

对一种多基地雷达系统定位精度的计算与分析

余洪涛, 张永顺, 齐立峰

(空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800)

摘要: 为了深入分析多基地雷达系统定位方式与定位精度之间的关系, 以一种多基地雷达系统布局为例, 对其利用距离和、方位角以及距离差 3 种定位方式的定位精度进行了计算、分析, 通过计算机仿真后, 得到了远距离时应采用距离和测量、近距离时应采用距离差测量、测量站附近应采用角度测量的结论。

关键词: 多基地雷达; 双基地雷达; 定位精度

中图分类号: TN95 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2005)04-0008-04

目标坐标的测量精度是双/多基地雷达的重要指标之一。在双/多基地雷达系统中, 通常是以接收基地作为参数的测量基准。在基线长度一定的条件下, 双/多基地雷达的距离只是距离估值和、方位角、距离差的函数, 因此, 其定位精度只与这些因素有关。

1 多基地雷达测量误差协方差矩阵

设在同一直角坐标中, 联系目标位置 (x, y) 和测量参数 $K_i (i=1, 2, \dots, N)$ 的关系式为

$$K_i = f_i(x, y) + V_i \tag{1}$$

式中 V_i 为测量噪声, 一般认为 V_i 为零均值, 方差为 σ_i^2 的平稳正态白噪声。用泰勒级数在某一先验估计 $x = x_0, y = y_0$ 处展开, 以 $x = x_0$ 为例, 则有

$$K_i - f_i(x_0, y_0) = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x} \right|_{x_0} (x - x_0) + V_i + O(|x - x_0|^2) \tag{2}$$

取观测方程为

$$J_{xi} = h_{xi} + V_i \tag{3}$$

式中

$$J_{xi} = K_i - f_i(x_0, y_0) - x_0 \left. \frac{\partial f_i}{\partial x} \right|_{x_0} \tag{4}$$

$$h_{xi} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x} \right|_{x_0} \tag{5}$$

对 $y = y_0$ 进行同样操作, 且综合全部测量, 可写成矩阵方程:

$$J = HZ + V \tag{6}$$

式中

$$J = \begin{bmatrix} J_{x1} & J_{y1} \\ \vdots & \vdots \\ J_{xN} & J_{yN} \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x} \right|_{x_0} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial y} \right|_{y_0} \\ \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_N}{\partial x} \right|_{x_0} & \left. \frac{\partial f_N}{\partial y} \right|_{y_0} \end{bmatrix}; Z = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}; V = \begin{bmatrix} V_1 & V_1 \\ \vdots & \vdots \\ V_N & V_N \end{bmatrix} \tag{7}$$

收稿日期: 2004-10-25

作者简介: 余洪涛(1977-), 男, 湖北武汉人, 博士生, 主要从事雷达和电子对抗研究;
张永顺(1961-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达和电子对抗研究。

在各测量误差相互独立的条件下,式(6)的最小二乘估计为

$$\hat{Z} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} J \tag{8}$$

式中, $R = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_N) = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N^2)$ 。用误差协方差矩阵行列式方根 $\sqrt{|P|}$ 来衡量精度的高低, $\sqrt{|P|}$ 与测量误差概率成正比^[1]：

1) 当仅有两个独立的测量时(双基地雷达系统),有

$$\sqrt{|P_2|} = \sqrt{|(H^T R^{-1} H)^{-1}|} = \frac{\sqrt{|R|}}{|H|} \tag{9}$$

2) 当测量参数多于两个时(多基地雷达系统),由递推公式^[2]

$$P_l^{-1} = P_{l-1}^{-1} + h_l^T r_l^{-1} h_l \tag{10}$$

算出 P_l 后,即可得到 $\sqrt{|R_l|}$,式中 l 表示测量参数的个数, $l > 2$ 。

2 多基地雷达可测量的位置参数

设目标所在的位置为 (x, y) , 发射机所在的位置为 (x_T, x_T) , 第 i 个接收机所在的位置为 (x_{R_i}, y_{R_i}) , 则多基地雷达系统可测量的位置参数主要有^[3-5]：

