

文章编号: 2095-4980(2024)09-1021-08

基于 OpenMP 的航迹融合并行优化方法

吴 静, 谢晓霞, 艾小锋, 赵 锋, 徐振海

(国防科技大学 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 针对组网雷达中分布式数据融合计算量随数据量增大急剧增加的问题及航迹融合中最耗时的航迹关联环节, 提出一种基于 OpenMP 的多线程优化方法。通过 OpenMP 并行计算雷达航迹间的关联距离, 提升内部算法运算速度, 并将数据接收、融合处理和结果输出过程进行多线程处理, 进一步加快外部数据交互速度, 提升融合处理整体时间性能。以大容量目标场景为测试用例, 评估处理时间和优化加速比。仿真结果表明, 所提并行优化方法能够有效提升运算速度。

关键词: 航迹融合; 航迹关联; 并行优化; 多线程; OpenMP 技术

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023020

Parallel optimization of track fusion algorithm based on OpenMP

WU Jing, XIE Xiaoxia, AI Xiaofeng, ZHAO Feng, XU Zhenhai

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System,
National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to meet the real-time requirements with the increase of data volume in the distributed data fusion algorithm of netted radar, the track association algorithm based on statistical double-threshold method in the data fusion process is studied, and a multi-threaded optimization idea based on Open Multi-Processing (OpenMP) is proposed. The operation speed of the internal algorithm is improved by OpenMP parallel calculation of the correlation distance between radar tracks, and the external data transmission speed is accelerated by using three threads to separate the data receiving, fusion and sending processes, thus improving the processing speed of the overall fusion process. Taking the large capacity target scenario as the test case, the processing time and optimization acceleration ratio are evaluated. The simulation results show that the proposed parallel optimization method can effectively improve the computing speed.

Keywords: track fusion; track correlation; parallel computing; multi-threading; OpenMP technology

随着精确制导武器等高科技兵器的产生, 现代战场环境日益复杂, 已扩展为陆、海、空、天、电磁多维空间。雷达组网通过将分布在不同地理位置的雷达数据进行综合处理, 有利于提高目标估计精确度, 获取更为全面的战场态势。随着雷达和目标数的增加, 融合中心处理数据量剧增, 数据融合速度减慢。基于组网雷达对数据快速处理的要求, 亟需采取一定的技术手段优化融合算法, 提升数据处理速度^[1-2]。

随着计算机技术的迅速发展, 多核并行编程技术不断成熟, 为组网雷达的数据处理提供了可靠高效的软硬件支持^[3-4], 异构计算成为了热点。硬件方面, 数字信号处理器(Digital Signal Processing, DSP)、现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)、图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)等用来提升系统的运行速度和处理能力^[5]。软件方面, 出现了统一计算设备架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA)^[6]、OpenMP、C++AMPP(Accelerated Massive Parallelism)等不同的并行计算框架。其中, OpenMP 编程模型以其跨平台、可伸缩及简单灵活的特点广泛用于大规模计算中^[7-9]。该模型通过在程序的循环部分增加并行化指令, 以增量方式并行化串程序, 在共享内存多处理器上采用高性能的计算应用程序, 从而便捷地提升程序运行速度。文献[10]针对轨迹预测过程中通信量过大的问题, 提出一种分布式异构并行方案, 获得良好性能。文献[11]提出了一种采用

收稿日期: 2023-02-01; 修回日期: 2023-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071475; 61890542)

OpenMP 实现的多雷达数据融合并行数据编排模型, 得到了较好的加速效果。文献[12]聚焦于密集杂波环境中的点迹融合, 设计了一种基于修正空间划分法的雷达点迹融合并行处理方法, 有效提升了算法的准确性和实时性。以上方法多基于空间划分对数据融合流程进行并行化设计和优化^[13-14], 并没有考虑从航迹融合处理算法内部进行并行优化。

