

利用圆概率误差对雷达定位区域的计算及仿真

阮怀林 罗景青 夏大永

(解放军电子工程学院 合肥 230037)

摘要: 提出了一种新的计算定位区域的方法。这种方法是利用两站和三站部署位置, 计算出某个小区域圆概率误差 (CEP), 如果小于某个给定值时, 就认为这个小区域是要计算的定位区域的一部分。这种方法不仅能计算出定位区域, 而且每点的定位精度是已知的。

关键词: 圆概率误差, 定位区域, 侦察站

中图分类号: TN974 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)03-0438-03

Calculation and Simulation of the Position Area to Radar Using CEP

Ruan Huai-lin Luo Jing-qing Xia Da-yong

(Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

Abstract A new calculated method of the position area to radar is presented. The method is that the Circular Error Probability(CEP) of the smaller area is calculated using the parameters of the place of two and three radar devices. When CEP of some smaller area is less than or equal to the given value, the area belongs to the whole position area. By means of the method, the position area is gained and the position precision can be obtained.

Key words Circular error probability, Position area, Reconnaissance devices

1 引言

雷达对抗侦察的主要任务是对雷达实施全面侦察, 并对敌威胁等级较大的雷达实施重点侦察, 及时提供情报支援。因此, 为了充分发挥雷达对抗侦察装备性能, 最大限度地扩大侦察范围和定位的区域。确保侦察情报的全面、及时、准确。对于靠近前沿的侦察站, 既要保证有足够的有效侦察(定位)纵深, 又要便于阵地防卫, 提高生存能力。这些都要求对不同的雷达对抗侦察站的部署进行对雷达定位区域的计算, 并根据定位区域的计算, 选取最佳的部署。

对雷达的位置进行确定是雷达对抗侦察的一项重要任务。定位的方法有很多, 其中测向交叉定位法是雷达对抗侦察对雷达定位的最常用、最主要的方法。为了正确部署雷达对抗侦察站, 同时为了衡量雷达侦察站是否合理, 定位区域的计算是非常重要的。定位区域则是指两个或多个侦察站的侦察范围所覆盖的区域。侦察范围一般是以雷达对抗侦察站为圆心、最大侦察距离为半径所作的圆。如何对雷达的定位区域的计算已有一些方法^[1, 2], 这些计算方法解决了许多实际问题, 而这些计算方法并不知道定位区域内每点的定位精度是多少。本文提出了一种利用圆概率误差的计算方法, 既可以计算出定位区域的大小, 又得到了定位精度。

2 计算方法

雷达对抗侦察站的侦察范围, 是雷达对抗侦察站在各个方向上对目标的最大侦察距离轨迹所围成的区域。在地形条件理想的条件下, 其侦察范围是以雷达对抗侦察站为圆心, 以最大侦察距离为半径所作的圆的范围。在雷达对抗侦察范围内的地域, 称为雷达对抗侦察站的覆盖区域。需要侦察的地域, 如果被一个雷达对抗侦察站的侦察范围所覆盖时称为单层覆盖, 被两个或数个雷达对抗侦察站的侦察范围所覆盖时, 称为双层覆盖或多层覆盖区域。雷达对抗侦察站的侦察范围、覆盖层次的多少对定位是有影响的, 在单层覆盖区域内, 只能侦察雷达的技术参数, 只有在双层或多层覆盖区域内, 才能进行交叉定位。

测向交叉定位是根据雷达站的坐标和雷达目标相对于侦察站的方向角来确定辐射源的坐标。定位区域是两个或多个以上的侦察站以各自侦察作用距离为半径的圆所相交的区域。在实际部署中, 通常只以面向敌方的那一部分作为可定位区域。为了简单起见, 假设雷达对抗侦察站为两站, 其定位区域可用图 1 所示。弧线 \widehat{HG} 是以侦察站 1 的侦察作用距离为半径的圆弧, 弧线 \widehat{EF} 是以侦察站 2 的侦察作用距离为半径的圆弧, 两站可定位的区域如图中的阴影部分所示, 假设我们选取矩形 $(ABCD)$ 的长度 \overline{AB} 略大于长度 \overline{EG} , 宽

