

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.11.006

引用格式:宋文彬,马霞.多站测向定位新算法[J].电讯技术,2014,54(11):1488-1492.[SONG Wen-bin,MA Xia.A New Target Location Algorithm with Bearing-only Measurements[J].Telecommunication Engineering,2014,54(11):1488-1492.]

多站测向定位新算法*

宋文彬**,马霞

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:无源测向定位在信息对抗、导航等领域应用非常广泛。针对如何充分使用同时获得的多站测向数据,提出由两站向多站逐渐递推的目标定位新方法。仿真结果表明,最终定位精度得到了提高,给出的协方差能够真实反映目标的分布概率,新方法具有一定的工程应用价值。

关键词:多站;测向定位;协方差矩阵;数据融合

中图分类号:TN953.7 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2014)11-1488-05

A New Target Location Algorithm with Bearing-only Measurements

SONG Wen-bin,MA Xia

(Southwest China Institute of Electronic Technology,Chengdu 610036,China)

Abstract:Passive direction finding(DF) of emitter source is widely applied in the fields of information countermeasure,navigation,etc. Aiming at the problem of how to use the simultaneous DF data of many stations fully,a new recursive algorithm for passive target location with bearing-only measurements is proposed. The simulation results show that the location precision is enhanced and the given covariance can reflect the true statistical distribution of the target position. Therefore the proposed algorithm deserves to be put into practice for an engineering application.

Key words:multi-sensor;passive DOA location;covariance matrix;data fusion

1 引言

测向定位是一种非常典型的无源定位手段,它因具有接收隐蔽、抗干扰能力强、工程上易于实现等优点而广泛应用于实际定位中。对于由若干个配置在不同位置台站组成的测向网,每个观测站因为可观测性不好通常单独很难对目标进行准确定位^[1],往往设置一个中心站根据多个测向站报来的测向数据在地图上进行交会定位及定位误差分析。传统的算法很少考虑测向误差等因素对交会结果的影响,将各站返回的数据等同对待,如针对三站测向定位刘嘉佳等^[2]提出将交会出的三角形的内切圆圆心

作为定位结果,也有的是用三角形中线交点,或者 Steiner 点作为定位结果;如果是多于三站,则每次用 3 条线,再用另外 3 条线进行定位或者是计算多边形的质心,还有就是采用 Pages-Zamora 最小二乘定位法解伪线性超定方程,或者是 Brown 最小二乘定位法假定目标位置至各方位线垂直距离的平方和最小(如徐济仁等^[3])等。还有一类研究得比较多的算法考虑了测向误差等因素的影响,如 EKF 滤波^[4]、UKF 滤波^[5],以及神经网络法^[6]等,其基本思想就是在测向时间同步的基础上要求目标状态的一步预测维持不变。本文以多站无源组网为背景,研

* 收稿日期:2014-06-11;修回日期:2014-08-25 Received date:2014-06-11;Revised date:2014-08-25

** 通讯作者:wbsong@spaceweather.ac.cn Corresponding author:wbsong@spaceweather.ac.cn

• 1488 •

究在协同跟踪的情况下,对来自于同一目标的所有测向数据进行集中式融合的方法,用来提高对目标的定位和跟踪精度,并通过仿真分析来说明本文研究的有效性和可行性。

2 测向定位方法

图 1 为三站测向定位示意图。

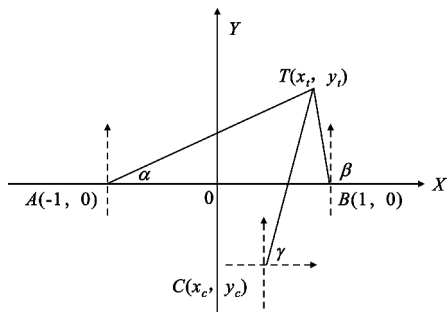


图 1 三站测向定位示意图

Fig. 1 Diagram of cross location with three stations

为简单起见,我们讨论二维三站测向定位情形,任选其中两站,将其连线的中点处作为原点,连线作为 X 轴,建立直角坐标系。如图 1 所示,观测站 $A(-l,0)$ ($l>0$)、观测站 $B(l,0)$ 、观测站 $C(x_c,y_c)$ 共同量测目标 $T(x_t,y_t)$ 。设 A、B、C 三站量测的方位角及标准差分别为 (α,σ_α) 、 (β,σ_β) 、 (γ,σ_γ) , ($0\leq\alpha,\beta,\gamma<2\pi$), 先利用 A、B 两站交叉定位得到目标 T 的位置 (x'_t,y'_t) 及协方差 P'_t 为^[7]

