文章编号：2095-4980(2017)02-0215-08

# 多雷达典型条件下串行数据融合算法性能分析

李军侠[1]，杨　森[1]，王　力[2]，张永泉[1]，朱　勇[1]，张晓林[3]

(1.中国船舶工业系统工程研究院，北京 100094；2.清华大学 电子工程系，北京 100084；
3.北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191)

**摘　要：**多雷达组成的信息平台同时接收多组目标数据，数据融合成为这种平台处理数据的必然技术措施。数据融合一方面提高了目标的数据率、目标测量精确度，另一方面为整个平台一体化管控提供方便。串行数据融合算法与单雷达目标跟踪具有相似的工作流程，易于扩展至多雷达平台的使用。该文采用串行数据融合算法验证典型条件下数据融合的性能，这种典型条件是以多部舰载搜索雷达组成的环境。仿真试验结果表明，融合算法能够提高目标跟踪精确度并增大目标探测距离。

**关键词：**点迹融合；点迹串行处理；舰载雷达.

**中图分类号：**TN957　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201702.0215

# Performance analysis of serial data fusion algorithm under typical condition of multi-radar

LI Junxia[1]，YANG Sen[1]，WANG Li[2]，ZHANG Yongquan[1]，ZHU Yong[1]，ZHANG Xiaolin[3]

(1.System Engineering Research Institute of CSSC，Beijing 100094，China；2.Department of Electronic Engineering，Tsinghua University，Beijing 100084，China；3.College of Electronic and Information Engineering，Beihang University，Beijing 100191，China)

**Abstract：**The information platform composed of multi-radar can receive various groups of target data at the same time，and data fusion has become an inevitable technique for this platform to process data. Data fusion can improve the data rate of the target and the target measurement accuracy, meanwhile, it provides convenience for the integrated management and control of the whole platform. Serial data fusion algorithm is similar to the single radar target tracking process，and is easy to expand to the multi-radar platform. Serial data fusion algorithm is utilized to verify the performance of data fusion under the typical conditions of multi radar，and this typical condition is the environment which is composed by the multiple ship-born search radar. The simulation results show that the fusion algorithm can improve the tracking accuracy and increase the target detection range.

**Keywords：**plot fusion；plot serial processing；ship-born radar

近几十年来，美欧诸国重视数据融合的研究理论和实际应用相结合，对数据融合做了全面系统的阐述，如 Blackman 的《Multiple-target Tracking with Radar Application》[1]、D. L. Hall 与 J. Llinas 的《Handbook of Multisensor Data Fusion》[2]等。进入 21 世纪后，美国国防部、海军、空军进一步把数据融合技术作为 C4ISR(Command，Control，Communications and Computers，Intelligence，Surveillance and Reconnaissance)和弹道导弹防御[3]中的关键技术。美国空军将试验新型情报信息融合处理系统，该系统对信息源几乎没有限制，可接受不同平台上光电、雷达或信号情侦装置等各种传感器的实时信息，这些信息处理成精确度更高的信息。英国的 BAE 系统公司已经成功验证了将地面和空中的分散传感器组网互联并融合其信息的技术，这使得传感器节点网络的全部数据都被实时地融合到单一的作战空间中。以数据融合技术为发展背景，多雷达数据融合技术自 20 世纪 80 年代开始，得到了迅速的发展[4-5]。随着数字技术的进步，数据融合逐步由航迹融合、点迹融合向信号层融合跨越发展。从目前的技术水平看，雷达间的同步和数据传输离实际使用存在一定差距，点迹融合处理成为多雷达组网优先发展的技术途径。作为一种多传感器数据融合系统，多雷达系统可分为集中式、分布式、混合式、多级式等几种结构[6]。在集中式多雷达系统中，各单部雷达获得的点迹数据都将直接传送到融合中心来形成统一的系统航迹。集中式结构往往具

**收稿日期：**2016-10-14；**修回日期：**2016-11-14

有比分布式结构更高的融合精确度，并且可以避免分布式结构在航迹关联时的一些困难，正是这些优点使得集中结构在实际工程中得到广泛应用。集中式多雷达数据处理方法可分为 2 类：点迹合并式和串行合并式[7–8]。点迹合并又称为数据压缩的方法。串行合并又称为点迹—航迹合并算法。串行方式较点迹合并式处理流程简单[9]，它在实际中有着广泛的应用。它是将多雷达数据组合成类似单雷达的探测点迹用于点迹—航迹的互联。

传统上舰载雷达设备独立完成本舰作战任务的预警和探测，随着舰船规模、陆海空一体以及电子对抗等因素逐步发展，现代战争的任务需求多元化，一部雷达已经无法完整承担探测任务，多雷达的融合处理以及多舰船间的雷达融合处理成为迫切需求[10–11]，传统舰载雷达的升级有重要的现实意义。

本文分析了典型舰载多雷达的数据融合需求，通过串行数据融合算法仿真分析了多雷达数据融合的效能。

## 1 串行数据融合算法

点迹串行处理方法是将多雷达数据组合成类似单雷达的探测点迹，然后进行点迹航迹的关联。点迹串行处理方法的显著特点是合成的数据流的数据率加大，点迹串行处理方法是将多部雷达组合成雷达单部的探测点迹用于点迹航迹更新，大大提高了多搜索雷达组网系统的反低空突防目标和反低空巡航导弹的能力。

