

## 单双基地复合高频地波雷达网定位精度分析

宗 华 权太范 宗成阁 马莹莹

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 单基地高频地波雷达易受到电子干扰、隐身武器等威胁, 建立单双基地复合高频地波雷达网是解决这一问题最易工程实现的途径。该文首次以单双基地复合高频雷达网为背景, 针对高频地波雷达沿海面绕射的特点采用曲面定位分析推导和仿真系统的探测精度, 给出定位精度曲线, 并得到单双基地复合高频地波雷达网各测量子集在不同探测区域的精度分布, 为高频雷达组网的探测、跟踪及融合提供理论基础。

**关键词:** 高频地波雷达; 单双基地复合雷达网; 定位精度

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)05-1108-05

## Positioning Accuracy in Monostatic-Bistatic Composite High Frequency Surface Wave Radar Network

Zong Hua Quan Tai-fan Zong Cheng-ge Ma Ying-ying

(Research Institute of Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Monostatic High Frequency (HF) surface wave radar is vulnerable by the threat of electronic disturbance, stealth targets and so on, and the establishment of monostatic-bistatic composite HF radar network is the most achievable way to solve this problem. In this paper, based on the monostatic-bistatic composite HF radar network, the positioning principle and the detection accuracy are derived and simulated using curved face position analysis, the position precision curve is supplied and a high accuracy subset distributing picture is presented so as to provide a theoretical base of detecting, tracking and data fusion for the HF radar netting.

**Key words:** High-frequency surface wave radar; Monostatic-bistatic composite HF radar network; Positioning accuracy

### 1 引言

高频地波雷达利用垂直极化电磁波沿海面传播损耗低的特点, 可以实现对海面运动目标和低空飞行目标的超视距探测。利用高频地波雷达进行超视距探测, 可以填补微波雷达与天波超视距雷达所探测不到的盲区, 三者的联合使用可构成完整的防御观察体系。然而, 单基地高频地波雷达易受到电子干扰、隐身武器的威胁, 利用现有的单基地高频地波雷达, 增设设置的接收系统, 并使它与原雷达发射系统协同工作, 即可构成双基地T/R-R体制, 即单双基地复合高频雷达网<sup>[1]</sup>。这样不但在工程上易于实现, 还大大提高高频雷达的电子战防御能力, 这是目前我国海防预研课题之一。

由于高频雷达是利用垂直极化电磁波沿海面传播从而实现超视距探测的, 因此基于高频雷达的双基地T/R-R的探测范围和定位精度不同于传统的微波雷达, 本文首次针对高频地波雷达单双基地复合网的定位原理及探测精度进行了分析和推导, 为单双基地复合雷达网的探测、跟踪及融合提供理论基础。

### 2 系统构成

单双基地复合高频雷达网的平面几何关系和符号含义如图1所示。双基地平面由发射基地(用T/R表示, 既是发射源, 也可以接收目标回波), 接收基地(用R表示)及目标(用S表示)构成。图中, 发射基地与接收基地之间的连线称为基线, 其长度 $L$ 称为基线距离。 $\varphi_T$ 和 $\varphi_R$ 分别为双基地平面上以发射基地和接收基地为本地坐标原点的方位角, 也称为双基地平面上的目标视角。本文是以数学上的习惯来定义的, 即以 $x$ 轴为正向(与基线重合)为起点逆时针旋转为正。 $r_T$ 为发射站到目标的距离,  $r_R$ 为目标至接收站的距离。通常, 在接收站所测量的距离是从发射站经目标反射后到达接收站的距离和, 即 $\rho_R = r_T + r_R$ 。由于几何结构的对称性, 研究问题时只考虑上半平面即可。

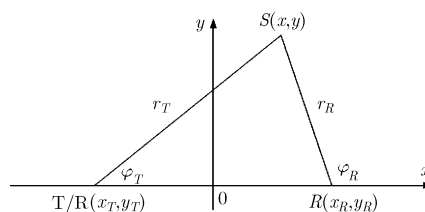


图1 单双基地复合雷达网平面上的几何构成

为讨论问题方便, 同时又不妨碍一般性结论的得出, 分析中作如下的假设:

(1) 发射站和接收站都是陆基固定配置的;

(2) 暂不计及大气折射效应, 设定信号沿发射站、目标及接收站之间是直线传播的;

(3) 暂不计及多路径效应;

