

# 制导雷达组网数据融合处理精度分析

刘进忙, 唐晓兵, 王雷

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**讨论了组网条件下影响制导雷达数据融合精度的主要因素,分析了若干主要误差源,采用椭球面、线偏差等高精度计算方法,推导出多测量站支援受援站的计算公式及误差协方差阵,并进行了系统仿真,仿真结果表明了该方法的有效性。

**关键词:**数据融合;雷达组网;精度分析;坐标转换

**中图分类号:**TP274 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)01-0030-04

高精度武器系统的组网作战是复杂环境下对付空袭威胁的一条有效途径。制导雷达组网作战可以有效反隐身、抗干扰等,并使网络内信息资源透明共享,使各作战单元能相互支援,实现体系对抗。

## 1 精度分析理论

精度分析也称误差分析<sup>[1-2]</sup>。大型复杂系统有若干误差源,主要可分为动态误差(滞后产生)、随机误差和静态系统误差3类;也可分为可预测误差和不可预测误差2类,其中不可预测误差是无法补偿的,可采用统计理论进行分析和处理。

对动态误差,一般可采用线性相加法进行合成:  $E_D = E_1 + E_2 + \dots + E_n$

对系统误差,一般可采用带正负号的迭加法合成:  $E_{ST} = E_{S1} + E_{S2} + \dots + E_{SK}$

对随机误差,若满足独立性条件,采用均方根方法合成:  $\sigma_{RMS}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_m^2$

其中,前2种误差可以看成是随机误差的均值。对动态误差和系统误差,可采用测量-校正或补偿的方法减少之,而随机误差可以通过数据融合予以减小。

系统总误差为:  $E^2 = E_D^2 + E_{ST}^2 + \sigma_{RMS}^2$

对大型系统来说,许多误差互相耦合、级联或并联,其关系非常复杂。通常主要考虑较大的误差源。

## 2 误差源分析

制导雷达组网具有测量精度高、计算和通信的实时性要求较高等特点。制导雷达对目标和导弹的位置一般采用相对坐标系来测量和制导。在组网条件下需将相对坐标系的数据转换到绝对坐标系中,从而引入第1级误差;目标坐标经坐标变换到统一坐标系中,并与其它雷达站送来的目标数据进行相关、平滑、融合、外推等引起第2级误差;其结果又送到受援站(相对坐标系),产生第3级误差。

### 2.1 第1级误差

第1级误差主要分为7种:①各雷达的测量误差,包括系统误差和起伏误差,记为  $\Delta\epsilon_0, \Delta\beta_0, \Delta r_0$ ;②坐标轴的定向误差  $\Delta\epsilon_{11}, \Delta\beta_{11}$ ;③随动系统的静差、回差  $\Delta\epsilon_{12}, \Delta\beta_{12}$ ;④随动系统对运动目标的动态误差  $\Delta\epsilon_{13}, \Delta\beta_{13}, \Delta r_{13}$ ;⑤坐标量化误差  $\Delta\epsilon_{14}, \Delta\beta_{14}, \Delta r_{14}$ ;⑥由大气密度引起的测高误差  $\Delta\epsilon_{15}, \Delta r_{15}$ ;⑦伺服系统噪声

收稿日期:2003-01-23

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:刘进忙(1960-),陕西渭南人,教授,主要从事防空指挥自动化信息处理研究。

$\Delta\varepsilon_{16}, \Delta\beta_{16}, \Delta r_{16}$ 。

近似认为第 1 级总误差平方为各误差的平方和。

### 2.2 第 2 级误差

该级误差源较多,主要有系统模型原理性缺陷误差、通信误码、数据关联误差、坐标变换误差、时延(通信、数据处理等)误差、外推误差等。暂不考虑前 3 种误差,则有:①雷达站站址定位误差  $\Delta x_{21}, \Delta y_{22}, \Delta z_{21}$ ;中心站站址定位误差  $\Delta'x_{21}, \Delta'y_{22}, \Delta'z_{21}$ ;②坐标转换误差。由球面坐标(雷达测量坐标)转换到直角坐标,由直角坐标经平移、旋转后变换到中心站直角坐标,其误差为  $\Delta x_{22}, \Delta y_{22}, \Delta z_{22}$ ;③目标航迹滤波、融合处理误差为  $\Delta x_{23}, \Delta y_{23}, \Delta z_{23}$ ;④目标航迹外推误差  $\Delta x_{24}, \Delta y_{24}, \Delta z_{24}$ ,外推时刻由总延迟时间决定,其主要因素有:雷达测量时刻与数据送出雷达终端时刻差  $\Delta t_1$ ;数据在通信信道中由测量站送至中心站的传输时延  $\Delta t_2$ , (取各分布站至中心站的最大时延);数据在中心站、外围站中的处理时延  $\Delta t_3$ ;系统的时间同步误差  $\Delta t_4$ ;数据由中心站送至受援站的时间  $\Delta t_5$ ;数据被雷达系统所采用的时延  $\Delta t_6$ 。若组网系统采用同步周期工作,则至少需要 4~5 个同步周期,以分配给上述各个时延环节。