在组网雷达数据处理过程中, 主要耗时的过程为航迹关联。航迹关联将参与融合的各雷达间航迹两两进行关联计算, 从而判断航迹的目标来源^[15-16]。一般情况下, 航迹关联为串行程序, 某雷达中的一条航迹与另一雷达的所有航迹依次关联后, 再进行下一航迹与其他航迹的关联。基于组网雷达数据融合速度提升的需求, 本文提出一种优化框架。从外部数据传输和内部算法出发, 通过分线程收发数据, 减小数据传输对数据处理速度的影响; 采取 OpenMP 优化航迹关联算法提升内部程序运行速度, 共同提高融合处理速度。该框架有助于从数据传输、算法处理等方面为多节点数据融合处理算法进行速度优化, 同时为保持整体程序架构不变提供思路。

1 分布式航迹融合原理概述

1.1 航迹关联算法

航迹关联常用算法为统计双门限法, 该方法以两航迹一段时间内的状态点距离为判断依据将航迹两两关联, 从满足条件初步关联成功的航迹对中依次找出最优航迹关联结果。由于该算法考虑了历史信息, 关联效果稳定, 可靠性高。

1.1.1 统计双门限法

统计双门限法的具体思想为: 储存一段时间内分别来自于 2 个雷达的局部航迹估计样本 i 和 j , 设估计总样本数为 M 。计算每一对估计值在每个时刻的关联距离, 若关联距离小于设定距离阈值 γ , 则判定这 2 个目标在当前时刻符合阈值条件。统计符合条件次数 K , 若 K/M 超过一定的概率值, 则判定两航迹初步关联成功。对初步关联成功的航迹, 记录平均关联距离作为关联度, 用作后续的最终成功关联的判断依据。

时刻 k 估计样本 i 和 j 间关联距离的计算方法为:

$$\text{dis}[\hat{X}^i(k), \hat{X}^j(k)] = \sqrt{[\hat{x}^i(k) - \hat{x}^j(k)]^2 + [\hat{y}^i(k) - \hat{y}^j(k)]^2 + [\hat{z}^i(k) - \hat{z}^j(k)]^2} \quad (1)$$

式中 $\hat{X}^i(k) = [\hat{x}^i(k), \hat{y}^i(k), \hat{z}^i(k)]$ 和 $\hat{X}^j(k) = [\hat{x}^j(k), \hat{y}^j(k), \hat{z}^j(k)]$ 分别为时刻 k 来自 2 个雷达的目标 i 和 j 在 x 、 y 、 z 三个方向上的位置估计量。

关联度 $\bar{d}(X^i, X^j)$ 由式(2)求得:

$$\bar{d}(X^i, X^j) = \frac{\sum_{l=k-l_{\text{en}}+1}^k \text{dis}[\hat{X}^i(l), \hat{X}^j(l)]}{l_{\text{en}}} \quad (2)$$

式中 l_{en} 为参与统计的时间段长度。

统计双门限法以历史阶段和现阶段的整体关联情况判断航迹是否相关, 同时考虑了历史情况和当前时刻航迹信息。与近邻法相比, 统计双门限法改善了漏错关联的情况, 能够更有效地完成航迹关联。

1.1.2 航迹关联流程

采用全局搜索策略实现统计双门限法, 流程如图 1 所示, 主要实现步骤如下:

输入: 两雷达的所有局部航迹

步骤 1: 初步关联结果和距离统计。对两两航迹使用相关准则进行关联, 记录关联情况。关联判定方法为: 在当前时段的每个融合时刻, 若 2 条航迹均存在有效估计值, 根据式(2)判断估计状态是否满足关联条件。若符合条件的关联次数达到有效次数门限, 且满足关联条件的次数与总有效次数的比值 K/M 大于关联概率阈值, 则初步判定两航迹关联成功, 记录关联的航迹下标和平均关联距离, 直到完成两雷达间所有两两航迹的关联。

步骤 2: 平均关联距离排序。基于全局搜索策略, 最终匹配成功的航迹对为所有航迹对中关联距离最小的航迹对, 故对所有航迹对按照平均关联距离最小进行排序。

步骤 3: 关联航迹对的查找与存储。从排好序的航迹关联对中依次取出当前平均关联距离最小的航迹对, 保存航迹对, 标记对应航迹已关联。储存该航迹对的航迹信息用于后续的融合操作, 删除与该航迹对中任一条航迹关联上的其他航迹对, 然后继续取出删除后平均关联距离最小的航迹对, 直到剩余关联航迹对为空。

