

雷达组网中交叉定位误差校正算法

张平定¹, 张西川¹, 王明宇¹, 苏蓉²

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089)

摘要:论述了干扰条件下组网雷达交叉定位的解算模型, 并对其定位误差及分布进行了分析。针对各定位模型定位误差大、跳跃性强这一问题。依据数据融合理论建立了组网雷达定位误差的融合校正方法, 消除了定位误差跳跃性分布现象。仿真结果表明, 定位误差的融合校正模型扩大了组网雷达精确定位范围, 使雷达定位精度有了较大的提高。

关键词:交叉定位; 定位误差; 数据融合

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)06-0023-04

双基地制导雷达组网即是由相互独立的制导雷达通过组网使得整个系统构成一个有机的整体。从而改善雷达探测性能, 提高雷达测量精度。在网内雷达受到干扰的情况下, 通常只能测得干扰源位置相对于各站的角度参数, 而无法测得距离参数, 国内对干扰源的距离定位一般采用被动交叉定位方式, 在单站受到干扰无法测距的情况下, 由双基工作确定目标的距离, 送到中心站进行数据融合以提高精度, 再分送各个制导雷达用于射击诸元计算及制导。本文将对雷达组网中交叉定位误差标准算法进行研究。

1 双站交叉定位的几何解算算法

干扰条件下, 各站对目标只能测角, 目标的距离要依据已知角度信息解算得出。干扰目标与主站、副站位置的几何关系如图1所示。

图中 L 是双基距离, β_k 为主副站的基线方位角, 即副站在主站的站心极坐标系中的方位角。 β_1, ε_1 分别是副站的方位角与高低角, β_2, ε_2 是主站的方位角和高低角。对3个测量参数进行解算可得到目标相对于主站的距离 R_1 ^[1] 为

$$R_1 = f_{R_1}(\beta_1, \beta_2, \varepsilon_1) = \frac{L \sin(\beta_k - \beta_2)}{\sin(\beta_2 - \beta_1) \cos \varepsilon_1} \quad (1)$$

当 $\beta_2 = \beta_1$ 或 $\beta_2 = \beta_1 \pm \pi$ 时, 无解。

目标相对副站的距离 R_2 为

$$R_2 = f_{R_2}(\beta_1, \beta_2, \varepsilon_1) = \frac{L \sin(\beta_1 - \beta_k)}{\sin(\beta_2 - \beta_1) \cos \left[\arctan \left(\frac{\tan \varepsilon_1 \sin(\beta_2 - \beta_k)}{\sin(\beta_1 - \beta_k)} \right) \right]} \quad (2)$$

当 $\beta_2 = \beta_1$ 或 $\beta_2 = \beta_1 \pm \pi$ 或 $\beta_k = \beta_1$ 时, 无解。

同理, 任取 $\beta_1, \beta_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 中的3个已知角度, 得出求解 R_1, R_2 的另外3组公式^[1] 为

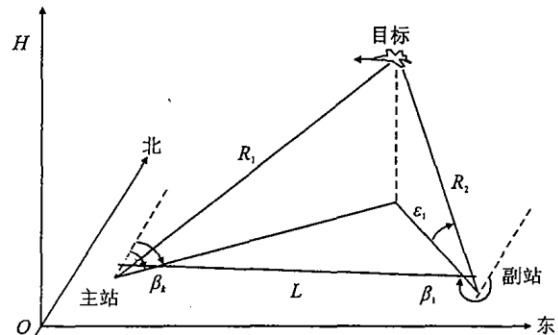


图1 交叉定位参数几何解算

收稿日期: 2006-12-12

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2006F18)

作者简介: 张平定(1949-), 男, 陕西三原人, 教授, 主要从事雷达系统, 雷达组网及信息融合技术研究。

$$f_{R_1}(\beta_1, \beta_2, \varepsilon_2) = \frac{L \sin(\beta_2 - \beta_k)}{\sin(\beta_2 - \beta_1) \cos \left[\arctan \left(\frac{\tan \varepsilon_2 \sin(\beta_1 - \beta_k)}{\sin(\beta_2 - \beta_k)} \right) \right]} \quad (3) \quad f_{R_2}(\beta_1, \beta_2, \varepsilon_2) = \frac{L \sin(\beta_1 - \beta_k)}{\sin(\beta_2 - \beta_1) \cos \varepsilon_2} \quad (4)$$

$$f_{R_1}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \beta_1) = \frac{L \sin \left[\arcsin \left(\frac{\sin(\beta_1 - \beta_k) \tan \varepsilon_2}{\tan \varepsilon_1} \right) \right]}{\sin \left[\beta_k - \beta_1 + \arcsin \left(\frac{\sin(\beta_1 - \beta_k) \tan \varepsilon_2}{\tan \varepsilon_1} \right) \right] \cos \varepsilon_1} \quad (5)$$