### 2.3 第 3 级误差

第 3 级误差主要有:①受援站站址定位误差  $\Delta x_{31}, \Delta y_{32}, \Delta z_{33}$ ;②坐标转换误差,即由中心站数据融合后目标坐标转换为受援站的误差  $\Delta x_{32}, \Delta y_{32}, \Delta z_{32}$ ;③坐标轴的定向误差  $\Delta x_{33}, \Delta y_{33}, \Delta z_{33}$ 。

## 3 制导雷达组网数据融合处理精度分析

制导雷达组网数据融合处理过程为:首先将各雷达站测量的球面坐标转换为雷达站的直角坐标,然后再将其转换为中心站的直角坐标,经中心站进行融合、外推处理后,送至受援站,并转换为受援站的球面坐标。

### 3.1 观测雷达站坐标转换精度分析

设在雷达站  $i$  测量到目标的坐标为  $(r_i, \varepsilon_i, \beta_i)$ ,转换为站心地平直角坐标为

$$\begin{cases} x_i = r_i \cos \varepsilon_i \sin \beta_i \\ y_i = r_i \cos \varepsilon_i \cos \beta_i \\ z_i = r_i \sin \varepsilon_i \end{cases} \quad (1)$$

由此可推导出: 
$$W_i = \begin{bmatrix} \sigma_{x_i}^2 & \sigma_{x_{y_i}} & \sigma_{x_{z_i}} \\ \sigma_{y_{x_i}} & \sigma_{y_i}^2 & \sigma_{y_{z_i}} \\ \sigma_{z_{x_i}} & \sigma_{z_{y_i}} & \sigma_{z_i}^2 \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} \sigma_{r_i}^2 & & 0 \\ & r_i^2 \sigma_{\varepsilon_i}^2 & \\ 0 & & r_i^2 \sigma_{\beta_i}^2 \end{bmatrix} A_i^T \quad (2)$$

其中, 
$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_i \sin \beta_i & -\sin \varepsilon_i \sin \beta_i & \cos \varepsilon_i \sin \beta_i \\ \cos \varepsilon_i \cos \beta_i & -\sin \varepsilon_i \cos \beta_i & \cos \varepsilon_i \sin \beta_i \\ \sin \varepsilon_i & \cos \varepsilon_i & 0 \end{bmatrix}, r_i \sigma_{\varepsilon_i}, r_i \sigma_{\beta_i} \text{ 为线偏差。}$$

动态和系统误差需要采用测量-补偿的办法减少。此处仅考虑第 1 级误差的随机部分和测量误差。

### 3.2 由雷达站向中心站直角坐标转换精度分析

设雷达站  $i$  的站址为  $(\lambda_i, \varphi_i, h_i)$ ,其中,  $\lambda_i, \varphi_i$  为该站的经、纬度,  $h_i$  为该站的海拔高度。雷达站  $i$  相对地心直角坐标为

$$\begin{cases} x_{i0} = (N_i + h_i) \cos \varphi_i \cos \lambda_i \\ y_{i0} = (N_i + h_i) \cos \varphi_i \sin \lambda_i \\ z_{i0} = (N_i (1 - e^2) + h_i) \sin \varphi_i \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $N_i = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_i}}, e^2 = 1 - \frac{b^2}{a^2}$ ,  $a, b$  分别为地球椭球的长、短半轴。

将目标相对于站  $i$  的坐标  $(x_i, y_i, z_i)$  先转换成地心直角坐标系,再转换成中心站  $O(\lambda_0, \varphi_0, h_0)$  的地平直角坐标  $(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})$ , 则<sup>[3-4]</sup>

$$V_{0i} = \begin{bmatrix} x_{0i} \\ y_{0i} \\ z_{0i} \end{bmatrix} = R_0^T R_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + R_0^T \begin{bmatrix} x_{0i} - x_{00} \\ y_{0i} - y_{00} \\ z_{0i} - z_{00} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{其中 } R_j = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_j & -\sin \varphi_j \cos \lambda_j & -\cos \varphi_j \cos \lambda_j \\ \cos \lambda_j & -\sin \varphi_j \sin \lambda_j & -\cos \varphi_j \sin \lambda_j \\ 0 & \cos \varphi_j & \sin \varphi_j \end{bmatrix} \quad j = 0, i。$$