输出: 根据关联标记整理出的航迹。

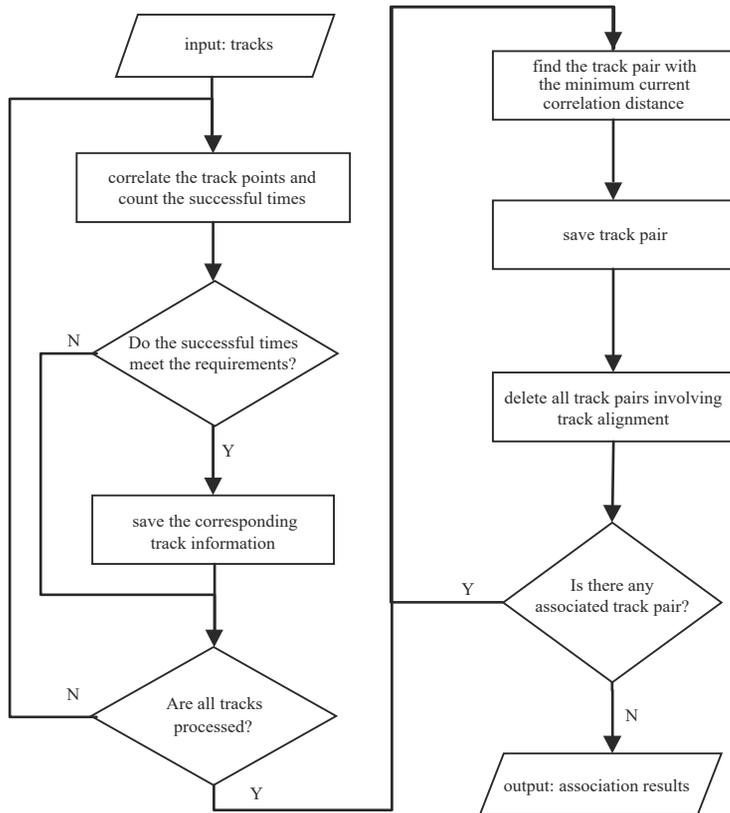


Fig.1 Flow chart of track association algorithm
图1 航迹关联算法流程图

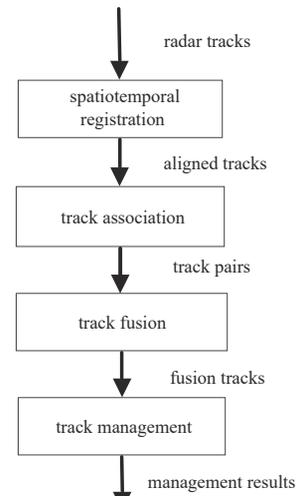


Fig.2 Distributed fusion process
图2 分布式融合流程

1.2 分布式融合结构

在分布式组网融合系统中，融合中心接收的数据为各雷达单独完成目标跟踪与状态估计后形成的初始航迹信息。融合中心对航迹进行关联和融合，生成全局航迹。该系统通信量小，可靠性高，具备假目标航迹鉴别能力^[17-18]。分布式融合流程主要包括时空配准、航迹关联、航迹融合与航迹管理四部分：各雷达航迹首先进行时空配准，对齐到统一的时间点和空间坐标系中；然后不同雷达间的航迹根据一定的规则两两关联，判定关联成功的航迹对来源于同一个目标；将航迹对按照一定的加权方法进行融合，得到融合航迹；航迹管理根据历史管理情况和当前的融合航迹结果给出目标融合结果。流程图如图2所示。

采用3.1节的仿真条件，设计150个目标的战情，统计分布式融合流程中各融合步骤的耗时占比，如表1所示。从表中可以看出，航迹关联为分布式融合系统中主要的耗时环节，因此考虑对航迹关联算法进行优化。

表1 分布式融合步骤耗时占比(%)

Table1 Proportion of time consumed in distributed fusion process(%)

fusion steps	spatiotemporal registration	track association	track fusion	track management
proportion of consumed time	6	93	1	0.1