$$x'_t=\frac{\tan\alpha+\tan\beta}{\tan\beta-\tan\alpha}l,y'_t=\frac{2\tan\alpha\tan\beta}{\tan\beta-\tan\alpha}l \tag{1}$$

$$P'_t=\begin{bmatrix} \delta'^2_x & \delta'_{xy} \\ \delta'_{yx} & \delta'^2_y \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中

$$\delta'^2_x=\frac{4l^2}{(\tan\beta-\tan\alpha)^4}(\tan^2\beta\sec^4\alpha\sigma_\alpha^2+\tan^2\alpha\sec^4\beta\sigma_\beta^2);$$

$$\delta'^2_y=\frac{4l^2}{(\tan\beta-\tan\alpha)^4}(\tan^4\beta\sec^4\alpha\sigma_\alpha^2+\tan^4\alpha\sec^4\beta\sigma_\beta^2);$$

$$\delta'_{xy}=\delta'_{yx}=\frac{4l^2}{(\tan\beta-\tan\alpha)^4}(\tan^3\beta\sec^4\alpha\sigma_\alpha^2+\tan^3\alpha\sec^4\beta\sigma_\beta^2)。$$

2.1 位置计算

下面介绍怎样将观测站 C 的量测结果 (γ,σ_γ) 与由观测站 A、B 共同确定的目标 T 的位置 (x'_t,y'_t) 及协方差 P'_t 进行融合处理。

(1) 计算位置 $T(x'_t,y'_t)$ 相对观测站 $C(x_c,y_c)$ 的方位角 γ' :

$$\gamma'=\begin{cases} \arctan\frac{y'_t-y_c}{x'_t-x_c}(x'_t>x_c,y'_t\geq y_c) \\ 2\pi+\arctan\frac{y'_t-y_c}{x'_t-x_c}(x'_t>x_c,y'_t<y_c) \\ \pi+\arctan\frac{y'_t-y_c}{x'_t-x_c}(x'_t<x_c) \end{cases} \tag{3}$$

(2) 计算方位角 γ' 的不确定幅度 $\sigma_{\gamma'}$ 。它由协方差 P'_t 代表的椭圆长轴 z 除以位置 $T(x'_t,y'_t)$ 至观测站 $C(x_c,y_c)$ 的距离 r_c 得出^[7]

$$\sigma_{\gamma'}=\sqrt{z}/r_c \tag{4}$$

其中 $z=\frac{(\delta'^2_x+\delta'^2_y)+\sqrt{(\delta'^2_x-\delta'^2_y)^2+4\delta'^2_{xy}}}{2}$, $r_c=\sqrt{(x'_t-x_c)^2+(y'_t-y_c)^2}$ 。公式(4)的含义是将原交叉定位求得的误差椭圆视作为半径为其长轴长度的正圆,如此就可以忽略协方差转至新坐标系下互协方差不为零的影响;

(3) 将方位角 γ' 与观测站 C 的量测方位角 γ 进行加权融合,得出目标 T 相对观测站 C 的新的方位角 γ'' :

$$\gamma''=\frac{\sigma_{\gamma'}^2}{\sigma_{\gamma'}^2+\sigma_\gamma^2}\gamma+\frac{\sigma_\gamma^2}{\sigma_{\gamma'}^2+\sigma_\gamma^2}\gamma' \tag{5}$$

(4) 构造目标位置 1 的坐标向量 X_1 及其协方差 P_1 与目标位置 2 的坐标向量 X_2 及其协方差 P_2 。位置 1 即为由观测站 A、B 共同确定的目标 T 的位置,有