其误差协方差阵为

$$P_{0i} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} = R_0^T \left\{ R_i W_i R_i^T + \begin{bmatrix} \sigma_{x_i}^2 + \sigma_{x_0}^2 & & 0 \\ & \sigma_{y_i}^2 + \sigma_{y_0}^2 & \\ 0 & & \sigma_{z_i}^2 + \sigma_{z_0}^2 \end{bmatrix} \right\} R_0 = R_0^T Q_i R_0 \quad (5)$$

$\sigma_{x_i}^2, \sigma_{y_i}^2, \sigma_{z_i}^2$  为雷达站站址定位误差方差, 一般均为  $\sigma_0^2$ , 则根据矩阵公式  $(\alpha I + BCB^T)^{-1} = 1/\alpha [I - B(I + \alpha C^{-1})B^T]$ , 可得  $Q_i^{-1} = 1/2\sigma_0^2 [I - R_i(I + 2\sigma_0^2 W_i^{-1})^{-1} R_i^T]$ 。

### 3.3 中心站数据融合精度分析

同一目标由  $k$  个站联测并将坐标转换到中心站, 得到目标相对中心站的位置矢量及误差协方差阵为

$$\begin{bmatrix} V_{01} & V_{02} & \cdots & V_{0k} \\ P_{01} & P_{02} & \cdots & P_{0k} \end{bmatrix}, \text{经中心站数据融合处理后得目标坐标}(x, y, z) \text{为}$$

$$\begin{aligned} V_0 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= (P_{01}^{-1} + P_{02}^{-1} + \cdots + P_{0k}^{-1})^{-1} (P_{01}^{-1} V_{01} + P_{02}^{-1} V_{02} + \cdots + P_{0k}^{-1} V_{0k}) = \\ &R_0^T (Q_1^{-1} + Q_2^{-1} + \cdots + Q_k^{-1})^{-1} (Q_1^{-1} R_0 V_{01} + Q_2^{-1} R_0 V_{02} + \cdots + Q_k^{-1} R_0 V_{0k}) = \\ &R_0^T \left( \frac{k}{2\sigma_0^2} I - \frac{1}{2\sigma_0^2} \sum_{i=1}^k R_i A_i W_i^{-1} A_i^T R_i^T \right)^{-1} (Q_1^{-1} R_0 V_{01} + Q_2^{-1} R_0 V_{02} + \cdots + Q_k^{-1} R_0 V_{0k}) \end{aligned} \quad (6)$$

误差协方差阵为

$$P_0 = (P_{01}^{-1} + P_{02}^{-1} + \cdots + P_{0k}^{-1})^{-1} = 2\sigma_0^2 R_0^T \left[ kI - \sum_{i=1}^k R_i A_i W_i^{-1} A_i^T R_i^T \right]^{-1} R_0 \quad (7)$$

### 3.4 外推误差分析

$$\text{设目标运动模型为 } \begin{bmatrix} x(t_2 + \Delta t) \\ y(t_2 + \Delta t) \\ z(t_2 + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t_2) \\ y(t_2) \\ z(t_2) \end{bmatrix} + \frac{\Delta t}{t_2 - t_1} \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} + \frac{\Delta t^2}{2} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}, \text{且机动加速度未知。}$$

$$\text{则线性外推模型为 } \begin{bmatrix} x(t_2 + \Delta t) \\ y(t_2 + \Delta t) \\ z(t_2 + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t_2) \\ y(t_2) \\ z(t_2) \end{bmatrix} + \frac{\Delta t}{t_2 - t_1} \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{其误差方差为 } \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta x \text{推}}^2 \\ \sigma_{\Delta y \text{推}}^2 \\ \sigma_{\Delta z \text{推}}^2 \end{bmatrix} \leq \frac{\Delta t^4}{4} \begin{bmatrix} a_{x\text{max}}^2 \\ a_{y\text{max}}^2 \\ a_{z\text{max}}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

可假定  $\sigma_{\Delta x \text{推}}^2 = \sigma_{\Delta y \text{推}}^2 = \sigma_{\Delta z \text{推}}^2 = \sigma_{\Delta \text{推}}^2$ , 则协方差阵可近似为:  $P_{0\text{推}} = \sigma_{\Delta \text{推}}^2 I + P_0$

### 3.5 由中心站向受援站直角坐标转换精度分析

若需要将  $[x(t_2 + \Delta t), y(t_2 + \Delta t), z(t_2 + \Delta t)]^T$  转换为第  $l$  个站的直角坐标, 则

$$V_l = \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} = R_l^T R_0 \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + R_l^T \begin{bmatrix} x_2 - x_{l0} \\ y_2 - y_{l0} \\ z_2 - z_{l0} \end{bmatrix}$$