2 基于 OpenMP 的航迹融合并行优化

2.1 OpenMP 的并行原理

OpenMP 是一种面向共享内存系统的并行编程模型，通过在共享内存中进行多线程的并行计算，充分利用中央处理器(CPU)的计算资源，提高处理速度。它支持C++的多线程编程，仅需在程序中添加并行设计的指导语句即可实现，操作简单易行，具有良好的可移植性。

OpenMP 为基于 Fork-Join(派生/连接)的并行编程模型，从主线程开始执行，到达定义的并行域时，程序派

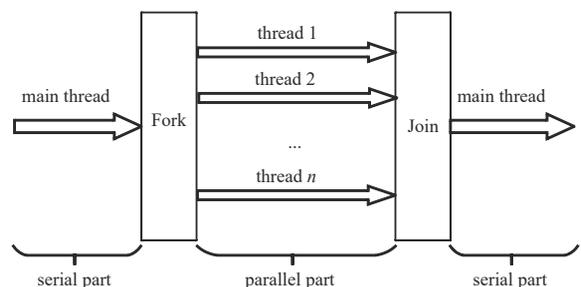


Fig.3 Working mode of OpenMP
图3 OpenMP 工作模式

生出多个线程并行执行并行域部分。当所有线程执行完成该区域后，终止其他线程，保留主线程，直到执行到下一个并行部分，如图 3 所示。

在组网雷达数据融合过程中，针对耗时长、重复操作多的一些融合步骤，采用基于 OpenMP 的并行技术进行程序优化，将串行算法转化为并行处理，在不改变算法大体框架的前提下，进一步优化算法速度，便捷易操作。

2.2 航迹融合整体框架优化

整体的融合速度优化方案分为融合内部算法优化和外部数据传输优化两部分，如图 4 所示。内部算法优化采用基于 OpenMP 的并行技术优化航迹关联算法，提升数据的融合处理速度；外部数据传输优化通过将数据接收、融合与发送分为 3 个线程处理，使 3 个线程能够同时进行，减少数据通信的额外开销时间。

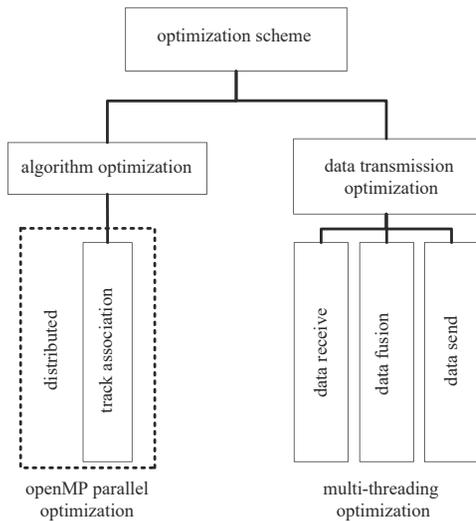


Fig.4 Optimization scheme
图4 整体优化方案

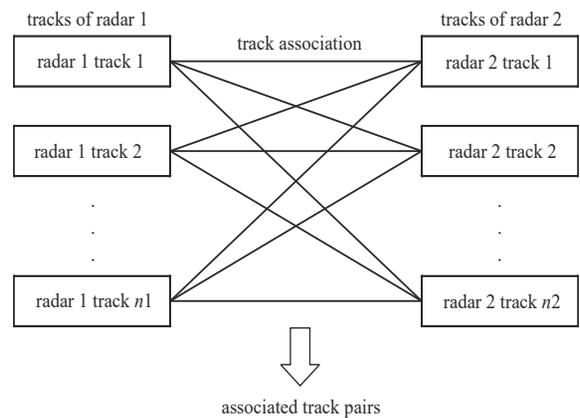


Fig.5 Schematic diagram of original track association
图5 原始航迹关联示意图

2.3 航迹关联算法并行优化

2.3.1 航迹关联算法并行性分析

基于统计双门限的航迹关联算法通过多重循环计算平均关联距离实现初步关联，该过程需分别计算组网雷达中两两雷达航迹关联情况，然后统计初步关联成功的航迹对情况，如图 5 所示。两雷达航迹关联情况的统计过程为循环的关联距离计算步骤，各循环间的关联情况互不干扰，因此考虑采用 OpenMP 使程序并行运行，加快处理速度。