$$f_{R_2}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \beta_1) = \frac{L \sin(\beta_1 - \beta_k)}{\sin \left[\beta_k - \beta_1 + \arcsin \left(\frac{\sin(\beta_1 - \beta_k) \tan \varepsilon_2}{\tan \varepsilon_1} \right) \right] \cos \varepsilon_2} \quad (6)$$

$$f_{R_1}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \beta_2) = \frac{L \sin(\beta_2 - \beta_k)}{\sin \left[\beta_2 - \beta_k + \arcsin \left(\frac{\sin(\beta_2 - \beta_k) \tan \varepsilon_1}{\tan \varepsilon_2} \right) \right] \cos \varepsilon_1} \quad (7)$$

$$f_{R_2}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \beta_2) = \frac{L \sin \left[\arcsin \left(\frac{\sin(\beta_2 - \beta_k) \tan \varepsilon_1}{\tan \varepsilon_2} \right) \right]}{\sin \left[\beta_2 - \beta_k + \arcsin \left(\frac{\sin(\beta_2 - \beta_k) \tan \varepsilon_1}{\tan \varepsilon_2} \right) \right] \cos \varepsilon_2} \quad (8)$$

其中,当 $\beta_2 = \beta_1$ 或 $\beta_2 = \beta_1 \pm \pi$ 时,无解。

2 交叉定位的随机误差

由定位模型式(1) - (8)可知,取同一时刻主副站测量的 $\beta_1, \beta_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 中的任3个已知量都可确定目标距离 R_1, R_2 。但由于网络中各雷达随机误差不同,就使得式(1) - (8)各解算模型的定位误差随雷达分布的变化而变化。这就需要对组网情况下各解算模型的定位误差及分布进行研究,进而得出误差校正的方法。

根据文献[1]中对随机误差的分析结论,交叉定位的随机误差 $\sigma_{R_1}, \sigma_{R_2}$ 受方位角 β_1, β_2 和高低角 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 的随机误差 $\sigma_{\beta_1}, \sigma_{\beta_2}, \sigma_{\varepsilon_1}, \sigma_{\varepsilon_2}$ 的关联影响。

依据多随机因素影响下求解随机误差的相关理论^[1-3],可解得交叉定位的随机误差。由式(1)得距离 R_1 的随机误差计算式为(由于定位模型对 R_1, R_2 的求解相互对称,本文仅列出 R_1 的随机误差的求解过程)

$$\sigma_1(\beta_1, \beta_2, \varepsilon_1) = \sqrt{\left(\frac{\partial f_{R_1}}{\partial \beta_1} \right)^2 \sigma_{\beta_1}^2 + \left(\frac{\partial f_{R_1}}{\partial \beta_2} \right)^2 \sigma_{\beta_2}^2 + \left(\frac{\partial f_{R_1}}{\partial \varepsilon_1} \right)^2 \sigma_{\varepsilon_1}^2} \quad (9)$$

由式(1) f_{R_1} 对 $\beta_1, \beta_2, \varepsilon_1$ 的偏导为

$$\frac{\partial f_{R_1}}{\partial \beta_1} = \frac{L \sin(\beta_k - \beta_2) \cos(\beta_2 - \beta_1)}{\sin^2(\beta_2 - \beta_1) \cos \varepsilon_1} ; \quad \frac{\partial f_{R_1}}{\partial \varepsilon_1} = \frac{L \sin(\beta_k - \beta_2) \tan \varepsilon_1}{\sin(\beta_2 - \beta_1) \cos \varepsilon_1} ; \quad \frac{\partial f_{R_1}}{\partial \beta_2} = -\frac{L \sin(\beta_k - \beta_1)}{\sin^2(\beta_2 - \beta_1) \cos \varepsilon_1} \quad (10)$$

同理对式(3) - (7)中对应参数求偏导,可得各定位模型的偏导公式,进而求得各模型的随机误差 $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 。

由式(9) - (10)可知模型(1) - (8)的定位随机误差 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 是以 $\beta_1, \beta_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为参数的函数,即定位随机误差随目标位置变化而变化,定位随机误差依式(9)在空域中呈规律性分布。仿真条件下,随机误差 σ 在双基地雷达空域中的分布规律如图2(a)所示。同样 $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 也会分别呈现出不同的分布规律。