(4) 各测量误差经系统修正后是零均值的, 且服从高斯分布; 而测量得到的站址误差也是高斯分布的, 但在每次测量中则是保持不变的; 站址误差各分量之间、各站址误差之间及观测误差之间互不相关<sup>[2-4]</sup>。

### 3 目标定位原理

单基地雷达的目标定位, 是一个直线型的结构, 理论上只要解决了雷达和目标两点的几何关系就可以解决。而对于双基地高频雷达系统, 采用高频电磁波沿地球表面绕射从而达到克服地球曲率的限制实现超视距探测及跟踪目标。因此它的目标定位是一个发射基地、接收基地和目标三者的球面三角形定位的关系。它的距离速度测量方法全部都是利用球面三角形和椭圆、双曲线之间几何的关系解决的, 较之于平面单基地雷达模型, 要复杂许多。

对于 T/R-R 型双基地雷达系统, 理论上可以得到 4 个直接测量参量, 由于 T/R 站要辐射电磁能量, 因而容易受到干扰, 根据双基地系统所处的工作环境, T/R 站的观测数据有时不可能同时获得, 特别是受到强干扰时, 根本无法观测到目标的任何信息, 这时 T/R 站只起照射作用。而根据双基地定位原理, 得到两组直接测量参量就可以进行定位分析。因此, 根据可能获得的观测量, 存在如下 3 种情况:

(1) 当 4 个观测量  $r_T, \varphi_T, \rho_R, \varphi_R$  可同时获得时, 它们相互组合可得到 6 组可能的最小测量子集单元:  $(\rho_R, \varphi_R)$ ,  $(r_T, \varphi_T)$ ,  $(\rho_R, \varphi_T)$ ,  $(r_T, \varphi_R)$ ,  $(\varphi_T, \varphi_R)$ ,  $(\rho_R, r_T)$ , 其中除前两组子集之间不相关外, 其它各组测量子集之间是相关的。

(2) 当双基地系统只能获得 3 个观测量时:

(a) 3 个观测量为  $\varphi_T, \rho_R, \varphi_R$  时, 可获得 3 组可能的最小测量子集单元, 且 3 组子集之间是相关的:  $(\rho_R, \varphi_R)$ ,  $(\rho_R, \varphi_T)$ ,  $(\varphi_T, \varphi_R)$ ;

(b) 3 个观测量为  $\rho_R, \varphi_R, r_T$  时, 可获得如下 3 组可能的最小子集单元, 且 3 组子集之间是相关的:  $(\rho_R, \varphi_R)$ ,  $(r_T, \varphi_R)$ ,  $(\rho_R, r_T)$ 。

(3) T/R 只起照射作用时, 只能获得测量  $(\rho_R, \varphi_R)$ , 这时目标位置完全由 R 站来确定。

在上述 3 种情况中, 其中测量子集  $(\rho_R, r_T)$  和  $(r_T, \varphi_R)$  不能独立地确定目标位置, 因为定位曲线在平面上有可能相交于两点, 即存在定位模糊问题, 为消除这一现象, 必须借助其它信息(如方向角信息等)。第 1 种情况包含了后两种情况的所有子集, 因此本文主要以第 1 种情况为例来进行讨论。

#### 3.1 平面定位原理

如图 1 所示, 发射站 T/R 发射雷达信号并跟踪目标方

向, 同时测量目标距离  $r_T$ , 方位角  $\varphi_T$ ; 接收站 R 测量距离和  $\rho_R$  和方位角  $\varphi_R$ 。T/R 站所获得的数据传输到 R 站(或反过来亦可)进行处理<sup>[5,6]</sup>。

与测量子集  $(\rho_R, \varphi_R)$  对应的目标位置解为

$$\begin{cases} x = x_R + r_R \cos \varphi_R \\ y = y_R + r_R \sin \varphi_R \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中

$$r_R = \frac{\rho_R^2 - [(x_R - x_T)^2 + (y_R - y_T)^2]}{2[\rho_R + (x_R - x_T) \cos \varphi_R + (y_R - y_T) \sin \varphi_R]} \quad (2)$$

式(2)中

$$\begin{cases} \rho_R = \sqrt{(x - x_T)^2 + (y - y_T)^2} + \sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2} \\ \varphi_R = \arctg \frac{y - y_R}{x - x_R} \end{cases} \quad (3)$$

由于测量数据是有误差的, 即

$$\begin{cases} \rho_R^m = \rho_R + d\rho_R \\ \varphi_R^m = \varphi_R + d\varphi_R \end{cases} \quad (4)$$