度略大于两个侦察站中的作用距离最大值。A、B、C、D点的坐标可以通过侦察站的位置和作用距离来确定。把矩形(ABCD)分成 $N \times M$ 个小方块。每个小方块认为是一个点, 利用两个侦察站的位置和测向精度, 可以计算出这一方块是否在定位区域内, 如果在定位区域内则可以计算出圆概率误差。如果圆概率误差小于给定的误差值, 就认为小方块是满足一定定位精度的定位区域。

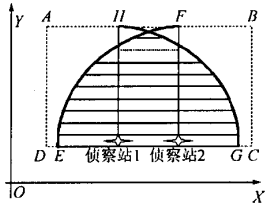


图1 定位区域计算示意图

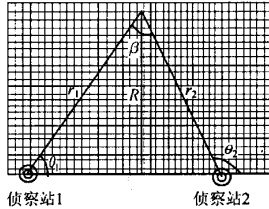


图2 交叉测向定位的示意图

2.1 2个侦察站定位区域

假定2个侦察站要定位的范围如图2中阴影部分所示, 定位精度要求为一给定的圆概率误差值 CEP_0 。考虑定位精度的定位区域计算方法如下: 把整个区域分成 $N \times M$ 个小方块区域 $A_{ij}(i=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,M)$ 。根据每一个小方块的中心到2个侦察站距离是否满足侦察作用距离, 如果不满足其要求, 则剔除此小方块区域。如果满足此要求, 再计算此小方块区域的圆概率误差(CEP)。计算每个定位小方块区域的CEP值^[1]:

$$CEP_{ij} = 0.8 \frac{\sqrt{r_1^2(i,j)\sigma_1^2 + r_2^2(i,j)\sigma_2^2}}{|\sin(\theta_2(i,j) - \theta_1(i,j))|} \quad (1)$$

其中 σ_1^2 和 σ_2^2 分别表示侦察站1和侦察站2的测向误差的方差。 $r_1(i,j)$, $\theta_1(i,j)$, $r_2(i,j)$, $\theta_2(i,j)$ 分别表示小方块区域 A_{ij} 中心处相对于侦察站1的距离和方位角以及相对于侦察站2的距离和方位角。另外, 假定各侦察站的测向是相互独立的, 这也是符合实际情况的。

根据每个定位小方块区域 A_{ij} 相对应的 CEP_{ij} , 当小区域划分足够小时, 如果满足:

$$CEP_{ij} \leq CEP_0 \quad (2)$$

我们就近似认为 A_{ij} 中所有的点均满足定位精度要求的。所有满足定位精度要求小区域之和就是要计算的定位区域:

$$A = \sum_{CEP_{ij} \leq CEP_0} A_{ij} \quad (3)$$

2.2 3个侦察站共同的定位区域

3个侦察站共同的定位区域的计算原理上与2个侦察站定位区域的计算相似, 都是通过划分足够小的小区域, 对每个小区域进行 CEP_{ij} 的计算, 然后判别该小区域的 CEP_{ij} 是否满足 $CEP_{ij} \leq CEP_0$ 。由于3个侦察站侦察范围所覆盖的区域其相交部分与2个侦察站有所不同, 所以与2个站的计算方法也有所不同。3个侦察站共同的定位区域计算方法如下: 根据每一个小方块的中心到3个侦察站距离是否满足各自侦察作用距离, 如果不满足其要求, 则剔除此小方块区域。如

果满足此要求, 再计算此小方块区域的圆概率误差 CEP_{ij} 。对于3层覆盖的区域的情况, 其测向定位有冗余值, 我们可以利用最小二乘法来提高定位精度。

定位区域的 CEP_{ij} 计算由3个侦察站对雷达的测向角与侦察站和雷达的位置的关系决定, 对每个测向角求全微分, 可得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_1 &= \frac{\partial\theta_1}{\partial x_e} \Delta x_e + \frac{\partial\theta_1}{\partial y_e} \Delta y_e \\ \Delta\theta_2 &= \frac{\partial\theta_2}{\partial x_e} \Delta x_e + \frac{\partial\theta_2}{\partial y_e} \Delta y_e \\ \Delta\theta_3 &= \frac{\partial\theta_3}{\partial x_e} \Delta x_e + \frac{\partial\theta_3}{\partial y_e} \Delta y_e \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