3 双站定位误差的校正

在定位误差的影响下, t 时刻对一个目标,模型(1) - (8)可解得4个不同的目标位置解。各位置解的精度又随各模型的定位误差不同而不同。依据式(9)定位随机误差在空间的分布,应用数据融合理论^[4-6]对4个模型定位随机误差 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 进行数据融合校正,使得 t 时刻目标位置解的误差达到最小。从而提高交叉定位的精度。主要采取的融合校正方法如下^[7-8]:

1) 主因素融合法。选取原则是对比空间某点的4个定位模型随机误差的大小,取定位随机误差值最小

的解算公式为当前目标点的定位模型,即

$$f_R(\cdot) = \min_{\text{对应}}[\sigma_1(\cdot), \sigma_2(\cdot), \sigma_3(\cdot), \sigma_4] \quad (11)$$

式中 $f_R(\cdot)$ 为最优的交叉定位算法。

2) 加权平均融合法。选取原则是以随机误差为加权系数,对4个模型解加权平均。随机误差和 $\delta = \sigma_1(\cdot) + \sigma_2(\cdot) + \sigma_3(\cdot) + \sigma_4$, 即得

$$f_R(\cdot) = \sum_{i=1}^4 \frac{\sigma_i(\cdot)}{\delta} f_i(\cdot) \quad (12)$$

式中 $f_R(\cdot)$ 为最优的交叉定位算法。

3) 混合融合法。当需要兼顾 R_1 和 R_2 的测量精度时,应当综合考虑 R_1 和 R_2 的误差分布。选取原则是依据实际中对 R_1 与 R_2 的侧重程度进行加权融合。令 $\delta'_i(\cdot) = w_1 \cdot \sigma_{iR_1}(\cdot) + w_2 \sigma_{iR_2}(\cdot)$, w_1, w_2 , 分别为对 R_1 与 R_2 的侧重权值, $\sigma_{iR_1}(\cdot) = \sigma_i$ 。即得

$$f_R(\cdot) = \min_{\text{对应}}[\delta'_1(\cdot), \delta'_2(\cdot), \delta'_3(\cdot), \delta'_4(\cdot)] \quad (13)$$

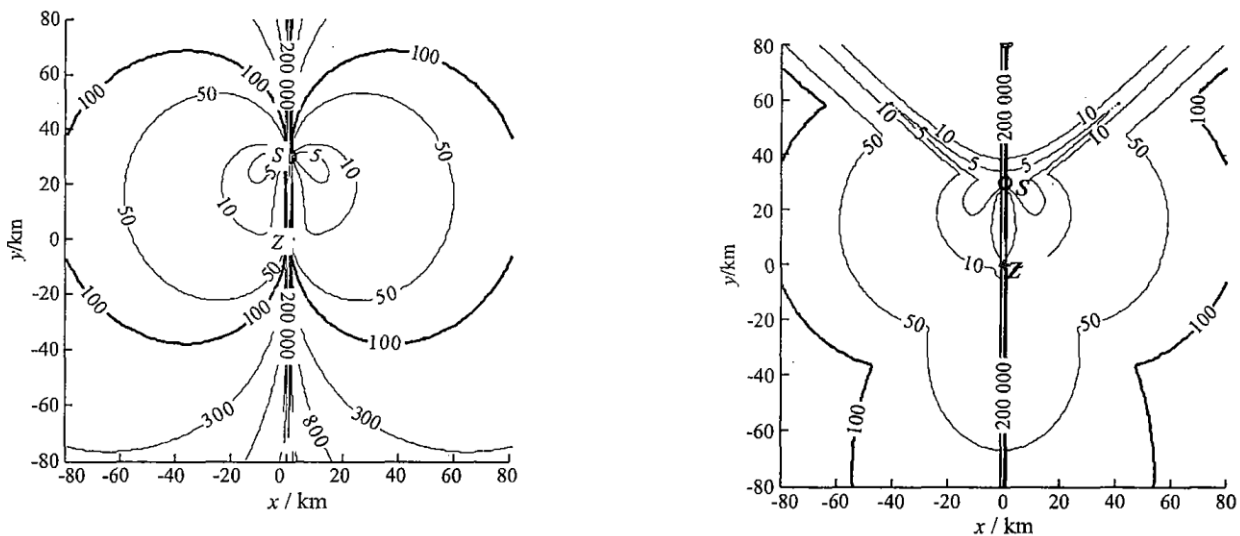
上述为常用3种融合算法,实际中可根据制导站的精确度选择不同的融合方法。

4 仿真实验与分析

实验中对融合前及融合后的模型(式12)的定位误差分布分别进行仿真。依据实验中对某型制导雷达测角随机误差的统计,高低和方位测量误差均值为 $\sigma_{\beta_2} = \sigma_{\beta_1} = 1.31'$, $\sigma_{\epsilon_1} = \sigma_{\epsilon_2} = 1.64'$, 双基距离 $L = 30 \text{ km}$ 。