其中上标  $m$  表示带有噪声的实测值;  $d\rho_R, d\varphi_R$  分别表示距离和、方位角的观测误差。在实际应用时, 由于不可能获得真实数据  $\rho_R, \varphi_R$ , 因此通常利用实测数据  $\rho_R^m, \varphi_R^m$  代替其真实数据  $\rho_R, \varphi_R$ , 从而得到有误差的目标位置的近似值。

假设各测量误差是零均值、彼此不相关的高斯白噪声, 且对应于距离和、方位角及站址各分量误差的标准差分别为  $\sigma_\rho, \sigma_\varphi$  和  $\sigma_s$ 。 $\sigma_\rho$  和  $\sigma_\varphi$  与目标的反射特性及目标的距离都有关。在本文分析过程中, 假设观测误差取最大值, 因此标准差是恒值的。

对式(3)求微分得到定位误差方程为

$$\begin{bmatrix} d\rho_R \\ d\varphi_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_T & \cos \varphi_T \\ r_T & r_T \\ -\sin \varphi_R & \cos \varphi_R \\ r_R & r_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_R + k_T \\ k_{\varphi,R} \end{bmatrix} \quad (5)$$

或写成

$$d\mathbf{V} = \mathbf{C}d\mathbf{X} + d\mathbf{X}_s \quad (6)$$

式中  $d\mathbf{V} = [d\rho_R \quad d\varphi_R]^T$ ,  $d\mathbf{X} = [dx \quad dy]^T$ ,  $d\mathbf{X}_s = [k_T + k_R \quad k_{\varphi,R}]^T$ 。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{R1} + c_{T1} & c_{R2} + c_{T2} \\ -\sin^2 \varphi_R & \cos^2 \varphi_R \\ y - y_R & x - x_R \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中

$$c_{i1} = \frac{x - x_i}{r_i} = \cos \varphi_i, \quad c_{i2} = \frac{y - y_i}{r_i} = \sin \varphi_i, \quad (i = R, T),$$

$$k_i = -(c_{i1} dx_i + c_{i2} dy_i), (i = R, T), \quad k_{\varphi,R} = \frac{\sin^2 \varphi_R}{y - y_R} dx_R + \frac{\cos^2 \varphi_R}{x - x_R} dy_R。$$

由式(6)可得目标位置误差矢量

$$d\mathbf{X} = \mathbf{C}^{-1}[d\mathbf{V} - d\mathbf{X}_s] \quad (8)$$

式(8)表明, 目标位置在直角坐标系中的误差  $(dx, dy)$  与测量

误差  $(d\rho_R, d\varphi_R)$  及站址误差  $(dx_T, dy_T), (dx_R, dy_R)$  成线性关系, 而且高斯分布仍然有效。因此  $(dx, dy)$  是零均值高斯分布的随机变量。

定位误差协方差矩阵为

$$\mathbf{P}_{dx} = \mathbf{C}^{-1} \{ E[d\mathbf{V}d\mathbf{V}^T] + E[d\mathbf{X}_s d\mathbf{X}_s^T] \} \mathbf{C}^{-T} \quad (9)$$

式中  $E[d\mathbf{V}d\mathbf{V}^T] = \text{diag}[\sigma_{\rho_R}^2, \sigma_{\varphi_R}^2]$ ,  $E[d\mathbf{X}_s d\mathbf{X}_s^T] = \text{diag}[2\sigma_s^2, \sigma_s^2/r_R^2]$

定义

$$\mathbf{P}_{dx} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

则定位精度可表示为

$$\text{GDOP} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (11)$$

或者等概率误差椭圆面积

$$\mathbf{E} = \pi \sqrt{|\mathbf{P}_{dx}|} \quad (12)$$

### 3.2 曲面定位原理

当基线距离不大而目标离收、发基地又不是很远(如均小于视距)时, 可以近似地采用上面的平面计算方法。但高频雷达是利用地波沿海面绕射原理实现超视距探测的, 如果基线距离较长, 高频地波雷达探测超视距目标时, 即应采用曲面的分析方法。双基地雷达在曲面上的几何布局如图2所示。

