

无源测向测时差定位算法研究¹

陈 玲 李少洪

(北京航空航天大学电子工程系 北京 100083)

摘 要 该文首先给出了无源测向测时差定位算法, 然后对该算法的定位精度进行了分析. 通过仿真将该方法与无源测向交叉法和时差法进行了比较, 说明该方法是一种定位精度较高且对系统要求较低的无源定位方法, 具有实用价值.

关键词 无源定位, 定位精度, GDOP

中图分类号 TP873

1 前 言

现代战争对雷达探测系统提出了越来越高的要求, 不仅要求其具有较高的探测精度和快速的反应能力, 而且还要求其具有极强的“四抗”能力. 在这种情况下, 对于无源探测系统的研究就显得越来越重要.

目前无源定位技术按观测站的数目可分为两大类: 多站无源定位和单站无源定位技术. 相比较而言, 多站无源定位因其具有全方位、快速的优点而得到更为广泛的应用. 在多站无源定位技术中, 应用最广泛的两种方法是: 测向交叉无源定位法和时差无源定位法^[1-4]. 利用测向交叉法对三维目标定位仅需两个观测站, 系统对站间的时间同步要求不高, 但其缺点是定位误差较大, 在侧边区尤为明显. 而利用时差法对三维目标定位至少需要四个观测站, 该系统可获得较高的定位精度, 但其对各站间的时间同步要求较苛刻, 系统较复杂.

本文针对以上两种定位方法的特点, 给出了一种测向测时差无源定位算法, 该方法既可降低系统的复杂性又可保证较高的定位精度.

2 测向测时差定位算法

测向测时差定位系统可由一个主站和一个辅站构成. 一方面, 主站和辅站均可测得目标的方位角 ϕ_i 和俯仰角 ε_i . 另一方面, 主站还可测得辐射源信号到达两站的时间差 Δt , 由此可计算出辐射源信号到达两站的距离差 Δr . 从几何意义上说, 求解空间目标位置的过程即是求解 3 个曲面 (由 ϕ_i 确定的射平面、由 ε_i 确定的圆锥面以及由 Δr 确定的双曲面) 交点的过程.

假设主站 A 和辅站 B 的空间位置分别为: (x_0, y_0, z_0) 和 (x_1, y_1, z_1) , 辐射源 C 的空间位置为 (x, y, z) . 其几何关系如图 1 所示. 组合主站和辅站的各观测量, 可获得多组测量子集: $(\phi_0, \varepsilon_0, \Delta r)$, $(\phi_1, \varepsilon_1, \Delta r)$, $(\phi_0, \varepsilon_1, \Delta r)$, $(\phi_1, \varepsilon_0, \Delta r)$, $(\phi_0, \phi_1, \Delta r)$, 及 $(\varepsilon_0, \varepsilon_1, \Delta r)$ 等. 经仿真发现, 测量子集 $(\phi_0, \varepsilon_0, \Delta r)$ 及 $(\phi_1, \varepsilon_1, \Delta r)$ 的测量精度较高. 下面仅针对测量子集 $(\phi_0, \varepsilon_0, \Delta r)$ 给出空间目标位置解算公式.

由主站测得的观测量 ϕ_0, ε_0 及 Δr 不难得到观测方程:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \varepsilon_0 &= [(z - z_0)/(y - y_0)] \sin \phi_0 \\ \operatorname{tg} \phi_0 &= (y - y_0)/(x - x_0) \\ \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} &= \Delta r \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

¹ 2002-04-05 收到, 2002-07-29 改回

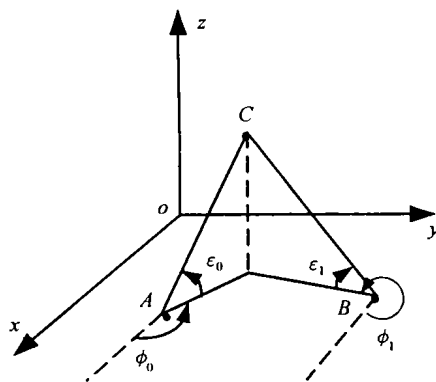


图 1 观测站与目标的分布图

将方程组变形, 可得到观测方程的矩阵形式:

$$X = A^{-1}F \quad (2)$$

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} 0, & \text{tg}\varepsilon_0 & -\sin\phi_0 \\ \text{tg}\phi_0 & -1 & 0 \\ x_0 - x_1 & y_0 - y_1 & z_0 - z_1 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} y_0 \text{tg}\varepsilon_0 - z_0 \sin\phi_0 \\ x_0 \text{tg}\phi_0 - y_0 \\ k + r_0 \cdot \Delta r \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$k = (1/2)[\Delta r^2 + (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2)]$$