由于在原始关联中同时存在计算和变量存储操作，若直接对循环进行并行加速，可能会导致多线程数据访问冲突。避免冲突的方法为：先建立一个矩阵存储关联结果，使关联距离的计算实现无访问冲突的并行化。然后通过串行访问矩阵，根据关联结果判断关联情况，存储关联成功航迹对信息。并行算法示意图如图 6 所示，雷达 1 中的每条航迹在不同的线程中与雷达 2 所有航迹关联，将关联结果统一记录。图 6 中航迹关联步骤用于判断指定的两航迹是否初步关联成功。

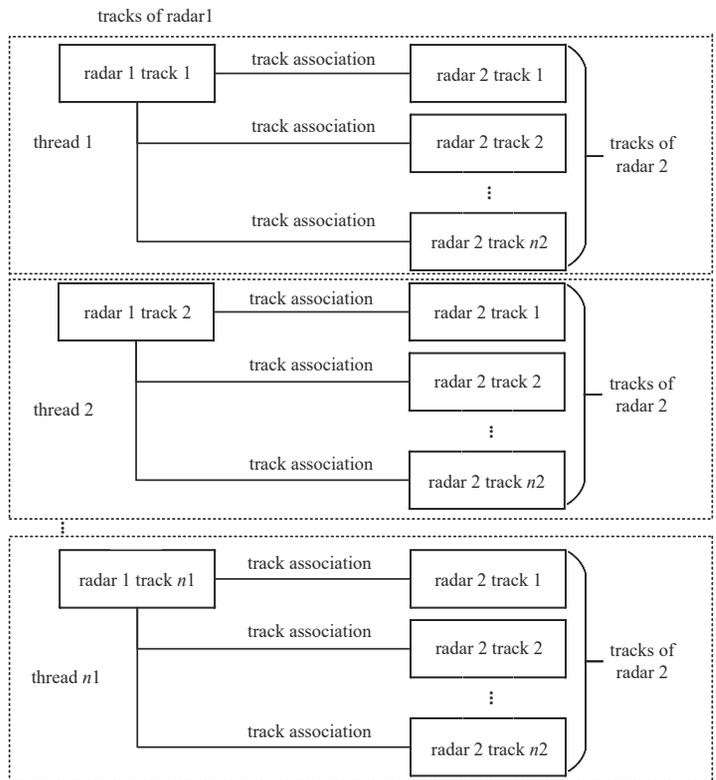


Fig.6 Schematic diagram of track parallel association
图6 航迹并行关联示意图

2.3.2 基于 OpenMP 的航迹关联优化算法

基于 OpenMP 的航迹关联并行算法的具体步骤为：

步骤 1: 雷达航迹遍历。采用 OpenMP 语句，使多个线程遍历雷达 1 航迹，每个线程取一条航迹作为当前雷达 1 中参与关联的航迹与雷达 2 的所有航迹关联。

步骤 2: 时间点遍历。遍历当前时刻和当前时刻前的一段历史时间点，取出指定两航迹在每个时间点的位置。

步骤 3: 粗关联。先进行粗关联，分别计算时间点 k 两航迹在 x 、 y 、 z 三个方向上的位置差：

$$\begin{cases} \Delta\hat{x}(k) = |\hat{x}^i(k) - \hat{x}^j(k)| \\ \Delta\hat{y}(k) = |\hat{y}^i(k) - \hat{y}^j(k)| \\ \Delta\hat{z}(k) = |\hat{z}^i(k) - \hat{z}^j(k)| \end{cases} \quad (3)$$

若位置差均小于指定阈值 γ_1 ，则判断粗关联成功；否则，直接判定当前时间点航迹关联失败。粗关联能够快速过滤掉距离很远、明显不相关的航迹对，减少航迹距离的计算量。

步骤 4: 精关联和结果统计。对粗关联成功的航迹对，按式(3)计算它们的关联距离，并根据 1.1.1 节的统计双门限法将成功关联航迹的平均关联距离记录在用于存储的矩阵中。