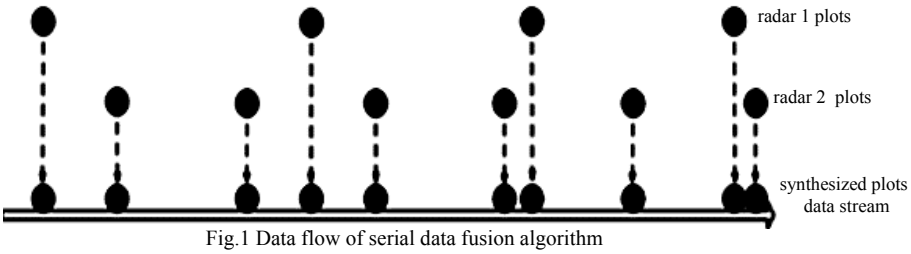



Fig.1 Data flow of serial data fusion algorithm
图 1 串行点迹数据流示意图

点迹数据流的合成原理如图 1 所示。图中横轴代表时间，点表示探测点迹。多雷达串行数据融合算法的流程图如图 2 所示。多雷达串行数据融合包含：点迹空间对准、点迹数据关联、点迹/航迹滤波、航迹起始和航迹输出等步骤。

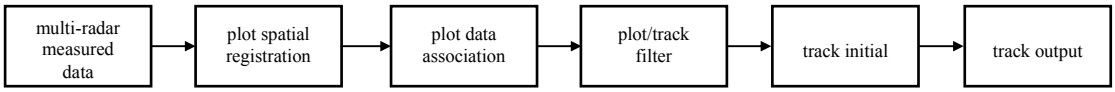



Fig.2 Serial data fusion algorithm of multi-radar
图 2 多雷达串行数据融合算法

### 1.1 空间对准技术

假设融合中心为坐标原点(见图 3)，其中某部雷达(假设为雷达 1)的坐标为$[a,b]$(直角坐标系下)，并且此扫描雷达得到的目标量测信息为 $z'=[\tilde{r}',\tilde{\theta}']$，这里量测 $z'$ 是在此雷达为原点的坐标系下得到的，因此需要将此雷达的量测 $z'$ 转换到融合坐标为原点的坐标系下，这样多部雷达的点迹才可在一个统一的坐标系下进行处理，则上述目标量测在融合中心坐标系下的量测坐标为：

$$\begin{cases}\tilde{x}=\tilde{r}'\cos\left(\tilde{\theta}'\right)+a\\ \tilde{y}=\tilde{r}'\sin\left(\tilde{\theta}'\right)+b\\ \tilde{r}=\sqrt{\tilde{x}^2+\tilde{y}^2}\\ \tilde{\theta}=\arctan\left(\tilde{y}/\tilde{x}\right)\end{cases}\tag{1}$$

由式(1)可得融合中心坐标系下目标的直角坐标$[\tilde{r}',\tilde{\theta}']$转换为$[\tilde{r},\tilde{\theta}]$。

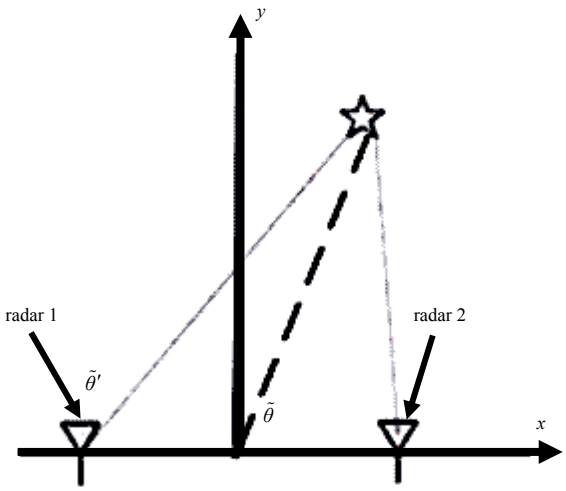



Fig.3 Space aligning diagram
图 3 空间对准示意图

### 1.2 数据关联方法

最近邻方法是利用先验统计特性估计相关性能的滤波器。最近邻标准滤波器的原理是先设置跟踪门，由跟踪门(相关波门)初步筛选所得到的回波成为候选回波，以限制参与相关判别的目标数目。如上章所述，跟踪门是跟踪空间中的一块子区间，中心位于目标的预测位置，相关门大小设计应保证同一目标的量测落入相关门内。以 2 部雷达为例，可将第 1 部雷达的点迹作为目标点迹，假设雷达 1 的第 $i$ 个点迹为 $z_1(i)$，若雷达 2 的第 $j$ 个点迹满足：

$$\left(z_2\left(j\right)-z_1\left(i\right)\right)^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}\left(i\right)\left(z_2\left(j\right)-z_1\left(i\right)\right)\leqslant\gamma \tag{2}$$