(2) 式成立的条件是 $\text{rank}(A) = 3$, 即 A 为满秩矩阵。由 (2) 式求得的目标位置解与未知量 r_0 有关。但只要将含有未知量 r_0 的目标位置解代入 (3) 式就可求得 r_0 , 最终获得目标的位置解。

$$r_0 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (3)$$

此处, 仍存在定位模糊问题, 即目标位置解不唯一, 但经仿真发现, 只要布站合理, 模糊解的 z 分量通常为负值, 因此虚假点很容易去除。另外, 也可以通过增加辅站的方法来消除定位模糊。

3 定位精度分析

在无源定位中衡量定位精度的一个重要指标就是 GDOP(Geometric Dilution Of Precision) 值^[2]。它描述的是定位误差的三维几何分布, 其表达式为:

$$\text{GDOP} = \sqrt{P_{dx}(1,1) + P_{dx}(2,2) + P_{dx}(3,3)} = \sqrt{\text{tr}(P_{dx})}$$

式中 P_{dx} 为定位误差协方差矩阵。通过定位误差方程可求得定位误差协方差矩阵 P_{dx} 。

对方程组 (1) 式中各式变形、求微分可得到以下定位误差方程:

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_0 &= -\frac{(z - z_0) \cdot \cos\phi_0}{r_0^2} \cdot dx - \frac{(z - z_0) \cdot \sin\phi_0}{r_0^2} \cdot dy + \frac{\cos\varepsilon_0}{r_0} \cdot dz + k_{\varepsilon_0} \\ d\phi_0 &= -\frac{\sin^2\phi_0}{y - y_0} dx + \frac{\cos^2\phi_0}{x - x_0} dy + k_{\phi_0} \\ d(\Delta r) &= (c_{1x} - c_{0x})dx + (c_{1y} - c_{0y})dy + (c_{1z} - c_{0z})dz + (k_0 - k_1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} k_{\phi_0} &= \frac{\sin^2 \phi_0}{y - y_0} dx_0 - \frac{\cos^2 \phi_0}{x - x_0} dy_0; \\ k_{\varepsilon_0} &= \frac{(z - z_0) \cdot \cos \phi_0}{r_0^2} \cdot dx_0 + \frac{(z - z_0) \cdot \sin \phi_0}{r_0^2} \cdot dy_0 - \frac{\cos \varepsilon_0}{r_0} \cdot dz_0; \\ c_{ix} &= \frac{x - x_i}{r_i}, \quad c_{iy} = \frac{y - y_i}{r_i}, \quad c_{iz} = \frac{z - z_i}{r_i}; \\ k_i &= c_{ix} dx_i + c_{iy} dy_i + c_{iz} dz_i, \quad i = 0, 1 \end{aligned}$$

将 (4) 式表示成矢量矩阵形式:

$$dV = CdX + dX_s \quad (5)$$

其中, 观测误差矢量 $dV = [d\varepsilon_0 \ d\phi_0 \ d(\Delta r)]^T$, 目标位置误差矢量 $dX = [dx \ dy \ dz]^T$, 与站址误差有关的矢量: $dX_s = [k_{\varepsilon_0} \ k_{\phi_0} \ k_0 - k_1]^T$. 系数矩阵