优化部分主要为步骤 1 中对航迹关联情况的并行计算。

2.3.3 时间复杂度分析

采用时间复杂度评估算法效率，以两雷达关联为例，多雷达以此类推。设真实目标航迹为 n 条，雷达 1 虚警率为 α_1 ($\alpha_1 > 1$)，雷达 2 虚警率为 α_2 ($\alpha_2 > 1$)，则雷达 1 和雷达 2 参与关联的航迹数分别为 $(1 + \alpha_1)$ 和 $(1 + \alpha_2)$ 条，原始关联算法复杂度为 $O((1 + \alpha_1)(1 + \alpha_2)n^2)$ 。在并行优化算法中，由于采取了多步关联操作，可基本滤除虚警航迹。若并行线程数为 k ，则复杂度改善为 $O(n^2/k)$ 。并行优化算法可有效降低算法时间复杂度，原理在于并行执行了多重循环部分，缩短了算法运行时间。

时间复杂度的计算是建立在理想状态下的算法，在实际的运算过程中调用和切换线程都需要耗费一定的时间成本，将该成本定义为 T 。实际的优化后的复杂度为 $O(n^2/k + T)$ 。在此情况下，随着航迹数 n 增加，优化提速的效果显著增加，线程开销占比减小。

2.4 基于数据传输的线程优化

在组网雷达模式中，融合中心实时接收来自各雷达的航迹数据，进行数据融合，然后将融合结果传递给指定的节点，如图 7 所示。

原始的数据传输模式为串行模式，只有上一个步骤完成了才能进行下一个步骤，如图 8(a) 所示。图中的 receive、fuse 和 send 分别代表每个时刻的数据接收、融合和发送过程。此时，每一次组网雷达处理数据的总时间为数据接收、融合和发送所花费的时间和。将图中数据接收、融合与发送设计为单独的 3 个线程，互不干扰，独立运行，使每个线程不必等待上一个线程完成才开始执行。通过提高通信速度进一步提高融合处理整体速度，如图 8(b) 所示，由于数据融合一般为 3 个部分中耗时最长的过程，此时处理数据的总时间为数据融合部分所占用的时间。

分线程传输数据的主要方法为：在主程序中开启数据接收、数据融合和数据发送 3 个线程：

1) 数据接收线程：接收点航迹数据，进行数据包的解析。若解析后数据为有效信息，则存入待融合变量 RadarTrack 中。

2) 数据融合线程：通过待融合变量 RadarTrack 判断是否满足融合条件，若满足，则保存并清空当前 RadarTrack，进行数据融合，将融合结果存入变量 FuseTrack 中。

3) 数据发送线程：判断融合结果 FuseTrack 是否非空，若非空，则保存并清空当前 FuseTrack，将融合结果打包发送至指定节点。

其中，RadarTrack 和 FuseTrack 为联系 3 个线程的 2 个全局变量：数据接收线程和数据融合线程以待融合变量 RadarTrack 相互联系，数据融合线程与数据发送线程以融合结果变量 FuseTrack 相互联系。各线程流程见图 9。

