

双基地及其联网系统的定位方法及精度分析

何黎星 孙仲康

(国防科技大学电子技术系, 长沙, 410073)

THE LOCATION METHOD AND ACCURACY ANALYSIS IN BISTATIC AND ITS NETTED SYSTEMS

He Li-xing, Sun Zhong-kang

(Department of Electronic Technology, National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

摘要 讨论的双基地系统中, 发射站只起照射目标的作用, 而接收站测量距离和、方位角及俯仰角。分析了双基地系统的目标定位方法和定位误差。通过分析定位精度在受控区域内的分布, 揭示了双基地系统的定位性能。文中对组网双基地系统的定位处理方法进行了讨论, 其中采用WLS(Weighted Least Square)算法进行数据融合处理, 仿真结果表明, 联网双基地系统的定位精度大有提高。

关键词 双 多基地雷达, 目标定位, 无线电导航

Abstract The bistatic system considered in this paper consists of one transmitter and one receiver at different sites, in which the transmitter only emits radar signal, and the receiver measures range sum, azimuth and elevation angles. The target location method and position errors are analyzed. By analyzing the region distribution of target position accuracy in the controlled airspace, the location characteristics of the bistatic system are found. The location problem for netted bistatic systems is discussed, and the algorithm WLS (Weighted Least Squaer) is used for data fusion. It is shown that position creation accuracy is improved greatly in the netted bistatic systems.

Key words bistatic / multistatic radar, target location, radionavigation

双基地系统具有抗反辐射导弹、抗隐身目标、抗综合电子干扰、抗侦察的能力^[1-3], 因而在现代电子战环境中倍受青睐。本文所考虑的双基地系统中, 分置两地的发射站和接收站通过时域、空域、频域的严格同步后, 接收站可测得发射信号经目标反射到达该站的传播时间及方向信息。其中时间量测值对应于信号传播的总路径(距离和), 它确定了一个旋转椭球面, 方位角和俯仰角分别确定了一个半平面和一个旋转圆锥面。这3个曲面的交点即确定了目标的位置。

从后续的分析中可知, 双基地系统在基线区定位效果较差, 为了弥补这一缺陷, 最为有效的办法就是增加被动接收站的数目, 从而构成一发多收的多基地系统。其中将发射站与每个接收站配对成双基地系统, 就构成了本文所要讨论的联网双基地系统。

1 双基地系统的定位方法及定位误差

1.1 定位方法

如图1所示, 发射站 $T(x_T, y_T, z_T)$ 只起照射作用, 接收站 $R(x_R, y_R, z_R)$ 测量距离和

1992年1月3日收到, 1992年6月15日收到修改稿

ρ_R 、方位角 φ_R 及俯仰角 ε_R ，则有：

$$\left. \begin{aligned} \rho_R &= r_T + r_R \\ \varphi_R &= \text{tg}^{-1} \frac{y - y_R}{x - x_R} \\ \varepsilon_R &= \text{tg}^{-1} \frac{z - z_R}{\sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由式(1)可解得目标位置坐标为

$$\left. \begin{aligned} x &= x_R + r_R \cos \varepsilon_R \sin \varphi_R \\ y &= y_R + r_R \cos \varepsilon_R \sin \varphi_R \\ z &= z_R + r_R \sin \varepsilon_R \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

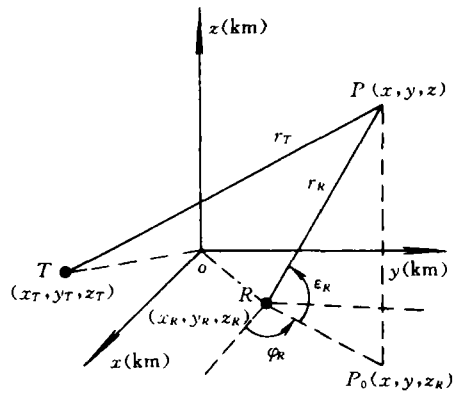


图 1 目标与双基地系统的位置关系

其中

$$r_R = \frac{\rho_R^2 - [(x_R - x_T)^2 + (y_R - y_T)^2 + (z_R - z_T)^2]}{2[\rho_R + (x_R - x_T)\cos \varepsilon_R \cos \varphi_R + (y_R - y_T)\cos \varepsilon_R \sin \varphi_R + (z_R - z_T)\sin \varepsilon_R]} \quad (3)$$