则认为雷达 1 的第 $i$ 个点迹与雷达 2 的第 $j$ 个点迹互联，其中 $\gamma$ 代表波门大小，$\boldsymbol{R}$ 代表雷达 1 量测 $z_1\left(i\right)$ 的协方差矩阵。需要注意的是，上述相关波门采用的是椭圆波门，若对关联精确度要求较低，可采用矩形波门等。矩形波门是指，若 $z_1\left(i\right)=\left[x_1(i),y_1(i)\right]$，$z_2\left(j\right)=\left[x_2(j),y_2(j)\right]$，设 $x$ 方向距离容限为 $D_x$，$y$ 方向的距离容限为 $D_y$，则满足：

$$\left|x_2\left(j\right)-x_1\left(i\right)\right|\leqslant D_x，且\left|y_2\left(j\right)-y_1\left(i\right)\right|\leqslant D_y \tag{3}$$

认为雷达 1 的第 $i$ 个点迹与雷达 2 的第 $j$ 个点迹互联。

对于 2 部雷达的点迹关联，若落入相关波门的雷达 2 的量测只有 1 个，则该量测便认为是与雷达 1 对应量测关联的目标量测。若有 1 个以上的量测落入波门之内，此时要取统计距离最小的候选量测作为相关联的目标量测，即使得下述距离最小的量测 $d\left(i,j\right)$：

$$d\left(i,j\right)=\left(z_1\left(j\right)-z_1\left(i\right)\right)^{\mathrm{H}}R\left(i\right)\left(z_1\left(j\right)-z_1\left(i\right)\right) \tag{4}$$

由于最近邻法认为波门中距离最近的量测才是相关量测，因此比较适用于稀疏回波环境下的目标跟踪。

### 1.3 点迹滤波处理方法

点迹串行处理同样可以提高航迹的跟踪精确度，不同雷达的点迹，在卡尔曼滤波过程中，根据点迹的协方差矩阵不断修正目标航迹的状态估计，则可以在航迹滤波的过程中，达到融合的目的。假设当前时刻目标状态为 $x_0$，目标状态协方差矩阵为 $\boldsymbol{P}_0$，在 $T_1$ 时刻得到雷达 1 的某个点迹与目标相连，新息为 $v_1$。根据卡尔曼滤波算法，得到 $T_1$ 时刻目标状态预测结果为 $\hat{\boldsymbol{x}}_1$，其协方差矩阵为：

$$\tilde{\boldsymbol{P}}_1=F_1\boldsymbol{P}_0F_1^{\mathrm{H}}+Q \tag{5}$$

式中 $F_1$ 代表点迹时间间隔为 $T_1$ 时的状态转移方程，新息协方差矩阵为：

$$\boldsymbol{S}_1=H\tilde{\boldsymbol{P}}_1H^{\mathrm{H}}+\boldsymbol{R}_1 \tag{6}$$

式中 $\boldsymbol{R}_1$ 表征雷达 1 点迹的误差。增益 $K_1$ 为：

$$K_1=\tilde{\boldsymbol{P}}_1H^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}_1^{-1}=\tilde{\boldsymbol{P}}_1H^{\mathrm{H}}\left(H\tilde{\boldsymbol{P}}_1H^{\mathrm{H}}+R_1\right)^{-1} \tag{7}$$

则得到 $T_1$ 时刻的状态估计 $x_1$ 为：

$$x_1=\hat{\boldsymbol{x}}_1+K_1v_1 \tag{8}$$

并且 $T_1$ 时刻的状态估计协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_1$ 为：

$$\boldsymbol{P}_1=\tilde{\boldsymbol{P}}_1-K_1\boldsymbol{S}_1K_1^{\mathrm{H}}=\tilde{\boldsymbol{P}}_1-\tilde{\boldsymbol{P}}_1H^{\mathrm{H}}\left(H\tilde{\boldsymbol{P}}_1H^{\mathrm{H}}+R_1\right)^{-1}\left(\tilde{\boldsymbol{P}}_1H^{\mathrm{H}}\right)^{\mathrm{H}} \tag{9}$$

紧接着在 $T_2$ 时刻得到雷达 2 的某个点迹与目标相连，新息为 $v_2$。则根据卡尔曼滤波算法得到 $T_1$ 时刻目标状态预测结果为 $\hat{\boldsymbol{x}}_2$，其协方差矩阵 $\tilde{\boldsymbol{P}}_2$ 为：

$$\tilde{\boldsymbol{P}}_2=F_2\boldsymbol{P}_1F_2^{\mathrm{H}}+Q \tag{10}$$

式中 $F_2$ 代表点迹时间间隔为 $T_2-T_1$ 时的状态转移方程，新息协方差矩阵 $\boldsymbol{S}_2$ 为：

$$\boldsymbol{S}_2=H\tilde{\boldsymbol{P}}_2H^{\mathrm{H}}+\boldsymbol{R}_2 \tag{11}$$

式中 $\boldsymbol{R}_2$ 为雷达 2 点迹的误差协方差矩阵，增益 $K_2$ 为：

$$K_2 = \tilde{\boldsymbol{P}}_2 H^{\mathrm{H}} \boldsymbol{S}_2^{-1} = \tilde{\boldsymbol{P}}_2 H^{\mathrm{H}} \left( H\tilde{\boldsymbol{P}}_2 H^{\mathrm{H}} + \boldsymbol{R}_2 \right)^{-1} \tag{12}$$