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{(z-z_0)\cos\phi_0}{r_0^2} & -\frac{(z-z_0)\sin\phi_0}{r_0^2} & \frac{\cos\varepsilon_0}{r_0} \\ -\frac{\sin^2\phi_0}{y-y_0} & \frac{\cos^2\phi_0}{x-x_0} & 0 \\ c_{1x} - c_{0x} & c_{1y} - c_{0y} & c_{1z} - c_{0z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由 (5) 式可得目标位置误差矢量为

$$dX = C^{-1}[dV - dX_s] \quad (7)$$

相应的误差协方差矩阵为

$$P_{dx} = C^{-1}\{E[dVdV^T] + E[dX_s dX_s^T]\}C^{-T} \quad (8)$$

令 $E[dVdV^T] = \begin{bmatrix} \sigma_{\varepsilon_0}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\phi_0}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\Delta r}^2 \end{bmatrix}$ (8) 式经化简变形后, 可得

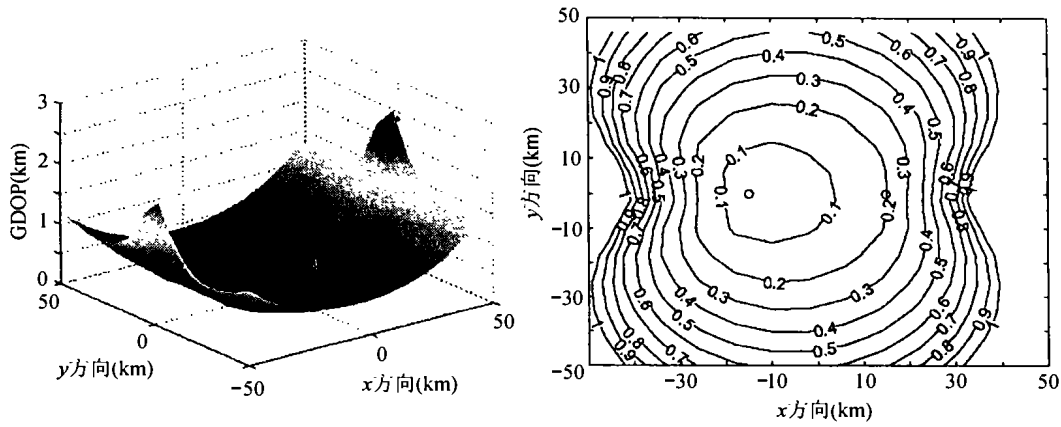
$$P_{dx} = C^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{\varepsilon_0}^2 + \frac{1}{r_0^2} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\phi_0}^2 + \frac{1}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\Delta r}^2 + 2 \end{bmatrix} C^{-T}$$

由此, 可得测量子集 $(\phi_0, \varepsilon_0, \Delta r)$ 所对应的 GDOP 值:

$$\text{GDOP} = \sqrt{P_{dx}(1,1) + P_{dx}(2,2) + P_{dx}(3,3)} = \sqrt{\text{tr}(P_{dx})}$$

4 仿真分析

下面通过仿真对测向测时差法、测向交叉法及时差法的定位精度进行比较。首先利用测向测时差法得到测量子集 $(\phi_0, \varepsilon_0, \Delta r)$ 所对应的 GDOP 三维分布图及等高线图, 如图 2 所示。具体仿真条件为: 测角误差 $\sigma_\varepsilon = \sigma_\phi = 3\text{mrad}$; 布站误差 $\sigma_s = 5\text{m}$; 测时误差 $\sigma_t = 20\text{ns}$; 目标