实际应用中将带有误差的观测数据代入(2)式~(3)式，可求得目标位置的近似值。

1.2 定位误差

假设影响 ρ_R 、 φ_R 、 ε_R 及站址各分量的测量误差是不相关的零均值高斯分布的随机过程，通常具有固定的标准偏差^[3]，分别为 σ_ρ 、 σ_φ 、 σ_ε 和 σ_{x_i} 。对(1)式两边求微分得

$$\begin{bmatrix} d\rho_R \\ d\varphi_R \\ d\varepsilon_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{R1} + C_{T1} & C_{R2} + C_{T2} & C_{R3} + C_{T3} \\ -\frac{\sin^2 \varphi_R}{y - y_R} & \frac{\cos^2 \varphi_R}{x - x_R} & 0 \\ -\frac{C_{R3} \cos \varphi_R}{r_R} & -\frac{C_{R3} \sin \varphi_R}{r_R} & \frac{\cos \varepsilon_R}{r_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_R + k_T \\ k_\varphi \\ k_\varepsilon \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{或} \quad dv = Cdx + ds \quad (5)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} C_{i1} &= \frac{x - x_i}{r_i}, \quad C_{i2} = \frac{y - y_i}{r_i}, \quad C_{i3} = \frac{z - z_i}{r_i}, \quad (i = R, T) \\ k_i &= -[C_{i1} dx_i + C_{i2} dy_i + C_{i3} dz_i] \\ k_\varphi &= \frac{\sin^2 \varphi_R}{y - y_R} dx_R - \frac{\cos^2 \varphi_R}{x - x_R} dy_R \\ k_\varepsilon &= \frac{C_{R3} \cos \varphi_R}{r_R} dx_R + \frac{C_{R3} \sin \varphi_R}{r_R} dy_R - \frac{\cos \varepsilon_R}{r_R} dz_R \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由式(5)可解得目标位置误差

$$dx = C^{-1}[dv - ds] \quad (7)$$

对应的误差协方差矩阵为

$$P_{dx} = C^{-1} \{ E[dv \ dv^T] + E[ds \ ds^T] \} C^T \tag{8}$$

其中

$$E[dv \ dv^T] = \text{diag}[\sigma_v^2 \ \sigma_\omega^2 \ \sigma_\epsilon^2] \tag{9}$$

$$E[ds \ ds^T] = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_R^2 \cos^2 \epsilon_R} & \frac{(\sin \phi_R - \cos \phi_R) \sin^2 \phi_R \sin \epsilon_R}{2r_R} \\ 0 & \frac{(\sin \phi_R - \cos \phi_R) \sin 2\phi_R \sin \epsilon_R}{2r_R} & \frac{1}{r_R^2} \end{bmatrix} \sigma_s^2 \tag{10}$$

1.3 定位精度分析

采用目标位置的均方根误差 RMS(Root Mean Squart)来表示目标的定位精度^[4]。由于这个技术参数与目标位置及站的布局有关，因此称之为 GDOP(Geometrical Dilution of Position)。

定义 $GDOP = \sqrt{\text{tr}[P_{dx}]}$ (11)

图 2 和图 3 给出了 GDOP 等值线的区域分布图。由图中可以看出：双基地系统的基线区定位精度较差，离基线越近定位精度越差；在接收站近区(不包括基线区)的定位精度较高。基线拉长时，受控区域内定位精度下降，在基线区下降更为明显。计算结果也表明，测量误差增大时，定位精度下降，特别是角度测量误差对其影响更突出；双基地系统对高空目标的定位精度较低空目标要好些。

基于上述结论，为充分利用双基地系统的高性能区域，应尽量使基线方向对准预计目标的进入方向。同时将发射站置于后方，将接收站安置在前沿阵地。

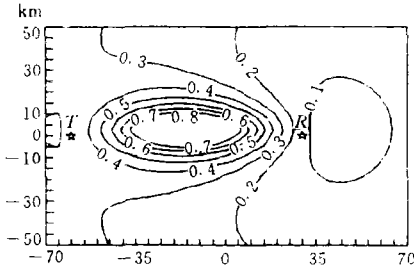


图 2 双基地系统的 GDOP 分布
 $\sigma_\rho = 100\text{m}$, $\sigma_\phi = \sigma_\epsilon = 3\text{m} \cdot \text{rad}$, $T(-60, 0, 0)\text{km}$,
 $R(30, 0.1, 0.1)\text{km}$, 目标高度 $z = 10\text{km}$