$$\begin{cases} X_1=[x'_t & y'_t]^T \\ P_1=P'_t \end{cases} \tag{6}$$

位置 2 为参考位置 1 融入观测站 C 的量测得出的新位置,有坐标向量

$$X_2=[x''_t & y''_t]^T \tag{7}$$

其中, $x''_t=x_c+r_c\cos\gamma''$, $y''_t=y_c+r_c\sin\gamma''$; 以及协方差

$$P_2=\begin{bmatrix} \cos^2\gamma''\cdot z+\sin^2\gamma''\cdot\frac{r_c^2\sigma_{\gamma'}^2\sigma_\gamma^2}{\sigma_{\gamma'}^2+\sigma_\gamma^2} & \sin\gamma''\cos\gamma''\cdot\left(z-\frac{r_c^2\sigma_{\gamma'}^2\sigma_\gamma^2}{\sigma_{\gamma'}^2+\sigma_\gamma^2}\right) \\ \sin\gamma''\cos\gamma''\cdot\left(z-\frac{r_c^2\sigma_{\gamma'}^2\sigma_\gamma^2}{\sigma_{\gamma'}^2+\sigma_\gamma^2}\right) & \sin^2\gamma''\cdot z+\cos^2\gamma''\cdot\frac{r_c^2\sigma_{\gamma'}^2\sigma_\gamma^2}{\sigma_{\gamma'}^2+\sigma_\gamma^2} \end{bmatrix} \tag{8}$$

(5) 最后融合估计的目标位置向量 X_T 为位置 1 和位置 2 的协方差加权结果,即

$$X_T = [x_i \quad y_i]^T = P_1 (P_1 + P_2)^{-1} X_2 + P_2 (P_1 + P_2)^{-1} X_1$$

(9)

2.2 协方差计算

对于公式(9)中最终位置估计 X_T 的协方差的计算不能直接使用如下简单凸组合式子:

$$P_1 (P_1 + P_2)^{-1} P_2$$

(10)

这是因为按照 2.1 小节的步骤,位置 2 的得来参考了位置 1,它们之间是互相关的,即互协方差不为零,正确协方差求解应采用如下形式:

$$P_1 - (P_1 - P_{12})(P_1 + P_2 - P_{12} - P_{21})^{-1}(P_1 - P_{21})$$

(11)

其中 P_{12} 、 P_{21} 为 P_1 与 P_2 之间的互协方差。为了避免求解互协方差的繁琐过程,本文采用一种近似的方法。假设观测站 C 能够测量目标 T 的距离,测量结果的中心是 r_c ,标准差为 $k\sqrt{z}$, k 为调节系数。当 k 取值很大时,这里我们要求 $k \geq 100$,即距离量测精度非常差,它的信息对融合结果是没有贡献的。由此我们构造了一个与协方差 P_1 基本相互独立的协方差 P_3 :

$$P_3 = \begin{bmatrix} \cos^2 \gamma \cdot k^2 z + \sin^2 \gamma \cdot r_c^2 \sigma_\gamma^2 & \sin \gamma \cos \gamma \cdot (k^2 z - r_c^2 \sigma_\gamma^2) \\ \sin \gamma \cos \gamma \cdot (k^2 z - r_c^2 \sigma_\gamma^2) & \sin^2 \gamma \cdot k^2 z + \cos^2 \gamma \cdot r_c^2 \sigma_\gamma^2 \end{bmatrix}$$

(12)

再使用公式(10)计算得出 X_T 的近似协方差 P_T ,即

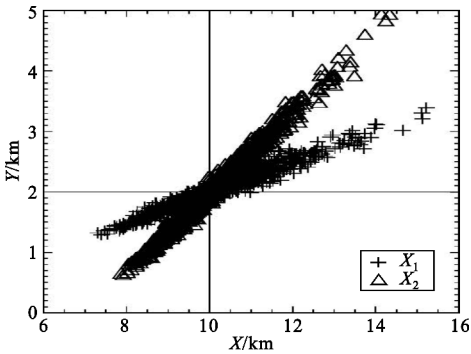
$$P_T = P_1 (P_1 + P_3)^{-1} P_3$$

(13)