则得到 $T_2$ 时刻的状态估计 $x_2$ 为：

$$\begin{aligned} x_2 = \hat{\boldsymbol{x}}_2 + K_2 v_2 = F_2 x_1 + K_2 v_2 = F_2 \hat{\boldsymbol{x}}_1 + F_2 K_1 v_1 + K_2 v_2 = \\ F_2 \hat{\boldsymbol{x}}_1 + F_2 \tilde{\boldsymbol{P}}_1 H^{\mathrm{H}} \left( H\tilde{\boldsymbol{P}}_1 H^{\mathrm{H}} + \boldsymbol{R}_1 \right)^{-1} v_1 + \tilde{\boldsymbol{P}}_2 H^{\mathrm{H}} \left( H\tilde{\boldsymbol{P}}_2 H^{\mathrm{H}} + \boldsymbol{R}_2 \right)^{-1} v_2 \end{aligned} \tag{13}$$

由上式可知，雷达 1 点迹的新息 $v_1$ 的权重由其量测误差 $R_1$ 以及上一时刻状态估计误差 $\boldsymbol{P}_0$ 决定，雷达 2 点迹的信息的权重由量测误差 $\boldsymbol{R}_2$ 以及上一时刻的状态误差 $\boldsymbol{P}_1$ ( $\boldsymbol{P}_1$ 由 $\boldsymbol{P}_0$ 以及 $\boldsymbol{R}_1$ 决定)来确定，由此在跟踪状态估计的过程中统计实现 2 部雷达点迹信息的融合。并且可得 $T_2$ 时刻的状态估计协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_2$ 为：

$$\boldsymbol{P}_2 = \tilde{\boldsymbol{P}}_2 - K_2 \boldsymbol{S}_2 K_2^{\mathrm{H}} = \tilde{\boldsymbol{P}}_2 - \tilde{\boldsymbol{P}}_2 H^{\mathrm{H}} \left( H\tilde{\boldsymbol{P}}_2 H^{\mathrm{H}} + \boldsymbol{R}_2 \right)^{-1} \left( \tilde{\boldsymbol{P}}_2 H^{\mathrm{H}} \right)^{\mathrm{H}} \tag{14}$$

式中 $\tilde{\boldsymbol{P}}_2$ 与 $\boldsymbol{P}_1$ 相关，进而与雷达 1 点迹的协方差矩阵 $\boldsymbol{R}_1$ 相关，而 $\boldsymbol{R}_2$ 为雷达 2 的协方差矩阵。目标跟踪过程通过不断滤波提高跟踪精确度，上述串行方法在跟踪过程中充分利用点迹信息不断提高跟踪精确度。由于不同雷达的点迹有不同的误差协方差矩阵，在滤波过程中便可以实现减小误差的作用。

串行数据融合算法具有广泛的使用范围，可以看作单部雷达的扩展使用，也能够适应多部雷达的应用环境。本算法以二维平面坐标系作为雷达探测的坐标空间，同时未严格考虑实际使用场合下距离容限选取的复杂性，仿真中选取的参数保证每个扫描周期内都存在目标。

## 2 典型数据融合

雷达点迹融合的应用环境较为广泛，典型的环境条件包括：配备两型不同雷达的单舰平台，比如一部雷达为导航雷达，另一部雷达为警戒搜索雷达；具有配置舰船形成的编队，此时编队系统采用相同的型号雷达。单舰平台采用多部雷达有利于克服恶劣天气，实现全天时的目标探测和警戒，编队系统采用多雷达能够提高搜索效能，增加搜索范围。

从舰载雷达探测工作原理角度看，雷达的目标测量是多维度的，先进的雷达可以测量目标的距离、速度、方位和角度等信息，应用需求不同时雷达测量的信息有所差异，舰用典型雷达至少探测目标的距离和方位，串行数据融合算法将忽略高端雷达获取的其他目标信息，如速度和仰角。

仿真中采用 2 部典型雷达构成的融合平台，融合数据源为单个目标的距离和方位角。2 部雷达具有相同的扫描周期，但雷达天线指向相反，这代表了一类典型的“背靠背”配置条件：通过增加雷达数量等效提高了雷达的工作周期，但同时雷达间获取目标的运动状态差异最大。雷达的技术指标参考国内外常规的搜索雷达，雷达扫描周期为 2~4 s，距离分辨力在 30~200 m 之间，角度跟踪精确度在 0.1°~1.0°范围内。