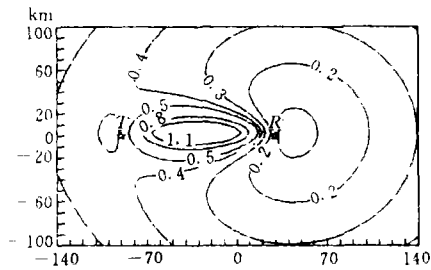


图 3 双基地系统的 GDOP 分布
 $T(-90, 0, 0)\text{km}$
 (其余测试条件同图 2)

2 联网双基地系统的定位方法及精度分析

在联网双基地系统中，所有接收波束只要能准确保持对发射波束所经过空域的同步瞄准，则接收站总能收到来自被发射波束照射目标的回波能量，从而获得有关该目标的距离和、到达方向信息。在联网双基地系统中，首先每个双基地系统利用所测得的目标信息，按照上节所讨论的方法独立地对目标进行定位，然后将处理结果送至中央处理机，在此进

行点迹相关、数据融合等处理。

为便于数据处理，在此采用统一的直角坐标系。假设各接收站的测量噪声是彼此独立的零均值高斯过程。对同一目标来说，设由第 i 个双基地系统定位得到的位置矢量及其误差协方差矩阵分别为 $\mathbf{x}^{(i)}$ 和 $\mathbf{P}^{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, M$)，则在中央处理机采用 WLS 算法进行数据融合后，得到的位置估计值及相应的误差协方差矩阵分别为

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{WLS}} = \hat{\mathbf{P}}_{\text{WLS}} \left\{ \sum_{i=1}^M [\mathbf{P}^{(i)}]^{-1} \right\}^{-1} \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{\text{WLS}} = \left\{ \sum_{i=1}^M [\mathbf{P}^{(i)}]^{-1} \right\}^{-1} \quad (13)$$

图 4 和图 5 给出了 $T-R^3$ 组网双地系统的 GDOP 等值线的区域分布图。图中：联网双基地系统的定位精度大幅度提高，特别是在各双基地系统的基线区改善效果更为明显；扩大了高精度区域的覆盖范围；基线拉长时，定位精度稍有下降，但远没有双基地那样明显。计算结果表明联网双基地系统对测量误差的变化没有双基地系统敏感。

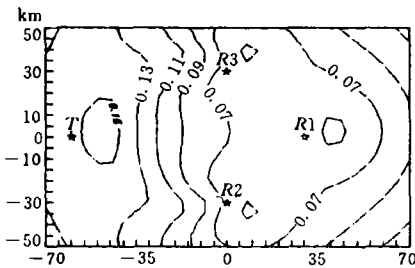


图4 联网双基系统 $T-R^3$ 的 GDOP 分布
 $\sigma_p = 100\text{m}$, $\sigma_\phi = \sigma_\epsilon = 3\text{mrad}$, $T(-60, 0, 0)\text{km}$
 $R_1(30, 0.1, 0.1)\text{km}$, $R_2(0.1, 30, 0.1)\text{km}$,
 $R_3(0.1, -30, 0.1)\text{km}$ $z = 10\text{km}$

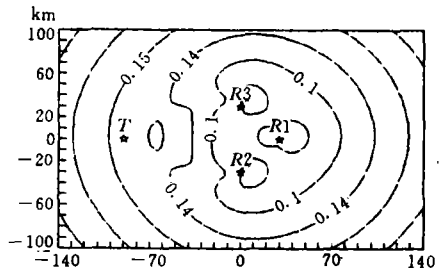


图5 联网双基系统 $T-R^3$ 的 GDOP 分布
 $T(-90, 0, 0)\text{km}$
 (其余测试条件同图4)

3、结束语

着重分析了 T-R 型双基地系统的定位方法和定位误差。特别是通过对其定位精度的分析，揭示出了双基地系统的定位特性。联网双基地系统的定位精度较高，而且扩大了空域的覆盖范围，具有布站灵活、生存能力强等优点，但随之产生的困难就是加大了系统时空同步的技术难度，并使得目标数据相关处理更为复杂。但本文中所采用的方法及得出结论将有助于双/多基地系统的深入研究。

参 考 文 献

- 1 Michael R B. Dunsmore. Bistatic Radar. ALTA FREQUENZA, 1989, IV III(2): 53~79
- 2 Hanle E, Dr Ling. Survey of Bistatic and Multistatic Radar. IEE Pt.F, Dec 1986, 133(7): 587~595
- 3 Farina A 著, 匡永胜等译. 雷达数据处理, 第一卷. 北京: 国防工业出版社, 1988. 138~139
- 4 He Lixing, Sun Zhongkang. Position Location Technique and GDOP Analysis in Multistatic Sytems. Proc CICR' 91, 47~51