用矩阵的形式表示为

$$\Delta\theta = H\Delta X_e \quad (5)$$

$$\text{其中 } \Delta\theta = [\Delta\theta_1 \ \Delta\theta_2 \ \Delta\theta_3]^T, H = \begin{bmatrix} \frac{\partial\theta_1}{\partial x_e} & \frac{\partial\theta_1}{\partial y_e} \\ \frac{\partial\theta_2}{\partial x_e} & \frac{\partial\theta_2}{\partial y_e} \\ \frac{\partial\theta_3}{\partial x_e} & \frac{\partial\theta_3}{\partial y_e} \end{bmatrix}, \Delta X_e = \begin{bmatrix} \Delta x_e \\ \Delta y_e \end{bmatrix}$$

利用最小二乘法^[4]可得:

$$\Delta X_e = [H^T H]^{-1} H^T \Delta\theta \quad (6)$$

这样可将3个侦察站的测向误差 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 $\Delta\theta_3$ 转换成直角平面上的定位误差 Δx_e 、 Δy_e 。其中 CEP_{ij} 可近似用下式来计算:

$$CEP_{ij} = 0.8 \sqrt{\sigma_x^2(i,j) + \sigma_y^2(i,j)} = 0.8 \sqrt{(\Delta x_e(i,j))^2 + (\Delta y_e(i,j))^2} \quad (7)$$

2.3 3个侦察站总的定位区域

对于3个侦察站总的定位区域的计算, 由于有的区域是2层覆盖, 而有的区域是3层覆盖, 因而总的定位区域应是2层覆盖的定位区域和3层覆盖定位区域的并集。假定每一个侦察站测向是相互独立的。首先, 判定划分的小区域到各侦察站的距离是否满足其中2个或3个侦察站的作用距离, 如果只满足其中1个侦察站的作用距离或1个侦察站的作用距离也不满足, 则剔除此小区域; 其次如果满足2个或3个则进行如下计算: 如果只满足2个侦察站的侦察作用距离, 则计算方法如同2.1节的方法, 如果满足3个侦察站的侦察作用距离, 则计算方法如同2.2节的方法。最后把满足定位精度要求小区域进行并集计算就是要计算的3个站总的定位区域。

2.4 多个侦察站的定位区域

多个侦察站的定位区域的计算, 与3个侦察站的定位区域的计算方法相似。只不过定位的 CEP_{ij} 计算方法有所不同。其计算方法如下: 假定有 K 个侦察站, 首先, 判定所划分的小方块是处于2个侦察站或3个侦察站... 或 K 个侦察站的侦察作用距离内, 还是满足1个侦察站的侦察作用距离或在侦察作用距离之外。如果是后一种情况, 则剔除此小方块。

如果是前一种情况时，满足2个、3个侦察站的侦察作用距离的情况与2.1节和2.2节相同，对于某个小方块满足 L ($L > 3$)个侦察站的侦察作用距离的情况时，其 CEP_j 的计算方法与式(5)相同，只不过 $\Delta\theta$ 、 H 用下式表示：

$$\Delta\theta = [\Delta\theta_1 \quad \Delta\theta_2 \quad \dots \quad \Delta\theta_L]^T \tag{8}$$

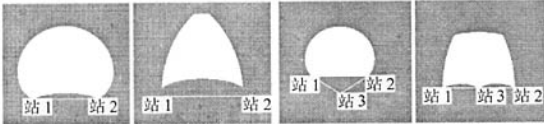
$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial\theta_1}{\partial x_e} & \frac{\partial\theta_1}{\partial y_e} \\ \frac{\partial\theta_2}{\partial x_e} & \frac{\partial\theta_2}{\partial y_e} \\ \frac{\partial\theta_3}{\partial x_e} & \frac{\partial\theta_3}{\partial y_e} \end{bmatrix} \tag{9}$$

其它的计算方法与2.3节相同。对于多层覆盖的区域的情况，其测向定位有更多的冗余值，同样我们可以利用最小二乘法来提高某个小方块的定位精度。

3 仿真计算

3.1 2站的定位区域

假定2个侦察站的侦察距离相同 $D_1 = D_2 = 100\text{km}$ ，圆概率误差选定为： $CEP_0 = 2\text{km}$ ， $\sigma_1 = \sigma_2 = 1^\circ$ ，2站相距分别为： $B_1 = 70\text{km}$ 和 $B_2 = 110\text{km}$ ，其定位区域如图3中(a)和(b)所示。