1) 距离和 $(D_T + D_{R_i})$, D_T 表示目标到发射机的距离, D_{R_i} 表示目标到第 i 个接收机的距离。对于有 i 个接收机的多基地雷达系统,距离和参数有 i 个。

2) 方位角 θ_{R_i} , θ_{R_i} 表示目标到第 i 个接收机的视角。对于有 i 个接收机的多基地雷达系统,方位角参数有 i 个。

3) 距离差 $(D_{R_i} - D_{R_j})$, D_{R_i} 表示目标到第 i 个接收机的距离, D_{R_j} 表示目标到第 j 个接收机的距离。对于有 i 个接收机的多基地雷达系统,距离差参数有 C_i^2 个。

测量参数的误差矢量表如表 1 所示。

表 1 测量参数误差矢量表

测量参数	误差矢量 h_i	h_i 幅值	附注
距离和 $D_{R_i} + D_T$	$(\cos \theta_{R_i} + \cos \theta_T, \sin \theta_{R_i} + \sin \theta_T)$	$2\cos \frac{\beta_i}{2}$	$\beta_i = \theta_{R_i} - \theta_T$
距离差 $D_{R_i} + D_{R_j}$	$(\cos \theta_{R_i} + \cos \theta_{R_j}, \sin \theta_{R_i} + \sin \theta_{R_j})$	$2\sin \frac{\alpha_{ij}}{2}$	$\alpha_{ij} = \theta_{R_i} - \theta_{R_j}$
方位角 θ_{R_i}	$(-\frac{\sin \theta_{R_i}}{D_{R_i}}, \frac{\cos \theta_{R_i}}{D_{R_i}})$	$\frac{1}{D_{R_i}}$	

3 多基地雷达的定位精度

如图 1 所示,多基地雷达的布局如下:4 接收机布置在一个圆形区域内,其中接收机 R_1 位于圆心,接收机 R_2, R_3, R_4 位于圆周上且均匀分布。发射机 T 、接收机 R_1 、接收机 R_3 位于同一直线上。

在上述多基地雷达系统中,可测量的位置参数主要有:

距离和 $D_T + D_R$ (4 个)、方位角 θ_R (4 个)、距离差 $D_{R1} - D_{R2}$ (6 个)。

若仅采用距离和定位,由式(10)及表 1 可得

$$P_a^{-1} = P_2^{-1} + h_3^T r_3^{-1} h_3 + h_4^T r_4^{-1} h_4 =$$

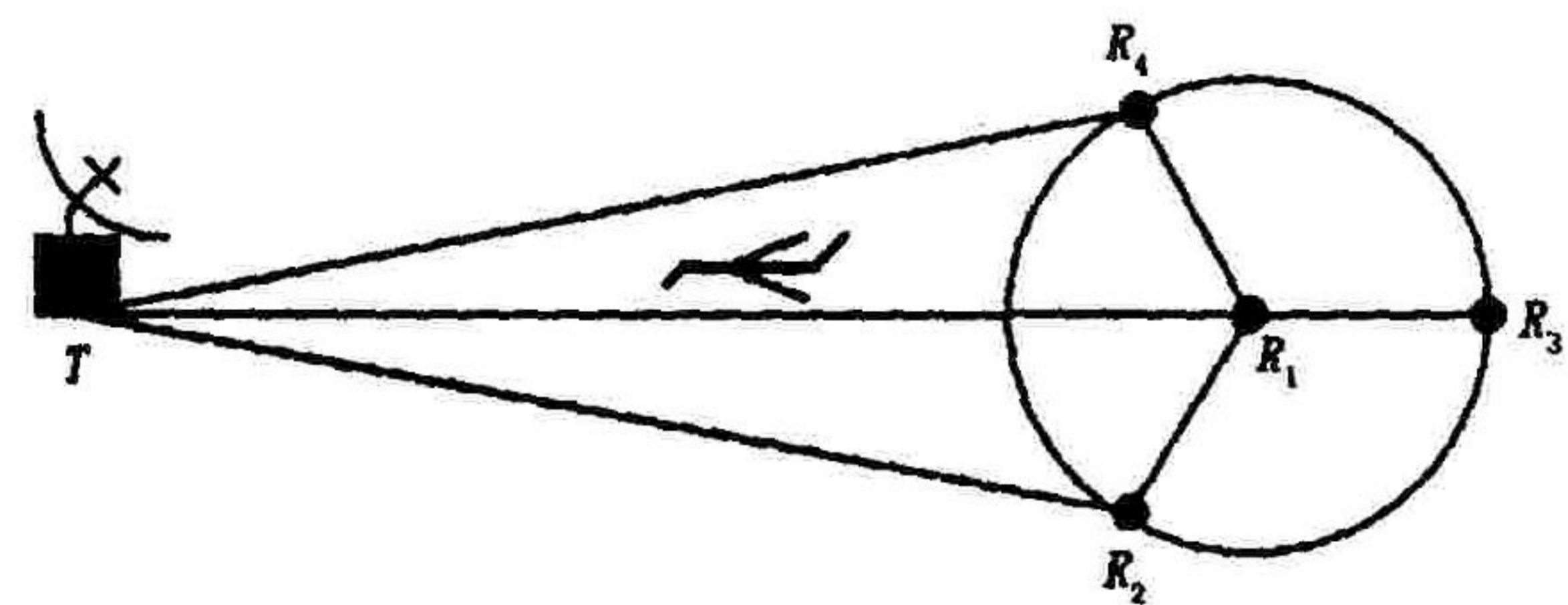


图 1 一种多基地雷达系统布局

$$\frac{1}{\sigma_1^2} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 (\cos \theta_{R_i} + \cos \theta_T)^2 & \sum_{i=1}^4 (\cos \theta_{R_i} + \cos \theta_T) (\sin \theta_{R_i} + \sin \theta_T) \\ \sum_{i=1}^4 (\cos \theta_{R_i} + \cos \theta_T) (\sin \theta_{R_i} + \sin \theta_T) & \sum_{i=1}^4 (\cos \theta_{R_i} + \cos \theta_T)^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\sqrt{|P_a|} = \sqrt{\sum_{1 \leq i < j \leq 4} (\sin \beta_j - \sin \beta_i - \sin \alpha_{i,j})^2 / \sigma_1^2} \quad (12)$$

式中: β_j, β_i 分别为目标对发射机和接收机 R_j, R_i 的视角; $\alpha_{i,j}$ 为目标对接收机 R_i, R_j 的双基地夹角; σ_1 为采用距离和定位时的平稳正态白噪声的方差。

若仅采用方位角定位,由式(11)及表1可得

$$P_b^{-1} = P_2^{-1} + h_3^T r_3^{-1} h_3 + h_4^T r_4^{-1} h_4 = \frac{1}{\sigma_2^2} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 \frac{\sin^2 \theta_{R_i}}{D_{R_i}^2} & \sum_{i=1}^4 -\frac{\sin \theta_{R_i}}{D_{R_i}} \cdot \frac{\cos \theta_{R_i}}{D_{R_i}} \\ \sum_{i=1}^4 -\frac{\sin \theta_{R_i}}{D_{R_i}} \cdot \frac{\cos \theta_{R_i}}{D_{R_i}} & \sum_{i=1}^4 \frac{\cos^2 \theta_{R_i}}{D_{R_i}^2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\sqrt{|P_b|} = \sqrt{\sum_{1 \leq i < j \leq 4} \frac{\sin^2 \alpha_{i,j}}{D_{R_i}^2 \cdot D_{R_j}^2} / \sigma_2^2} \quad (14)$$

式中: $\alpha_{i,j}$ 为目标对接收机 R_i, R_j 的视角; D_{R_i}, D_{R_j} 分别为目标至接收机 R_i, R_j 的距离; σ_2 为采用方位角定位时的平稳正态白噪声的方差。