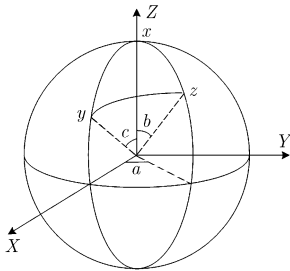


图2 球坐标系示意图

$x, y, z$  为球面上的3点, 这里他们代表接收基地, 发射基地和目标。这3点构成了一个球面三角形。 $a = \theta, b = \psi_{r_0}, c = \psi_{t_0}$  代表了这3点与球心的连线之间的夹角,  $\alpha$  表示弧  $\widehat{xy}$  的切线与  $\widehat{xz}$  的切线之间的夹角, 在双基地系统中, 表示的是接收基地的目标视角  $\varphi'_R$ , 同理  $\beta$  表示发射基地的目标视角  $\varphi'_T$ 。根据球面, 双曲几何和球面空间几何中球面三角形的知识可以得到球面三角形的几个性质:

$$\cos \psi_{r_0} = \cos \theta \cdot \cos \psi_{t_0} + \sin \theta \cdot \sin \psi_{t_0} \cdot \cos \varphi_T \quad (13)$$

$$\frac{\sin \varphi_R}{\sin \psi_{t_0}} = \frac{\sin \varphi_T}{\sin \psi_{r_0}} = \frac{\sin \gamma}{\sin \theta} \quad (14)$$

$$\varphi_R + \varphi_T + \gamma > \pi \quad (15)$$

如果将双基地高频雷达系统测得的基本参量从球面上转化到  $XOY$  平面上, 那么目标的位置以及定位精度就可以转化为平面定位方法进行确定。经过推导可知, 球面上的直接测量参量  $\rho'_R, \varphi'_R, r'_T, \varphi'_T$  与平面上相应的值  $\rho_R, \varphi_R, r_T, \varphi_T$  的

转换关系如下:

$$r_T = 2R \sin(r'_T/2R), \quad r_R = 2R \sin(r'_R/2R),$$

$$\text{tg} \varphi_R = \text{tg} \varphi'_R \cdot \cos(\theta/2), \quad \text{tg} \varphi_T = \text{tg} \varphi'_T \cdot \cos(\theta/2) \quad (16)$$

以测量子集  $(\varphi_T, \varphi_R)$  为例, 对式(16)两边求微分得

$$\begin{bmatrix} d\varphi_T \\ d\varphi_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 + \text{tg}^2 \varphi'_T \cos \frac{\theta}{2}}{1 + \text{tg}^2 \varphi_T} & 0 \\ 0 & \frac{1 + \text{tg}^2 \varphi'_R \cos \frac{\theta}{2}}{1 + \text{tg}^2 \varphi_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varphi'_T \\ d\varphi'_R \end{bmatrix} \quad (17)$$

令

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1 + \text{tg}^2 \varphi'_T \cos \frac{\theta}{2}}{1 + \text{tg}^2 \varphi_T} & 0 \\ 0 & \frac{1 + \text{tg}^2 \varphi'_R \cos \frac{\theta}{2}}{1 + \text{tg}^2 \varphi_R} \end{bmatrix}, \quad d\mathbf{V}' = \begin{bmatrix} d\varphi'_T \\ d\varphi'_R \end{bmatrix}$$

又知

$$d\mathbf{V} = \begin{bmatrix} d\varphi_T \\ d\varphi_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sin \varphi_T}{r_T} & \frac{\cos \varphi_T}{r_T} \\ -\frac{\sin \varphi_R}{r_R} & \frac{\cos \varphi_R}{r_R} \end{bmatrix} d\mathbf{X} + d\mathbf{X}_s \quad (18)$$

结合式(17)和式(18)可得

$$d\mathbf{X} = \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{B} d\mathbf{V}' - d\mathbf{X}_s) \quad (19)$$

于是得到其定位误差协方差矩阵为

$$\mathbf{P}_{dx} = \mathbf{C}^{-1} \{ \mathbf{B} E[d\mathbf{V}' d\mathbf{V}'^T] \mathbf{B}^T + E[d\mathbf{X}_s d\mathbf{X}_s^T] \} \mathbf{C}^{-T} \quad (20)$$

同理可以得到其他其它测量子集对应的目标位置的求解公式及其误差协方差, 进而得到各种测量子集的定位精度。

## 4 定位精度分析及仿真

### 4.1 测量子集目标定位精度分析

结合前面的分析, 首先做出单双基地高频雷达网仅采用一组测量数据进行定位的定位精度。这里假设发射和接收基地位于  $YOZ$  平面, 且相对于  $Z$  轴对称, 基线长度为 100km。模拟测距的误差标准差为 2km, 测角误差标准差为  $0.3^\circ$ , 对发射和接收基地的定位误差为 50m。6 种组合的定位精度如图3所示, 等值线上的数字为测量误差(km)。