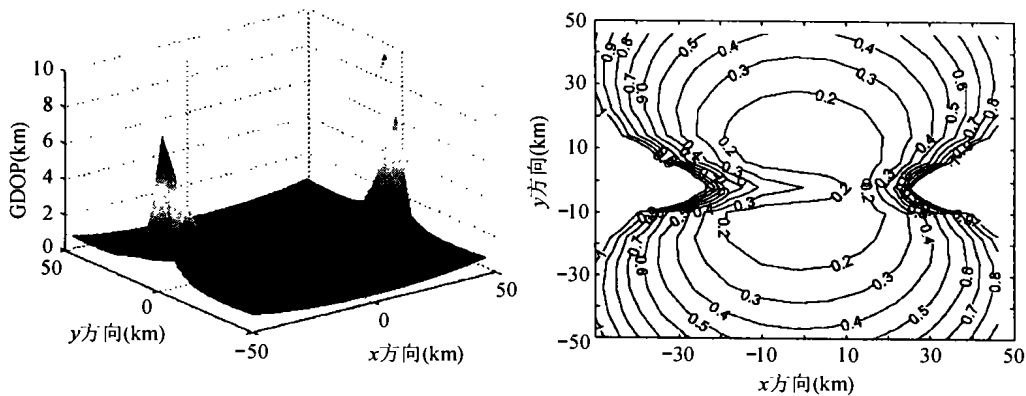


(a) GDOP 三维分布图 (b) GDOP 等高线图
 图 2 测向测时差法得到的测量子集 $(\phi_0, \varepsilon_0, \Delta r)$ 对应的 GDOP 分布图

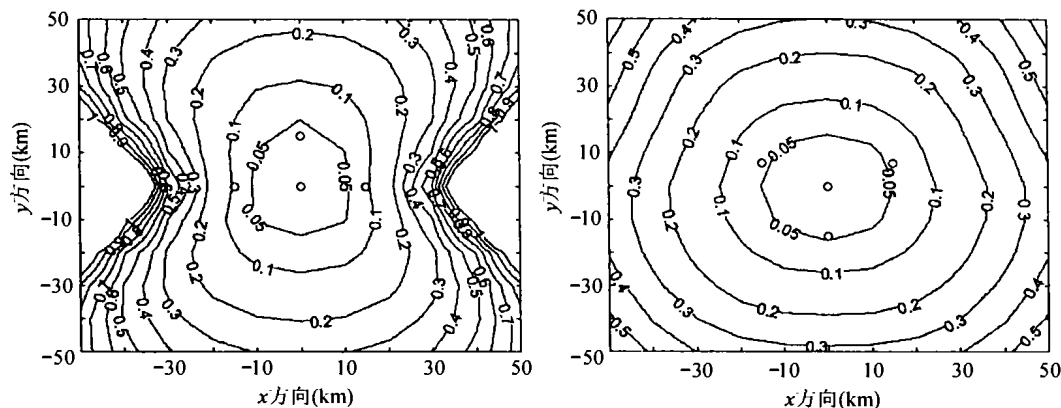
高度 $z = 10\text{km}$; 站址坐标为: 主站 $(-15\text{km}, 0, 0)$, 辅站 $(15\text{km}, 0, 0)$. 观测区域在 x, y 方向均为 $-50\text{km} \sim 50\text{km}$.

图 3 给出了利用测向交叉法所得到的 GDOP 分布图. 其测角误差、布站误差、目标高度、观测站的站址以及观测区域均与上述条件相同. 在测向交叉法中, 与其它测量子集相比, 测量子集 $(\phi_0, \varepsilon_0, \phi_1)$ 和 $(\phi_1, \varepsilon_1, \phi_0)$ 的定位精度较高, 因此这里仅给出测量子集 $(\phi_0, \varepsilon_0, \phi_1)$ 所对应的 GDOP 分布图.

经仿真发现, 在时差定位法中, 有两种布站方式可获得较高的定位精度, 即“T”型布站和“Y”型布站. 图 4 给出了这两种布站所对应的 GDOP 分布图. 该仿真的测时误差、布站误差、目标高度及观测区域均与图 2 的仿真相同. “T”型布站的站址坐标为: $(0, 0, 0), (-15, 0, 0.1), (15, 0, 0), (0, 15, 0)$. “Y”型布站的站址坐标为: $(0, 0, 0), (-15, 7, 0.1), (15, 7, 0.1), (0, -15, 0.1)$.