若仅采用距离差定位,由式(10)及表1可得

$$P_c^{-1} = P_2^{-1} + h_3^T r_3^{-1} h_3 + h_4^T r_4^{-1} h_4 + h_5^T r_5^{-1} h_5 + h_6^T r_6^{-1} h_6 = \frac{1}{\sigma_3^2} \begin{bmatrix} \sum_{1 \leq i < j \leq 6} (\cos \theta_{R_i} - \cos \theta_{R_j})^2 & \sum_{1 \leq i < j \leq 6} (\cos \theta_{R_i} - \cos \theta_{R_j}) ((\sin \theta_{R_i} - \sin \theta_{R_j})) \\ \sum_{1 \leq i < j \leq 6} (\cos \theta_{R_i} - \cos \theta_{R_j}) (\sin \theta_{R_i} - \sin \theta_{R_j}) & \sum_{1 \leq i < j \leq 6} (\sin \theta_{R_i} - \sin \theta_{R_j})^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\sqrt{|P_c|} = \sqrt{dk_1 + k_2} / \sigma_3 \quad (16)$$

式中: σ_3 为采用距离差定位时的平稳正态白噪声的方差; k_1, k_2 的值为

$$k_1 = \sum_{1 \leq i < j < k \leq 4} (\sin \alpha_{i,k} - \sin \alpha_{i,j} - \sin \alpha_{j,k})^2 \quad (17)$$

$$k_2 = (\sin \alpha_{1,4} - \sin \alpha_{1,3} + \sin \alpha_{2,3} - \sin \alpha_{2,4})^2 + (\sin \alpha_{1,3} - \sin \alpha_{1,3} + \sin \alpha_{3,4} - \sin \alpha_{2,4})^2 + (\sin \alpha_{1,4} - \sin \alpha_{1,2} - \sin \alpha_{2,3} - \sin \alpha_{3,4})^2 \quad (18)$$

4 仿真结果与结论

发射机、接收机的位置分别为: $T(20, -30), R_1(100, -30), R_2(75, -73.3), R_3(150, -30), R_4(75, -13.3)$ 。测量噪声的均方差: $\sigma_1 = \sigma_3 = 0.25 \text{ km}, \sigma_2 = 0.33^\circ$ 。在区域: $0 \leq x \leq 270 \text{ km}, 0 \leq y \leq 200 \text{ km}$, 多基地雷达定位精度仿真计算结果如图2~图4所示,其中: x 表示距离向(km), y 表示方位向(km),其高度表示定位精度的大小。(无量纲)