4.1 算法融合前后随机误差分析及分布图

应用式(9)可得到 σ_{i1} 在整个空域内的分布,当 $\sigma_{\beta_1}, \sigma_{\beta_2}, \sigma_{\epsilon_1}$ 取值不同时, σ_{R_1} 均方误差分布相应地发生变化。模型(1)的定位误差 σ_1 的分布如图2(a)所示,图中主站为Z,副站为S。 x 轴表示雷达横向探测范围, y 轴表示雷达纵向探测范围,曲线为误差分布等高线(单位为m)。



(a) 式(9)解得 σ_1 定位误差等高线分布图
($H = 5 \text{ km}$, Z 为主站, S 为副站)

(b) 融合校正后定位误差等高线分布图
($H = 5 \text{ km}$ 误差范围 $< 100 \text{ m}$)

图2 融合前后定位误差分布图

由图2可见:除基线及其延长线所在空域外,其它空域的定位误差由外向里(对某一条航线而言,交叉定位角逐渐增大)呈单调性减少。基线附近定位误差迅速增大,基线正上方定位误差为无穷大。如果目标位于基线及其延长线或附近时,用未融合模型定位会出现定位误差跳跃现象,无法实现对目标的精确定位。

同理,模型(3)-(8)的定位误差分布图亦可得出:基线附近定位误差跳跃较大。仿真结果表明:应用未融合(1-8)模型定位产生的定位误差跳跃性大,且定位的精度不高。

采用融合模型(12)对定位误差校正后得出仿真结果如图2(b)所示。对照同比例坐标的图2(a)中的

100 m 等高线,可见校正后相同定位误差值的等高线有了较大扩展,即同一位置定位误差减小,而且基线附近不再出现未融合模型中定位误差大幅度跳变现象。

4.2 算法融合前后定位随机误差对比

通过多次仿真实验统计得定位误差小于 50 m 区域面积的对比如表 1 所示,由表 1 对比可知:对比融合后模型(12)与融合前模型(1),小于 50 m 的误差投影区域面积增大了约 6 314.44 km²。小于 50 m 的误差带面积延扩,使得测量的精度得到了较大的提高。从而大大提高了组网雷达的探测性能和抗干扰能力。

表 1 对 R_1 融合前后各算法误差分布投影区域面积的对比

	模型	高度/km	参数	$\sigma_R \leq 50$ m 的区域面积/km ²
融合前	模型(1)	5	R_1	7 161.51
	模型(2)	5	R_1	7 212.10
	模型(5)	5	R_1	6 531.59
	模型(7)	5	R_1	5 585.42
	模型(2)	5	R_2	7 212.10
	模型(4)	5	R_2	7 161.51
	模型(6)	5	R_2	5 585.42
	模型(8)	5	R_2	6 531.59
融合后	模型(12)	1	R_1	8 510.10
	模型(12)	5	R_1	13 475.95
	模型(12)	8	R_1	15 703.68
	模型(13)	5	$R_1 + R_2$	14 678.07

参考文献:

- [1] 朱丽莉. 某型网络化地空导弹武器系统反隐身、抗干扰数据融合技术研究[D]. 西安:空军工程大学, 2003.
- [2] 何友, 修建娟. 雷达信息处理及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [3] 王睿, 张平定. 雷达组网数据融合系统组合失配误差研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2002, 3(2): 56-58.
- [4] 何友, 王国宏. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2000.
- [5] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1999.
- [6] 刘德树. 雷达对抗的基本理论和技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1989.
- [7] 张平定, 王睿, 曾华. TVM 制导方式中无源测向交会定位系统[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2004, 5(3): 22-24.
- [8] 卢盈齐, 王睿. 组网雷达跟踪系统目标高度测定算法[J]. 现代雷达, 2002, 24(4): 24-26.

(编辑:田新华)

Research on the Revisable Algorithm for the Error of the Net - radars in Cross - locating

ZHANG Ping - ding¹, ZHANG Xi - chuan¹, WANG Ming - yu¹, SU Rong²

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China; 2. CFTE, Xi'an 710089, China)

Abstract: In this paper the model of Cross - locating in the Radar netting under the condition of jam is discussed, and the distributing of the error in Cross - locating is analyzed. Aiming at the problem of the instability in Confusion error, a fusion model is founded to proofread the error based on the theory of data fusion. The model can be used to eliminate the problem of instability in Cross - locating error effectively. The result of simulation shows that this model can expand the detect range and enhance the precision of the Net - radar.

Key words: Cross - locating; confusion error; data fusion