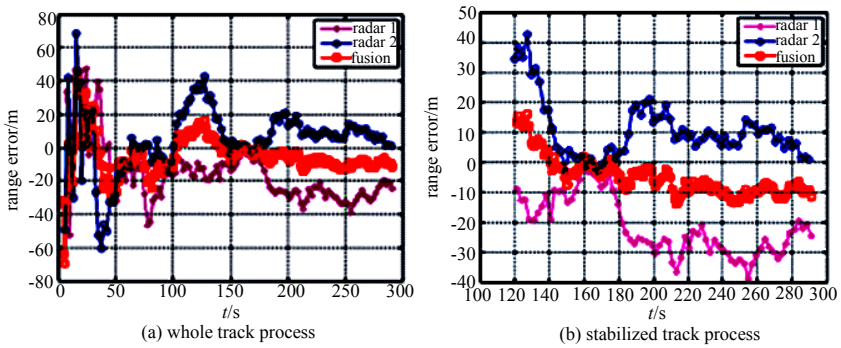
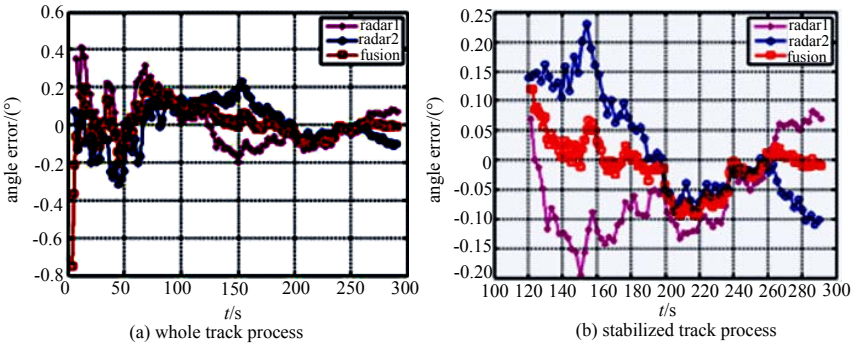



Fig.4 Distance error of the whole phase and stabilized phase

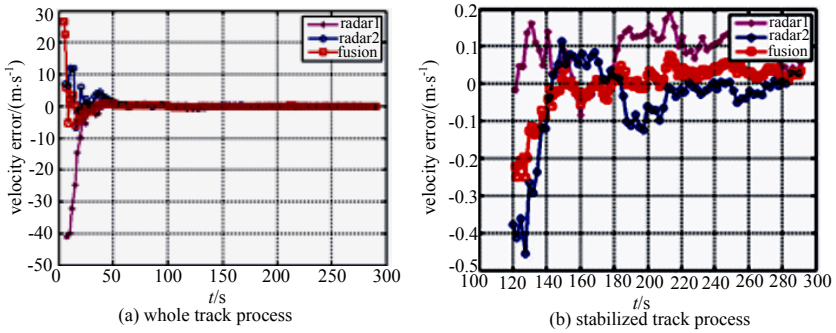
图 4 全程段与稳定段距离误差




(a) whole track process　　(b) stabilized track process

Fig.5 Angle error of the whole phase and stabilized phase

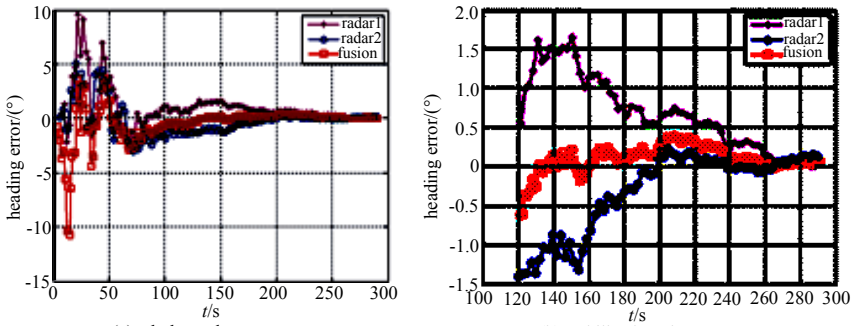
图 5 全程段与稳定段角度误差




(a) whole track process　　(b) stabilized track process

Fig.6 Angle error of whole phase and stabilized phase

图 6 全程段与稳定段角度误差




(a) whole track process　　(b) stabilized track process

Fig.7 Heading error of whole phase and stabilized phase

图 7 全程段与稳定段航向误差

## 3　跟踪精确度仿真

本文仿真考虑了典型条件下多部雷达的融合效果：雷达的数量为 2 部，雷达主要的功能为警戒或目标搜索，雷达脉冲重复频率小于 2 kHz，对空搜索距离大于 100 km。跟踪结果如图 4~图 7 所示，从图中曲线可以看到融合后数据起伏较少，串行融合方法有效。

### 3.1　两部雷达相同精确度

2 部雷达的脉冲重复间隔均为 1 010 μm，扫描 1 圈共发送 2 400 个脉冲，则有扫描周期约为 2.4 s，2 部雷达背靠背扫描。扫描圈数均为 120 圈。雷达 1 和雷达 2 测量点迹的距离误差为 75 m，角度误差为 0.4°。目标做匀速运动，目标的初始位置[63,63] km，速度为[−100,−100] m/s。采用串行融合处理的方法进行点迹融合，多次仿真结果显示跟踪后段雷达的跟踪误差稳定，这里采用全程段和稳定段分析雷达的跟踪性能。

进行 1 000 次蒙特卡洛仿真，得到仿真结果如表 1 和表 2 所示。由仿真结果可知，串行处理的点迹融合方法在距离、角度、航速和航向等大部分技术指标上得到有效提高。