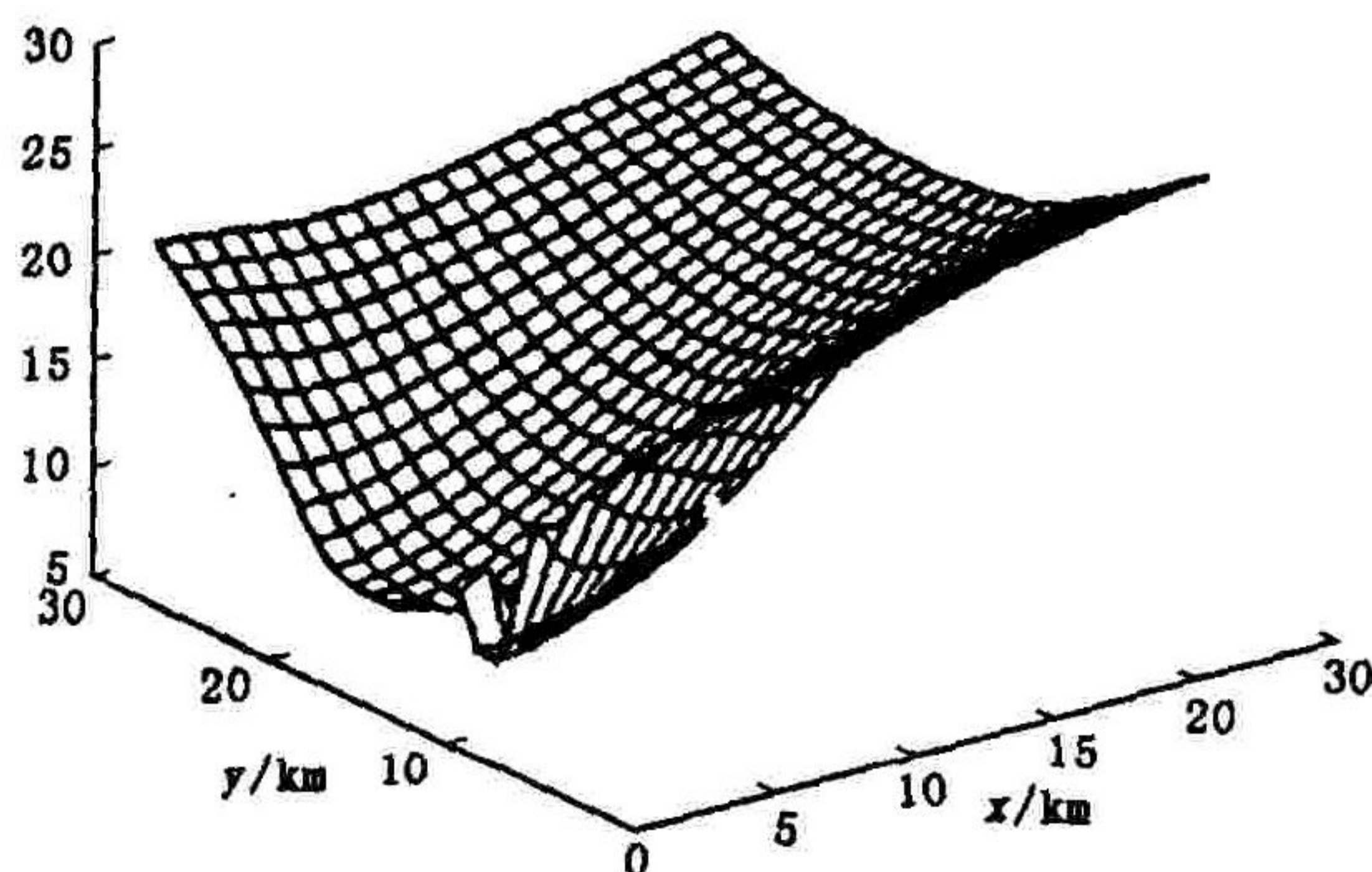


图2 距离和测量误差

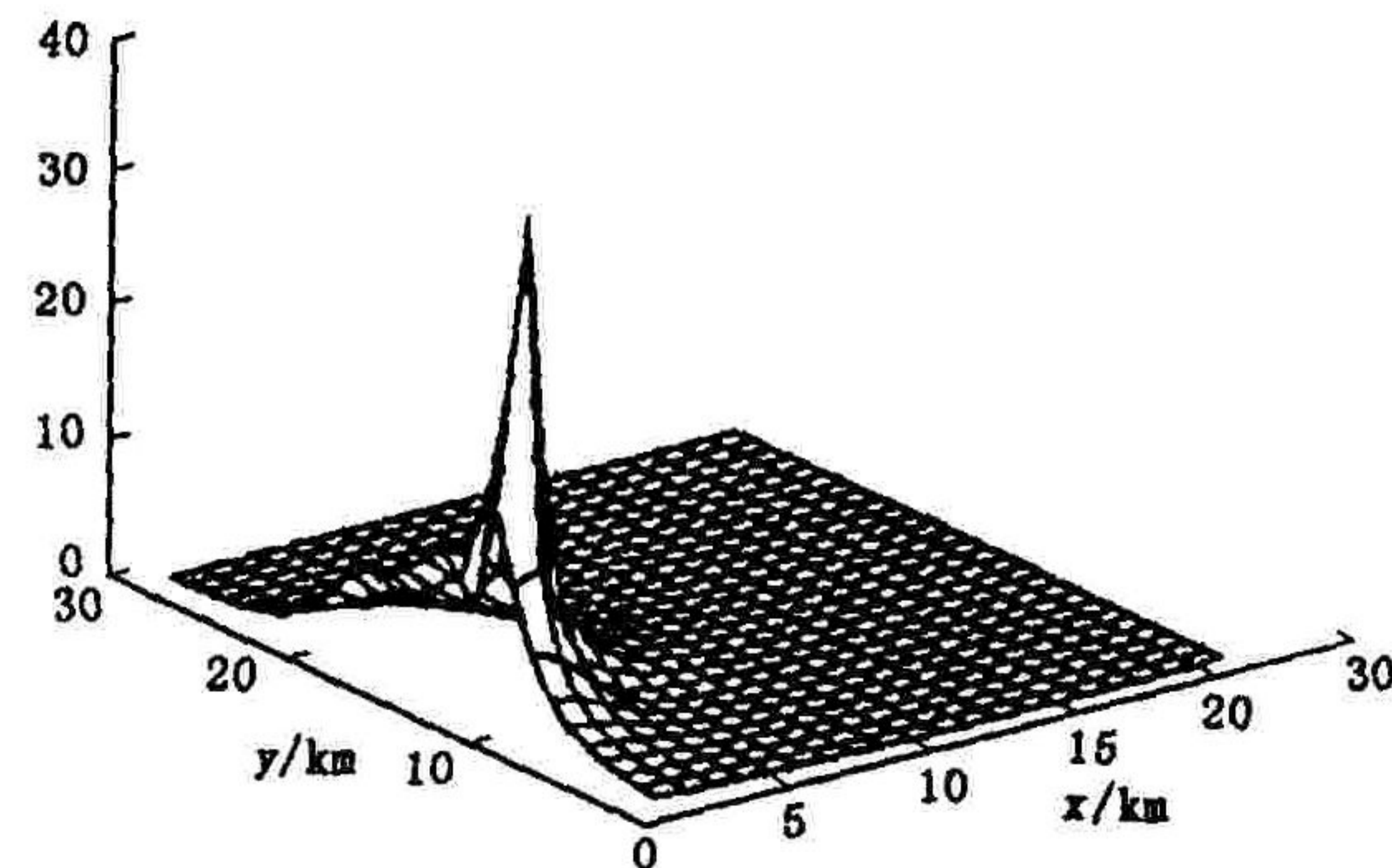


图3 方位角测量误差

由图可知,多基地雷达采用距离和、距离差定位时,其定位精度要比采用方位角高得多;在远距离时,采用距离和定位,其精度优于采用距离差定位;在近距离时,采用距离差定位,其精度优于距离和定位;但在测量站附近,采用距离和、距离差定位,其精度比采用方位角定位低。因此,多基地雷达系统在对目标进行定位时,应遵循以下原则:

- 1) 在远距离时,应采用距离和测量;
- 2) 在近距离时,应采用距离差测量;
- 3) 在测量站附近,应采用角度测量。

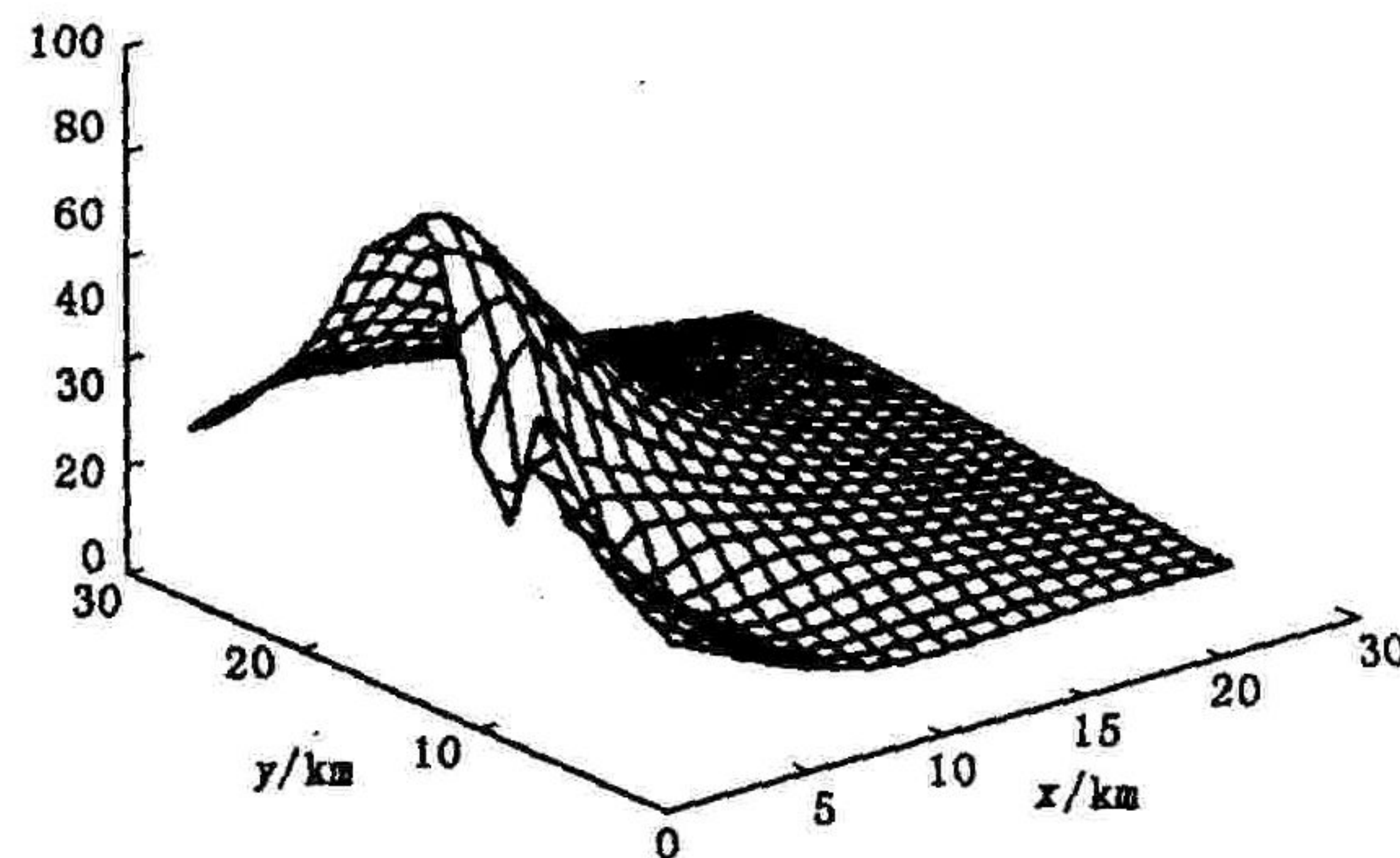


图4 距离差测量误差

参考文献:

- [1] Farian A, Hanle E. Position Accuracy in Netted Monostatic and Bistatic Radar[J]. IEEE Trans, 1999, 19(4): 513 - 520.
- [2] 李春化. 多基地雷达的目标定位[J]. 火控雷达技术, 1989, 3(1): 18 - 21.
- [3] Skolnik M I. 雷达手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1974.
- [4] 王睿, 张平定, 刘进忙. 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(1): 56 - 58.
- [5] 余洪涛, 张永顺, 田波. 双基地雷达抗有源压制性干扰性能分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2002, 3(2): 34 - 36.

(编辑: 田新华)

Calculation and Analysis of Precision of Localization of a
Multi - static Radar System

YU Hong - tao, ZHANG Yong - shun, QI Li - feng

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: In this paper, a layout of a multi - static radar system is taken for an example to go deep into analyzing the relationship between the modes of localization and the precisions of localization. The precisions of localization of the three modes of localization : distance sum, distance difference and azimuth angle are calculated and analyzed by formulas, and some universal valuable conclusions are gained after simulation by computer.

Key words: multi - static radar; bi - static radar; precision of localization