(a) GDOP 三维分布图 (b) GDOP 等高线图
 图 3 利用测向交叉法得到的测量子集 $(\phi_0, \varepsilon_0, \phi_1)$ 所对应的 GDOP 分布图



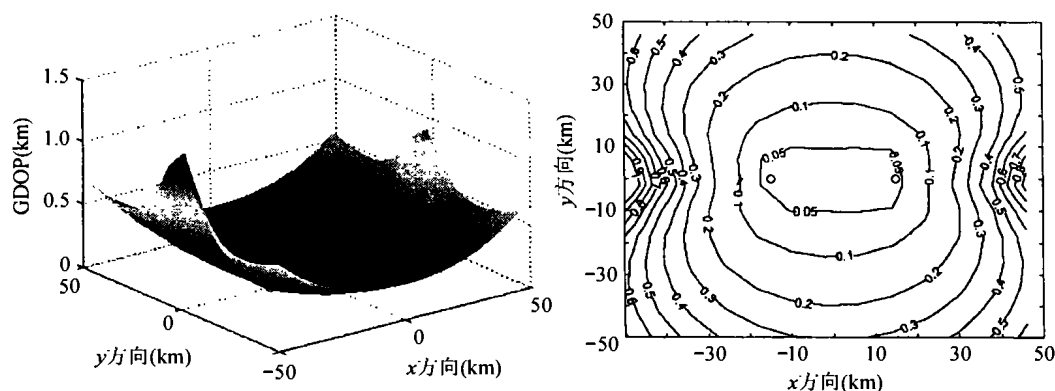
(a) T型布站的 GDOP 等高线图

(b) Y型布站的 GDOP 等高线图

图 4 利用时差法得到的 T 型和 Y 型布站的 GDOP 图

将图 2 与图 3、图 4 进行比较, 不难发现, 测向测时差法在基线区和侧边区内的定位精度明显高于测向交叉法; 在侧边区内的定位精度高于“T”型布站的时差法; 在宽边区内定位精度仅略低于后两者。总的定位性能不如“Y”型布站的时差法。

为了进一步提高测向测时差法的定位精度, 可将两组最优测量子集 $(\phi_0, \varepsilon_0, \Delta r)$ 和 $(\phi_1, \varepsilon_1, \Delta r)$ 所得到的目标位置解通过简化加权最小二乘法^[2]进行数据融合。两组测量子集融合后得到的 GDOP 分布图如图 5 所示。



(a) 两个测量子集融合后的 GDOP 三维图

(b) 两个测量子集融合后的 GDOP 等高线图

图 5 两测量子集融合后的 GDOP 值

比较图 2 与图 5 可见, 经数据融合后, 整个观测区域内 (基线区、宽边区及侧边区) 的定位精度均得到了进一步的提高, 尤其是宽边区的定位精度已高于“Y”型布站宽边区的定位精度。总的来说, 整个观测区域内的定位精度达到了较理想的水平。

5 结 论

测向测时差法是一种混合无源定位方法, 仿真结果说明它一方面在很大程度上改善了测向交叉定位法中侧边区定位精度低的缺点; 另一方面也避免了时差定位法中严格的站间同步要求。

该方法可在利用尽可能少的观测站、系统复杂性尽可能低的条件下, 获得较理想的定位精度。因此, 该无源定位方法具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- [1] 周一宇, 卢起中等, 多站无源定位及其信号处理技术, 雷达无源定位跟踪技术研讨会论文集, 北京, 2001, 53-59.
- [2] 孙仲康, 周一宇, 何黎星, 单多基地有源无源定位技术, 北京, 国防工业出版社, 1996, 117-131.
- [3] 何友, 王国宏等, 双多基地雷达的组合估计及定位精度分析, 电子学报, 2000, 28(3), 17-20.
- [4] K. Becker, An efficient method of passive emitter location, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(4), 1091-1104.

STUDY ON PASSIVE DOA JOINTED TOA LOCATION ALGORITHM

Chen Ling Li Shaohong

(Dept. of Electron. Eng., Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract This article presents a passive DOA jointed TOA location algorithm and the corresponding analysis of the location accuracy. A set of simulations are implemented to compare the DOA jointed TOA, DOA, and TOA location algorithm. Results show that the proposed algorithm has the best performance in terms of both location accuracy and system requirement. Overall speaking, it is a practical passive location method.

Key words Passive location, Location accuracy, GDOP

陈玲: 女, 1972年生, 博士生, 主要从事单/多基地无源定位与跟踪方面的研究工作。

李少洪: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 信号处理教研室主任, 主要从事雷达、信号与信息处理、检测、估计、多目标跟踪和目标识别等方面的研究工作。