观察图3可以得出以下结论:

(1)测量子集  $(\rho_R, \varphi_R)$  真正反应了双基地系统的特点, 存在一个精度较差的基线区, 越靠近基线, 定位精度越差; T/R 站近区(但不包括基线区)的定位精度较高, 而且距 T/R 站越近, 定位精度越高。

(2)测量子集  $(r_T, \varphi_T)$  实际上对应于二维单基地雷达工作的情况。它所对应的 GDOP(Geometrical Dilution of Precision)等值线是一族以 T/R 站为圆心的同心圆, 距 T/R 站越近, 定位精度越高。改变 T/R 站的位置, GDOP 等值线的形状和数值基本上保持不变, 只是同心圆的圆心随 T/R 站的位置而改变; 测量误差增大, 各等值线的形状仍为一族同心圆, 但其误差值将增大。

(3)测量子集  $(\rho_R, \varphi_T)$  的趋势与  $(\rho_R, \varphi_R)$  比较相像, 基本呈对称关系。基线区定位精度较差, R 站近区(但不包括基线

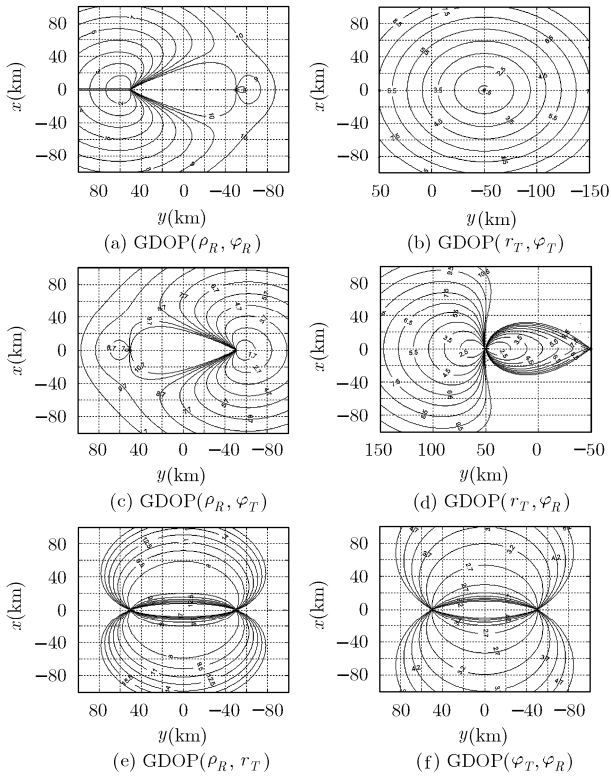


图 3 利用单组测量子集定位的精度曲线

区)的精度最高, 距  $R$  站越近, 定位精度越高。

(4)测量子集  $(r_T, \varphi_R)$  对应的 GDOP 分布图中, 接收机偏离发射站一侧定位精度最高, 其次是基线区和发射站附近。中间区与基线区之间存在一个定位精度比较差的过渡带。

(5)测量子集  $(\rho_R, r_T)$  对应的 GDOP 分布图可划分为 3 个目标位置区: 宽边区, 覆盖了大部分区域, 具有真正的双基地特性, GDOP 等值线离基线向外扩展, 精度缓慢下降; 基线区, 定位精度较差, 越靠近基线精度下降越快; 侧边区, 定位精度较差, 其形状分别以两站为顶点向外扩散。观测误差变小时, 宽边区覆盖范围扩大, 整个受控区域的定位精度提高; 改变 T/R 站位置使基线拉长时, 宽边区和侧边区的定位精度有所提高, 基线区的定位精度稍有下降。

(6)测量子集  $(\varphi_T, \varphi_R)$  对应的 GDOP 分布与变化趋势都与  $(\rho_R, r_T)$  比较类似。但是对于高频雷达来说, 由于它的探测范围非常远, 所以测角精度对 GDOP 曲线的影响较大, 即在大部分区域内  $(\varphi_T, \varphi_R)$  的定位精度都低于  $(\rho_R, r_T)$  的定位精度。

比较各测量子集的 GDOP 等值线分布图可以看出, 不同的测量子集对应的定位精度相差比较明显, 这就需要对所有测量子集进行筛选, 选取定位精度较高的几组子集来进行定位处理。

