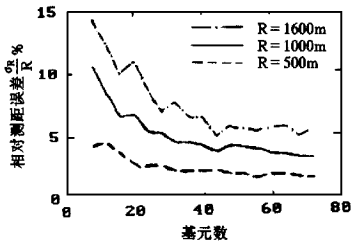


图 3 圆阵算法与球面内插算法的性能比较

需要垂直方向增加一个基元, 构成三维立体阵, 这种阵结构实现起来比较困难。此外, 球面内插法涉及到大量的矩阵运算。

图 4 是不同距离处, 基元数变化对测距误差的影响。基阵半径取 4m, 时延估计方差为 1 s, 目标的方位角为 30°, 俯仰角为 50°。基元数从 $M = 8$ 开始按 4 的倍数增加。由图可见, 无论距离远近, 当基元数增加到一定值时, 测距精度的改善都变得不明显, 特别是远距离。这是由于基阵孔径限制了定位性能。因此, 孔径给定的情况下, 只能适当增加基元数, 提高定位精度。



$r = 4\text{m}, \sigma = 1\text{ s}, \alpha = 30^\circ, \beta = 50^\circ$

图 4 圆阵基元数不同时的测距误差

4. 结束语

以上介绍了采用圆周阵进行被动定位的原理和方法。利用本文所介绍的圆阵算法可直接给出目标的斜距和方位, 当目标相对于阵平面的位置已知时, 还可进一步确定目标的俯仰角。由于圆周阵的结构对称性, 测距精度与目标所处方位无关, 可有效地实现对运动目标的全方位跟踪。理论分析和计算机仿真结果表明, 8 基元的圆周阵即可在各个方

位达到相同孔径的线阵的最佳测距精度。在此基础上基元数增加 n 倍, 测距方差则减少 $\frac{1}{n}$ 倍, 不过孔径给定的情况下, 只能适当增加基元数, 提高定位精度。与球面内插法相比, 圆阵算法具有简单、实用的特点。

参 考 文 献

1. Richard. I. Moose. Passive rang estimation of an underwater manervng target. IEEE Trans. on ASSP-35(1987), 274 ~ 285
2. Hassab. J. C. Guimond. Estimation of location and motion parameters of moving source observed from a liner array. J. Acoust. Soc. Am., 70 (1981), 1054 ~ 1061
3. Allen, M. R. An adaptive two stage Kalman structure for passive undersea tracking. IEEE Trans. on ASSP-36(1988), 4 ~ 9
4. 郑兆宁, 向大威. 水声信息被动检测与参数估计理论. 科学出版社, 1983
5. 李启虎. 声呐信号处理引论. 海洋出版社, 1985
6. A. H. Quazi. An Overview on the time delay estimate in active and passive systimes for target localization. IEEE Trans. on ASSP1981; 29: 527 ~ 533
7. 侯自强, 李贵斌. 声呐信号处理—原理与设备. 海洋出版社, 1986
8. 凌福根译. 随机数据分析方法. 国防工业出版社, 1976
9. Julius O. and Jonathan S. Abel. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements. IEEE Trans. on ASSP, 1987; 35: 1661 ~ 1669