(a) $B_1=70\text{km}$ 定位区域 (b) $B_2=110\text{km}$ 定位区域

图3 2站的定位区域

图4 3站共同的定位区域

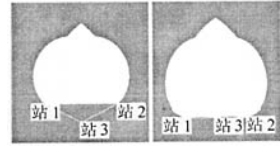
3.2 3站共同的定位区域

各侦察站作用距离 $D_1 = D_2 = D_3 = 100\text{km}$ ，测向误差为： $\sigma_1 = \sigma_2 = 1^\circ$ ，选定圆概率误差的值为： $CEP_{01} = 1.3\text{km}$ 。3站部署分2种情况：(1)3站部署不在一条直线上，各站相距分别为 $B_{12} = 80\text{km}$ ， $B_{13} = B_{23} = 41.4\text{km}$ ，其共同的定位区域如图4中(a)所示；(2)3站部署在一条直线上，各站相距都为 $B_{13} = B_{32} = 50\text{km}$ ，其共同的定位区域如图4中(b)所示。

3.3 3站总的定位区域

各侦察站作用距离、测向误差的值与3.2情况相同，选定圆概率误差 $CEP_0 = 3\text{km}$ 。3站部署分两种情况：(1)3站部署不在一条直线上，各站相距分别为 $B_{12} = 80\text{km}$ ， $B_{13} = B_{23} = 44.7\text{km}$ ，计算出的定位区域如图5中(a)所示；(2)3站部署在一条直线上，各站相距为 $B_{13} = B_{32} = 40\text{km}$ ，计算出3站总的定位区域如图5中(b)所示。

限于篇幅，本文仅给出部分仿真结果。综合大量的仿真计算结果，2站定位区域有以下特点：定位区域随着2站部署距离的变化，有一个最佳的布站距离，使得定位区域有一最大值；2站侦察作用距离不同时，定位区域具有不对称性；定位精度提高(CEP减小)时，定位区域变小。3站定位区



(a) 3站部署不在一条直线上 (b) 3站部署在一条直线上

图5 三站总的定位区域

域有以下特点：3站部署在一条直线上时定位区域达到最大值；定位精度提高(CEP减小)时，定位区域变小；同样3站部署不对称时，定位区域具有不对称性。

4 结论

地面雷达对抗侦察站的配置，是地面雷达对抗侦察部队部署的基础。雷达对抗侦察站配置不当，对参数的侦察可能影响不大，但却严重地影响交会定位的精度，甚至会导致丧失定位的可能性。不仅如此，还直接影响有效侦察区域的大小。只有敌雷达的技术参数而没有具体坐标的对抗侦察情报，其战术价值是不大的。正确的部署，必须能保证参数侦察和交会定位，同时得到定位精度。利用圆概率误差对雷达定位区域的计算，在多侦察站任意部署的情况下都可以进行计算。一方面可以用于给定的部署的情况下，来计算定位区域的大小；另一方面可以通过计算不同的部署的情况下的定位区域，从而选择最佳的侦察站的部署。我们可以选取不同的 CEP_0 的值，就可以得到不同的定位区域。这样在战术上，可以根据定位精度要求，选定不同的值 CEP_0 ，对不同侦察站部署进行定位区域的计算，这样既保证定位精度，又具有足够大的有效侦察区域。

利用圆概率误差对雷达定位区域的计算在雷达对抗战术上具有非常重要的意义。同样这种方法也完全可以用于通信对抗侦察装备的对通信装备的定位区域进行计算。本文提出这种算法，通过大量的模拟仿真可以看出，得到的结果是合理的。我们可以根据战术需要，如果要精确打击目标，可以选择CEP较小来计算定位区域。如果要得到最大定位区域，可以根据所需要的定位精度，适当选取两侦察站的配置距离来满足要求。这对电子对抗的战术、技术都是非常重要的。

参考文献

[1] 邵国培, 曹志耀, 等编著. 电子对抗作战效能分析. 北京: 解放军出版社, 1997年.
 [2] 赵国庆主编. 雷达对抗原理. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999年.
 [3] 沈凤麟, 等, 信号统计分析与处理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002年.
 [4] 曹志耀. 地面雷达侦察站的最佳配置. 中国系统工程学会军事系统工程委员会六届学术年会论文集, 1993.6.

阮怀林: 男, 1964年生, 博士, 副教授, 研究方向为信号与信息处理。
 罗景青: 男, 1957年生, 教授, 研究方向为信号与信息处理。