#### 4.2 各测量子集定位精度比较

由前面分析可知, 不同测量子集的定位性能有差异, 因此有必要找出不同空间区域中精度最高的是哪一个子集。在

雷达系统探测范围内比较了各个测量子集的定位精度, 绘出了高精度测量子集分布图(如图 4), 并统计出各子集在高精度分布图上所占区域的比例(如表 1 所示)。

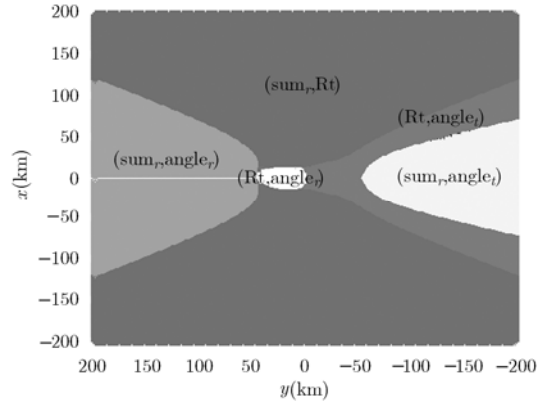


图 4 高精度测量子集分布图

表 1 各高精度测量子集所占区域的比例(%)

测量子集	$(\rho_R, \theta_R)$	$(r_T, \theta_T)$	$(\rho_R, \theta_T)$
所占比例	12.823	6.047	10.608
测量子集	$(r_T, \theta_R)$	$(\theta_T, \theta_R)$	$(\rho_R, r_T)$
所占比例	2.6262	0	67.896

从高精度测量子集分布图中可以看出, 能获得较高精度的测量子集分布在 5 个目标位置区, 如图 4 所示, 其中子集  $(\rho_R, r_T)$  占据的区域范围最大, 分布在对称于基线的上下两个宽边区, 说明  $(\rho_R, r_T)$  对应的定位精度较高; 测量子集  $(\varphi_T, \varphi_R)$  在图中几乎不出现, 说明  $(\varphi_T, \varphi_R)$  对应的定位精度最差; 子集  $(r_T, \varphi_T)$  和  $(r_T, \varphi_R)$  分别占据 T/R 站和 R 站附近两个对称的较小区域; 而  $(\rho_R, \varphi_T)$  和  $(\rho_R, \varphi_R)$  则占据 T/R 站和 R 站外侧的对称区域。

从统计表 1 中可知, 测量子集  $(\rho_R, \varphi_R)$ ,  $(r_T, \varphi_T)$ ,  $(\rho_R, \varphi_T)$  和  $(\rho_R, r_T)$  所占区域比例较大, 它们占据了 97% 以上的区域, 说明这些子集对应的定位精度比较高, 而其他两组子集对应的定位精度比较差。

## 5 结束语

单双基地复合高频雷达网对目标探测可以得到 4 个基本参量, 可两两组合成 6 个最小测量子集。本文首次针对高频雷达单双基地复合网的定位原理及探测精度进行了分析和推导, 通过仿真实验得到了该系统的高精度测量子集分布图, 对系统探测跟踪精度参数的确定提供了有效的依据, 并指导系统在观测区域选择何种测量子集进行目标跟踪和数据融合, 从而提高跟踪精度和识别效率。

## 参考文献

[1] 杨振起, 张永顺, 骆永军. 双(多)基地雷达系统. 北京: 国防

- 工业出版社, 1998: 1-110.
- [2] Lane L and Alexander T. The bistatic coherent measurement system (BICOMS). The International Society for Optical Engineering, Orlando, FL, United States, 1998: 37-47.
- [3] 宋杰, 何友, 蔡复青, 唐小明. 非合作双基地雷达参数测量与定位方法研究. 系统工程与电子技术, 2008, 30(7): 1206-1209.
- [4] Farina A and Hanle E. Position accuracy in netted monostatic and bistatic radar. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1983, 19(4): 513-520.
- [5] Johnson T and Olsen K E. Hitchhiking bistatic radar: principles, processing and experimental findings. IEEE 2007 Radar Conference, Waltham, MA, United States, 2007: 518-523.
- [6] 王鼎. 基于T-R型双基地雷达系统的定位算法研究. 电子信息对抗技术, 2008, 7(4): 16-21.
- 宗 华: 女, 1981年生, 博士生, 从事数据融合、雷达数据处理等研究工作.
- 权太范: 男, 1949年生, 教授, 博士生导师, 主要从事智能信号处理、数据融合、目标跟踪等研究工作.
- 宗成阁: 男, 1954年生, 研究员, 主要从事信号处理器、非线性信号处理等工作.