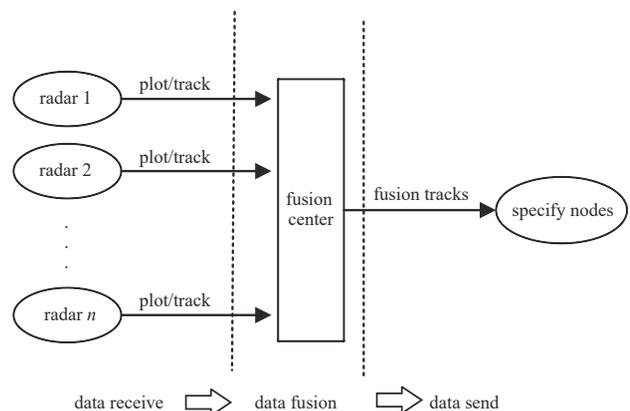


Fig.7 Data transmission flow in netted radar
图 7 组网雷达数据传输流程图

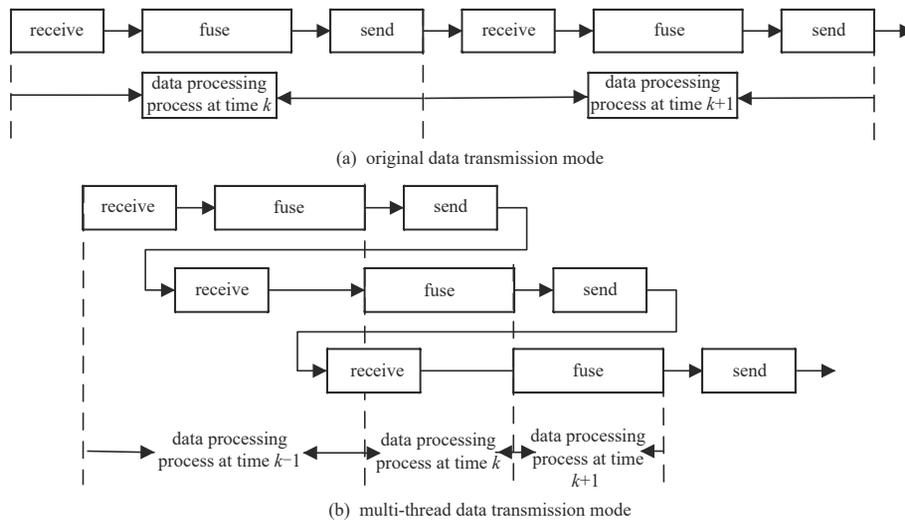


Fig.8 Time consuming comparison of data transmission modes
图 8 数据传输模式耗时对比

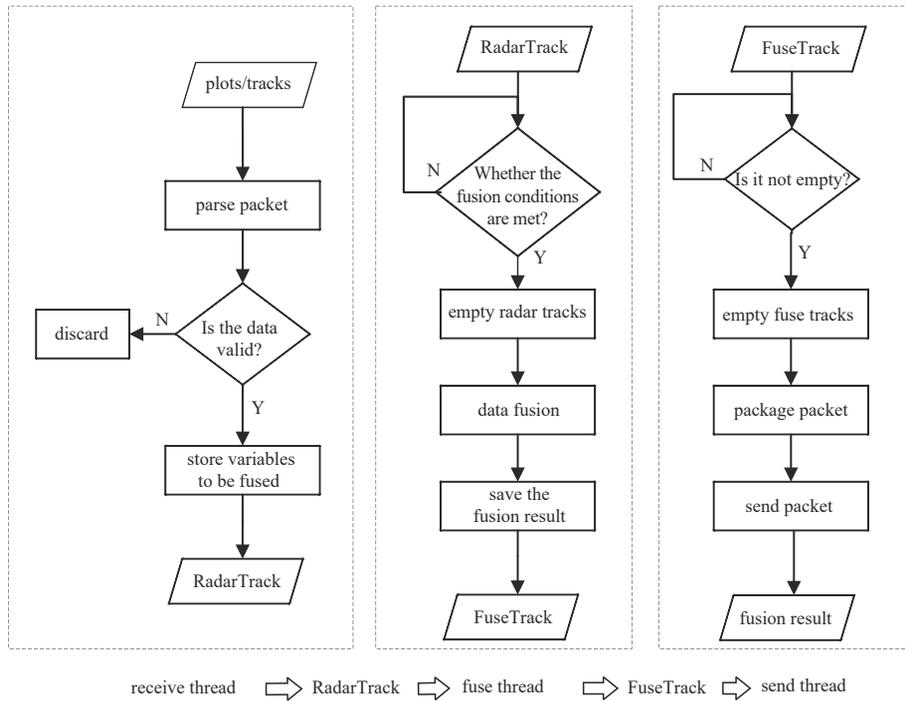


Fig.9 Processing flow of each thread
图 9 各线程处理流程

3 仿真实验分析

为验证优化方案提升分布式航迹融合处理速度的效果，设置大容量战情对融合过程进行优化前后对比测试，并分析不同数据量参与融合的性能优化效果。

3.1 优化前后结果对比

仿真平台为笔记本电脑，处理器性能为 Intel(R) Core(TM) i5-10210U CPU@1.60 GHz,2.11 GHz，为 8 核心，16 GB 内存，在 Windows 系统下的 VS2013 平台调用 OpenMP 进行仿真。设置 10 部雷达 150 个目标的大容量战情，仿真时长为 50 s，雷达搜索周期为 1 s，目标分布在雷达四周做匀速运动，速度为 150 m/s，如图 10 所示。10 部雷达探测的航迹数据由融合中心统一处理，对比采用优化方案前后整体数据融合耗时，验证并行优化效果。