表 1 全程段航迹误差统计结果

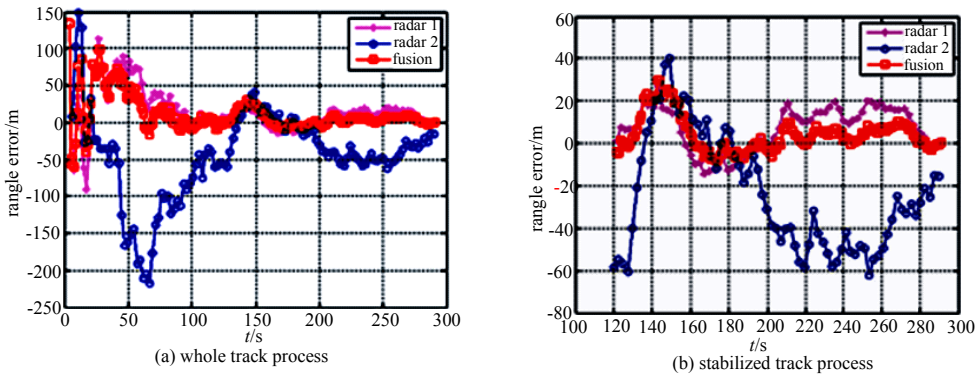
Table1 All statistical errors in the whole phase

| | range error mean/m | range error deviation/m | angle error mean/(°) | angle error deviation/(°) | velocity error mean/(m·s$^{-1}$) | velocity error deviation/(m·s$^{-1}$) | heading error mean/(°) | heading error deviation/(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| radar 1 | -0.07 | 27.53 | -0.0 001 | 0.13 | 0.11 | 6.02 | -0.03 | 2.13 |
| radar 2 | 0.08 | 27.61 | 0.0 009 | 0.13 | 0.15 | 6.03 | 0.03 | 2.15 |
| fusion | -0.07 | 21.19 | 0.0 009 | 0.10 | 0.10 | 6.06 | -0.03 | 1.98 |
| comparison | improved | improved | lowered | improved | improved | lowered | unchanged | improved |

表 2 稳定段航迹误差统计结果

Table2 All statistical errors in stabilized phase

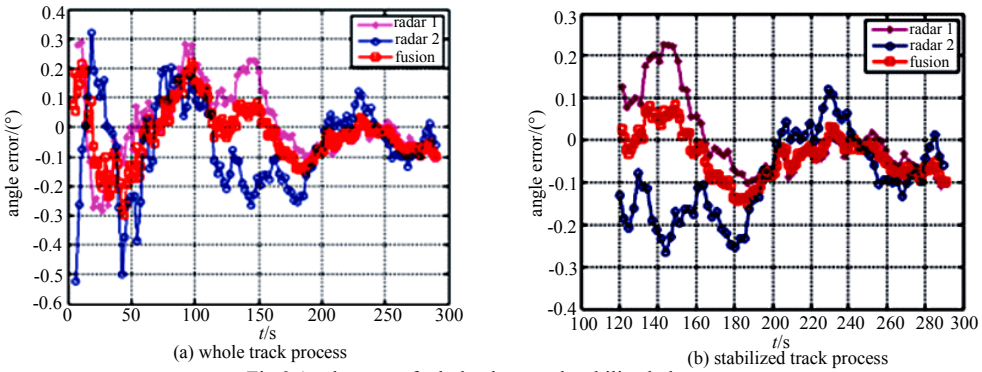
| | range error mean/m | range error deviation/m | angle error mean/(°) | angle error deviation/(°) | velocity error mean/(m·s$^{-1}$) | velocity error deviation/(m·s$^{-1}$) | heading error mean/(°) | heading error deviation/(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| radar 1 | -0.24 | 16.97 | -0.001 5 | 0.10 | 0.01 | 0.18 | 0.01 | 0.49 |
| radar 2 | 0.10 | 17.15 | 0.002 1 | 0.10 | 0.01 | 0.18 | 0 | 0.50 |
| fusion | -0.13 | 12.01 | 0.000 8 | 0.07 | 0.01 | 0.12 | 0 | 0.34 |
| comparison | lowered | improved | improved | improved | unchanged | improved | improved | improved |