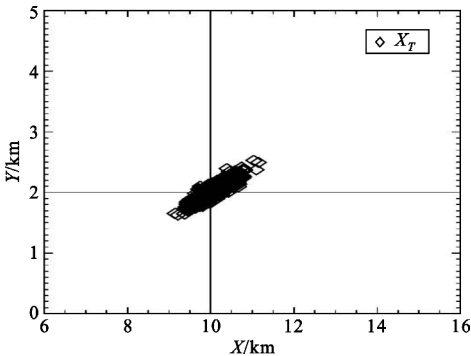
3 仿真试验

仿真试验的参数设置如下。 A 、 B 、 C 3 个台站的地理位置分别为 $(-3, 0)$ 、 $(3, 0)$ 和 $(4, -2)$,目标 T 的真实位置为 $(10, 2)$,以上 A 、 B 、 C 3 站位置坐标的单位均为 km,通过计算得目标相对 3 个台站所在真实方位角分别为 8.74° 、 15.94° 和 33.69° ;三站测向的精度均为 0.6° ,即 $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = \sigma_\gamma \approx 0.01 \text{ rad}$ 。蒙特卡罗仿真 1 000 个时刻,每个时刻 3 个台站对目标 T 各测向 1 次,共测量 1 000 次。图 2(a) 给出了 1 000 个时刻在 2.1 小节(4)中描述的目标位置向量 X_1 (见加号符号)和 X_2 (见三角形符号),其中 X_1 为每拍利用观测站 A 和观测站 B 的量测结果进行联立方程解出的目标分布, X_2 为每拍参照 X_1 的位置融进观测站 C 的量测结果得出的目标分布;图 2(b)

则给出利用公式(9)得出的三站最终融合的目标点迹 X_T (见菱形符号)。通过左右图的对比,可以发现融合观测站 C 的量测结果后,目标分布更加集中在其真实位置附近,说明本文提出的位置计算方法切实有效。



(a) 目标点迹 X_1 与 X_2



(b) 目标点迹 X_T

图 2 目标点迹仿真结果

Fig. 2 The simulated targets' positions

图 3(a) ~ (c) 分别描述的是仿真 1 000 次计算得到的协方差矩阵 P_T 的左上角、右下角和右上角元素的值(左下角元素值与右上角元素值相等,这里我们取 $k = 100$),它们的波动是因为 3 个观测站每拍的量测值不断变化造成的。图中的水平粗线是统计出的平均值,分别为 78 241.4, 15 886.0 和 31 456.1。依据协方差的定义,我们将图 2(b) 中的 1 000 个目标点迹 $X_T(x_i, y_i)$ 做如下统计:

$$\delta_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

(14)

$$\delta_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

(15)

$$\delta_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

(16)

其中 $n = 1\,000$, 所得结果分别为 80 075.9, 16 829.9

和33 044.4。可见它们与图 3 所示曲线的平均值差距均在 10% 以内,因此充分说明了本文提出的协方差计算方法也是有效的。

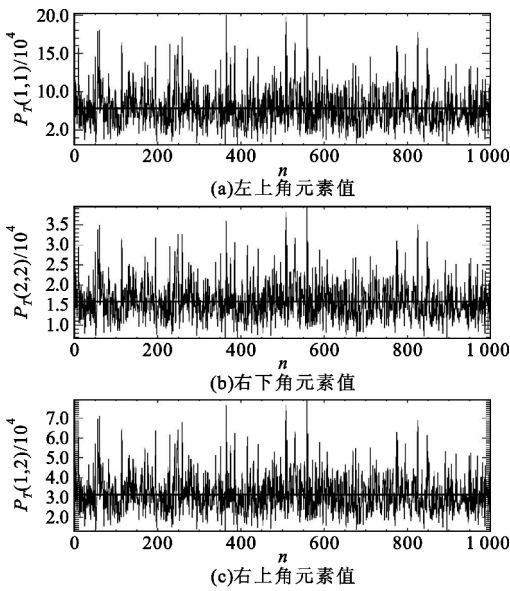


图 3 协方差矩阵 P_T 各元素值

Fig. 3 The plots of the covariance P_T matrix elements

为了比较不同算法的定位精度,我们采用三角形内心法^[2]和 Pages–Zamora 最小二乘定位法分别对以上仿真数据进行重新定位,并计算最终定位结果的 GDOP 值($\sqrt{\delta_x^2+\delta_y^2}$),如表 1 所示。可见本文方法得到的定位精度要好于最小二乘定位法,显著好于三角形内心法。我们认为三角形内心因受三角形形状的影响非常大,所以精度最差;最小二乘法同时受站点位置和测向数据影响,可能因没有考虑每个站的量测精度信息,所以性能没有本文所提的方法好。

表 1 3 种算法的定位误差			
Table 1 The location precision of three algorithms			
定位方法	δ_x/m	δ_y/m	GDOP 值/m
本文方法	283.0	129.7	311.3
三角形内心法	513.9	176.0	543.2
最小二乘定位法	307.0	147.7	340.7