其误差协方差阵为

$$P_l = R_l^T (R_0 P_{0\text{推}} R_0^T + 2\sigma_0^2 I)^{-1} R_l = R_l^T [(2\sigma_0^2 + \sigma_{\Delta \text{推}}^2) I + (Q_1^{-1} + Q_2^{-1} + \cdots + Q_k^{-1})^{-1}] R_l$$

### 3.6 受援站坐标转换精度分析

进一步, 若将  $(x_i, y_i, z_i)$  转换为  $(r_i, \varepsilon_i, \beta_i)$ 。根据式(1)可计算出目标的  $(r_i, \varepsilon_i, \beta_i)$ , 由式(2)式可计算出目标坐标的误差协方差阵为

$$W_l = \begin{bmatrix} \sigma_{r_l}^2 & r_l \sigma_{r_l \varepsilon_l} & r_l \sigma_{r_l \beta_l} \\ r_l \sigma_{\varepsilon_l} & r_l^2 \sigma_{\varepsilon}^2 & r_l^2 \sigma_{\varepsilon \beta_l} \\ r_l \sigma_{\beta_l \varepsilon_l} & r_l \sigma_{\beta_l \varepsilon_l} & r_l^2 \sigma_{\beta_l}^2 \end{bmatrix} = A_l^T P_l A_l \quad (10)$$

### 3.7 结论

- 1) 受援站得到 $(r_l, \varepsilon_l, \beta_l)$ 的误差协方差并非对角阵,各误差有耦合;
- 2)  $P_l$ 与中心站 $R_0$ 无关,仅与中心站的定位误差 $\sigma_0^2$ 和外推误差 $\sigma_{\Delta推}^2$ 有关。

## 4 仿真实验

根据以上分析,采用蒙特卡罗方法对制导雷达组网数据融合处理精度进行仿真分析。假设有4个雷达站,其中1,2,3站能观测到目标,为支援站,4站为受援站,各站相距为30 km,且已知4个雷达站及中心站的站址坐标, $\sigma_0^2 = 1 \text{ m}^2$ , $\sigma_{\Delta推}^2 = 25 \text{ m}^2$ ,目标高度为3 000 m。

仿真过程为:首先将雷达的测量误差、起伏误差、坐标定位误差等合成为总的观测误差,将各雷达站测量的球面坐标转换为雷达站的直角坐标,然后再将各站观测到的目标坐标转换为中心站的直角坐标,经中心站进行融合、外推处理后,送至受援站,并转换为受援站的球面坐标,得到最后的球面坐标误差。

分3种情况:①只有1个站观测到目标,经中心站处理送至受援站;②有2个站观测到目标,经中心站融合,送至受援站;③有3个站观测到目标,经中心站融合,送至受援站。对每种情况各进行50次仿真,得到的仿真统计结果如表1所示。

表1 数据融合精度分析仿真结果

参与融合的雷达	$\sigma_r/\text{m}$	$\sigma_\varepsilon/(')$	$\sigma_\beta/(')$
雷达1	30.7	7.32	6.47
雷达1,2	22.1	5.22	4.62
雷达1,2,3	15.6	4.56	3.80

从仿真结果可以看出,制导雷达组网数据融合可以提高观测目标的精度,虽然各环节考虑简单,但能说明一些问题。通过仿真,说明了本文精度分析方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] 文仲辉. 战术导弹系统分析[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [2] 王连成. 系统工程与管理指南[M]. 北京:国防工业出版社,1982.
- [3] 刘进忙,张晓刚. 经纬度坐标变换及其在防空 $C^3I$ 系统中的应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2002,3(1),26-29.
- [4] 石红光. 地空导弹武器系统定位和目标定位问题研究[D]. 西安:空军工程大学,2000.

(编辑:田新华)

## Precision Analysis of Data Fusion Process of Guidance Radar Net

LIU Jin-mang, TANG Xiao-bing, WANG Lei

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

**Abstract:** On the condition of radar net, the main factors that effect the precision of guidance radar data fusion is discussed in detail, and several main error sources are analyzed. When one radar station can be supported by a few other radar stations in the guidance radar net, by adopting some high precision approaches such as ellipse globe and linear bias, the data fusion process formula and error matrix of this radar station are derived. The Monte Carlo simulation approach is used to analyze the precision of data fusion in guidance radar net, and the result analysis of simulation is also given.

**Key words:** data fusion; radar net; precision analysis; coordinate conversion