(a) whole track process (b) stabilized track process

Fig.8 Distance error of the whole phase and stabilized phase

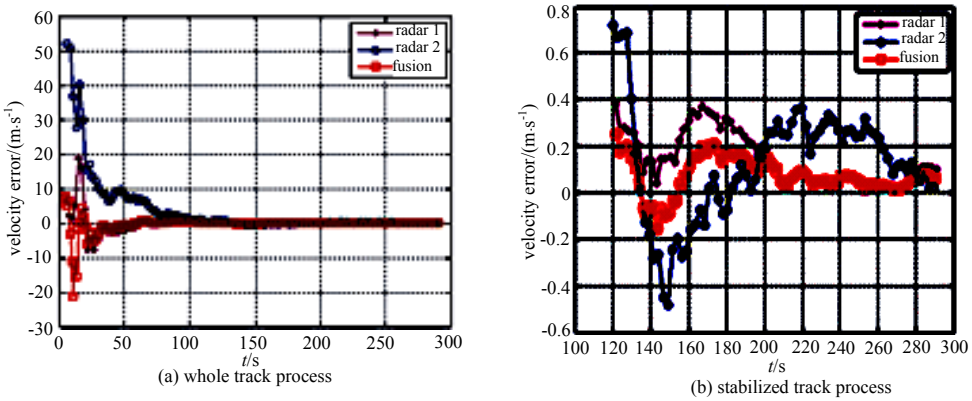
图 8 全程段与稳定段距离误差




(a) whole track process (b) stabilized track process

Fig.9 Angle error of whole phase and stabilized phase

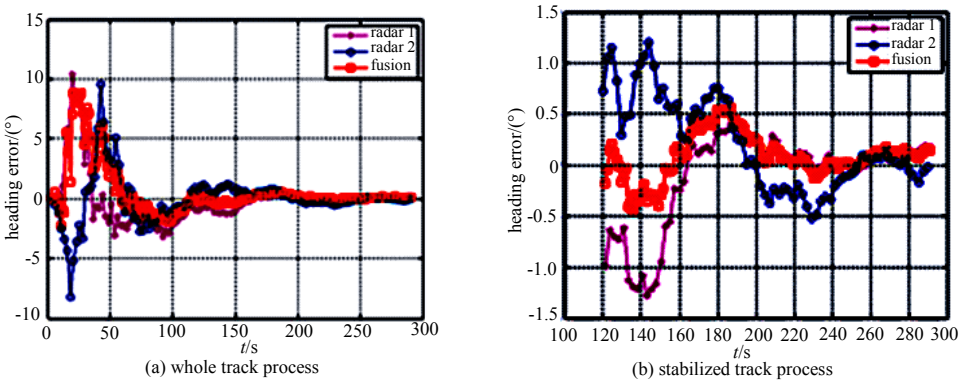
图 9 全程段与稳定段角度误差




(a) whole track process (b) stabilized track process

Fig.10 Velocity error of whole phase and stabilized phase

图 10 全程段与稳定段航速误差




(a) whole track process　　(b) stabilized track process

Fig.11 Heading error of the whole phase and stabilized phase

图 11 全程段与稳定段航向误差

### 3.2 两部雷达不同精确度

2 部雷达的脉冲重复间隔均为 1 010 μs，扫描 1 圈共发送 2 400 个脉冲，则扫描周期约为 2.4 s。扫描圈数为 120 圈。雷达 1 测量点迹的距离误差为 75 m，角度误差为 0.4°；雷达 2 测量点迹的距离误差为 150 m，角度误差为 0.6°。目标做匀速运动，目标的初始位置[63,63]km，速度为[–100,–100] m/s。采用串行融合处理的方法进行点迹融合，得到跟踪结果如图 8~图 11 所示，融合后的数据起伏小，数据稳定。做 1 000 次蒙特卡洛仿真，得到仿真结果如表 3~表 4 所示。由仿真结果可知：在跟踪精确度不等的情况下，串行处理的点迹融合方法存在角度误差均值与航向误差均值部分指标降低，但恶化程度不明显。总体上讲，串行算法提高了跟踪性能，尤其是稳定阶段的跟踪。

表 3 全程段航迹误差统计结果

Table3 All statistical errors in the whole phase

| | range error mean/m | range error deviation/m | angle error mean/(°) | angle error deviation/(°) | velocity error mean/(m·s$^{-1}$) | velocity error deviation/(m·s$^{-1}$) | heading error mean/(°) | heading error deviation/(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| radar 1 | 0.29 | 26.29 | -0.001 1 | 0.15 | 1.52 | 12.25 | 0 | 7.14 |
| radar 2 | 1.03 | 52.10 | -0.003 3 | 0.22 | 2.62 | 19.16 | 0.01 | 9.08 |
| fusion | 0.55 | 28.82 | -0.001 4 | 0.11 | 0.03 | 10.29 | -0.10 | 4.56 |
| comparison | lowered | lowered | lowered | improved | improved | improved | lowered | improved |

表 4 稳定段航迹误差统计结果

Table4 All statistical errors in stabilized phase

| | range error mean/m | range error deviation/m | angle error mean/(°) | angle error deviation/(°) | velocity error mean/(m·s$^{-1}$) | velocity error deviation/(m·s$^{-1}$) | heading error mean/(°) | heading error deviation/(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| radar 1 | -0.01 | 16.86 | -0.002 7 | 0.10 | 0.01 | 0.18 | 0.01 | 0.49 |
| radar 2 | 0.72 | 33.54 | -0.005 2 | 0.15 | 0.02 | 0.35 | 0.02 | 0.78 |
| fusion | 0.47 | 15.10 | -0.003 1 | 0.08 | 0 | 0.16 | 0.01 | 0.41 |
| comparison | lowered | improved | lowered | improved | improved | improved | improved | improved |

### 3.3 等效探测威力

2 部雷达的脉冲重复间隔均为 1 010 μs，扫描 1 圈共发送 4 800 个脉冲，则有扫描周期约为 4.8 s。扫描圈数为 150 圈。雷达 1 和雷达 2 测量点迹的距离误差为 75 m，角度误差为 0.4°。