4 结束语

本文提出了一种三站测向定位求取融合位置及其协方差的新方法,经仿真验证,该方法能较好地得出高精度的融合位置和表征真实统计意义的协方

差。同时它能较容易地扩展应用至存在超过三站的情形。例如,从 N 个站扩展至 $N+1$ 个站,可将前 N 站的融合位置及协方差看作第 2 节中的 (x'_i, y'_i) 和 P'_i ,将第 $N+1$ 站的量测结果看作是第 2 节中观测站 C 的量测结果 (γ, σ_γ) ,采用文中给出的步骤进行处理,得出 $N+1$ 个站更新的融合位置及协方差。以这种递推的形式,我们的方法能够适用于任意多站的情形。与文献[8]所述的雷达与异站测向数据融合方法相比,这里是用一个外接圆去套初始定位的误差椭圆,充分利用了圆的形状不受坐标系平移和旋转的影响这个特征;而文献[8]用的是误差椭圆长短轴在新坐标系坐标轴的垂直投影,由该方法得出结果的协方差计算比较繁琐,很难进行递推处理。另外,所提方法还有一个优点就是在双站定位向多站定位的递推过程中,没有任何求解方程的步骤,这为计算带来了便利。测向定位实用范围很广,我们相信文中所提方法在军用和民用方面都具有非常重要的应用价值(如果输入没有给明测向传感器准确的量测标准差,则建议所有站点使用统一固定的一个值进行计算,这个值可以是任意值)。

参考文献:

[1] Nordone S, Lindgren A. Fundamental properties and performance of conventional bearings only target motion analysis[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1984, 29(9):775–787.

[2] 刘嘉佳,龚晓峰,杨建军,等. 基于测向定位的算法研究[J]. 现代电子技术, 2004, 27(4):49–51.
LIU Jia-jia, GONG Xiao-feng, YANG Jian-jun, et al. Algorithm research based on DF and location [J]. Modern Electronic Technology, 2004, 27(4):49–51. (in Chinese)

[3] 徐济仁,薛磊. 最小二乘方法用于多站测向定位的算法[J]. 电波科学学报, 2001, 16(2):227–230.
XU Ji-Ren, XUE Lei. LS algorithm used in DF and location [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(2):227–230. (in Chinese)

[4] Song T, Speyer J. A stochastic analysis of a modified gain extended Kalman filter with application to estimation with bearing-only measurement [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1985, 30(10):940–949.

[5] 李杰奇,张安,孔福. 多传感器测向定位方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(10):62–65.
LI Jie-qi, ZHANG An, KONG Fu. The study on bearing-only multi-sensor location method [J]. Fire Control &

- Command Control, 2009, 34(10): 62–65. (in Chinese)
- [6] 罗争, 张旻. 基于径向神经网络的空间目标测向定位算法[J]. 探测与控制学报, 2011, 33(3): 29–33.
- LUO Zheng, ZHANG Min. Spacial target bearing-only location algorithm based on RBF neural network [J]. Journal of Detection & Control, 2011, 33(3): 29–33. (in Chinese)
- [7] 宋文彬. 无源雷达协同定位精度分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(3): 294–297.
- SONG Wen-bin. The analysis of coordinated oositioning accuracy of passive radars [J]. Journal of China academy of Electronics and Information Technology, 2012, 7(3): 294–297. (in Chinese)
- [8] 宋文彬. 差异维度传感器数据融合新方法[J]. 电讯技术, 2013, 53(3): 28–32.
- SONG Wen-bin. A new data fusion algorithm for sensor measurements of different dimensions [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(3): 28–32. (in Chinese)

作者简介:



宋文彬(1981—), 男, 江西九江人, 2006 年获理学博士学位, 现为高级工程师, 主要研究方向为目标跟踪与数据融合;

SONG Wen-bin was born in Jiujiang, Jiangxi Province, in 1981. He received the Ph. D. degree in 2006. He is now a senior engineer. His research interests include targets tracking and data fusion.

Email: wbsong@spaceweather. ac. cn

马霞(1978—), 女, 山西忻州人, 2004 年于西安电子科技大学获硕士学位, 现为高级工程师, 主要研究方向为多传感器数据融合、多目标跟踪、组合导航等。

MA Xia was born in Xinzhou, Shanxi Province, in 1978. She received the M. S. degree from Xidian University in 2004. She is now a senior engineer. Her research interests include data fusion based on multiple sensors, multiple moving targets tracking and integrated navigation.