目标从远端做匀速直线运动进入观测场内，初始位置[125,125] km，速度为[–200,–200] m/s。假设 2 部雷达在 100 km 的目标探测概率为 0.85，虚警概率为 $10^{-6}$。得到航迹起始距离的统计结果如图 12 所示，航迹起始的距离的均值如表 5 所示，由雷达方程，信噪比等效改善量 $I$ 为：

$$I = 10\lg\frac{R_f^4}{R_1^4} \tag{15}$$

串行融合处理算法相对于雷达 1 改善量为 1.03 dB，相对于雷达 2 提高了 1.01 dB。

表 5 航迹起始距离均值

Table5 Average of radar track initial range

| | mean/km |
|---|---|
| radar1 | 109.81 |
| radar2 | 109.97 |
| fusion | 116.57 |

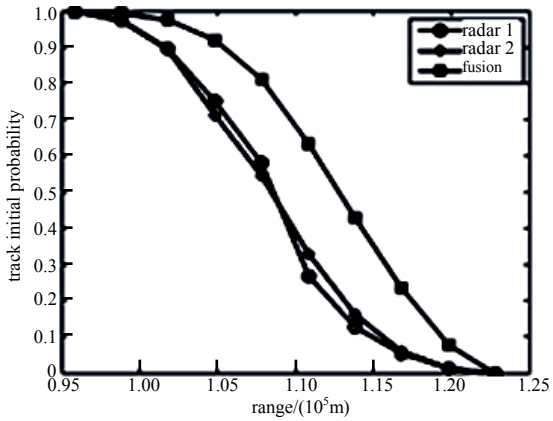



Fig.12 Track initial range

图 12 航迹起始距离

## 4 结论

本文给出了多雷达数据融合的多舰编队和单舰多雷达2类工作条件,采用串行数据融合算法进行了数据仿真计算。仿真结果表明多雷达串行数据融合效果普遍优于单雷达目标跟踪,同时依照航迹起始概率折算了雷达的探测性能,目标的信噪比有一定的提高。

**参考文献:**


[1] BLACKMAN S S. Multiple-target tracking with radar applications[M]. [S.l.]:Dedham Ma Artech House Inc P, 1986.

[2] HALL,DAVID L. Handbook of Multisensor Data Fusion[M]. [S.l.]:CRC Press, 2001.

[3] 贾海艳,梅玉航. 基于IMM-PF的再入目标数据融合算法与仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):402-408. (JIA Haiyan,MEI Yuhang. Data fusion algorithm and simulation for reentry target based on IMM-PF[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):402-408.)

[4] 何友. 多传感器信息融合及应用[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2007. (HE You. Multisensor Information Fusion with Application[M]. 2nd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2007.)

[5] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004. (YANG Wanhai. Multisensor Data Fusion with Application[M]. Xi'an,China:Xidian Press, 2004.)

[6] 郭明,许录平. 集中式多雷达系统的数据融合[J]. 雷达与对抗, 2003(1):19-22. (GUO Ming,XU Luping. Data fusion of centralized multi-radar system, radar and ECM[J]. Radar ECM, 2003(1):19-22.)

[7] 王乾. 组网雷达的集中式数据融合技术研究[J]. 电子测试, 2016(9):61-62. (WANG Qian. Research on centralized data fusion technology of networking radar[J]. Electronic Test, 2016(9):61-62.)

[8] 方青. 雷达组网数据融合处理中的点迹融合技术[J]. 雷达科学与技术, 2002(4):5-12. (FANG Qing. Plot fusion technology in radar network data fusion[J]. Radar Science and Technology, 2002(4):5-12.)

[9] 施岩龙,王雪,陆小科. 面向多雷达数据融合的并行数据编排框架研究[J]. 现代雷达, 2015(37):39-42. (SHI Yanlong, WANG Xue,LU Xiaoke. A study on parallel data management framework of multi-radar data fusion[J]. Modern Radar, 2015(37):39-42.)

[10] 张伯彦,罗兴旺,蔺宏江,等. 多平台雷达点迹数据融合技术[J]. 系统工程与电子技术, 2015,37(7):1512-1518. (ZHANG Boyan,LUO Xingwang,LIN Hongjiang,et al. Researches on multiple-radar multiple-platform plot data fusion[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015,37(7):1512-1518.)

[11] 陈志杰,饶彬,李永祯,等. 雷达组网数据融合系统性能分析[J]. 系统仿真学报, 2015(27):1526-1531. (CHEN Zhijie, RAO Bin,LI Yongzhen,et al. Performance analysis of netted radar data fusion systems[J]. Journal of System Simulation, 2015(27):1526-1531.)


**作者简介:**

**李军侠**(1978-),男,山东省烟台市人,高级工程师,博士,主要研究方向为雷达信号处理、雷达系统设计.email:baqibaba@163.com.

**张永泉**(1976-),男,山东省莒县人,研究员,博士,主要研究方向为舰船作战系统设计、雷达系统设计.

**张晓林**(1951-),男,北京市人,教授,主要研究方向为集成电路设计、飞行器遥测遥控与卫星导航系统.

**杨 森**(1988-),男,北京市人,助理工程师,本科,主要研究方向为雷达数据仿真.

**王 力**(1984-),男,四川省宜宾市人,博士,主要研究方向为雷达信号处理、阵列信号处理、微弱目标检测.

**朱 勇**(1970-),男,江苏省江阴市人,研究员,主要研究方向为舰船作战系统设计.