统计采用优化方案和没有优化的融合处理时间，结果如表 2 所示。从表中可看出，优化后的融合方案在平均和最大处理时间方面都显著优于优化前，处理耗时近似为优化前的一半，加速效果明显，因此优化后的融合方

案具有稳定提升融合处理速度的能力，适用于大容量场景。

3.2 不同目标容量场景下的优化效果

对不同目标容量下的优化效果进行测试和对比，雷达数仍然为 10，目标数从 100 到 150。测试结果如图 11 所示，加速比如表 3 所示。从图表中可以看到，当目标数增多时，关联步骤中参与关联的航迹也相应增多。目标数每增加一个，探测到该目标的多个雷达均会增加一条航迹，关联步骤的计算量迅速增长，处理时延呈非线性趋势增加。对于优化前后的处理时间，优化后的处理耗时始终少于优化前，证明优化方案始终能够提供较好的加速效果，受目标数的影响小。且目标数为 150 时，加速比表现为明显的提升。如 2.3.3 节所示，由于在实际仿真中，对线程的调用也需要耗费一定的时间成本，因而当目标增长到一定数量时，加速的优势才能够更充分地体现出来。

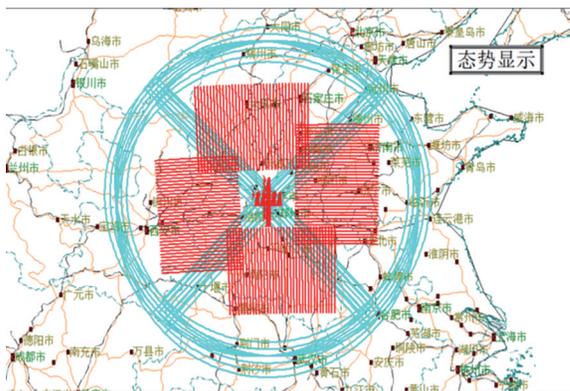


Fig.10 High capacity battle situation map
图 10 大容量战情图

表 2 优化前后融合处理耗时对比
Table2 Time consuming comparison of fusion processing before and after optimization

fusion scheme	after optimization	before optimization
average processing time/ms	1 580	3 267
maximum processing time/ms	3 430	6 578

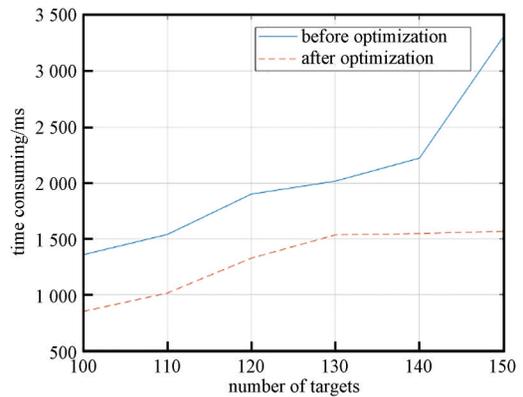


Fig.11 Optimization results of different numbers of targets
图 11 优化效果随目标数的变化

表 3 加速比随目标数的变化

Table3 The variation of acceleration ratio with target number

number of targets	100	110	120	130	140	150
acceleration ratio	1.600 2	1.518 2	1.432 8	1.313 9	1.437 1	2.113 5

4 结论

本文提出一种基于 OpenMP 的分布式组网雷达数据融合优化思路，对融合过程中航迹关联算法的航迹关联距离计算采用 OpenMP 进行并行化处理优化，并分线程优化数据传输过程。实验结果表明，与常规的串行处理方式相比，本文的优化方案能够有效提升数据处理速度，较好地改善组网雷达融合处理对低处理时延的要求；且优化方案提供的从外部数据传输和内部融合算法两方面进行优化的思路，具有较好的扩展性。

参考文献：

[1] 赵锋,艾小锋,刘进,等. 组网雷达系统建模与仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2018. (ZHAO Feng,AI Xiaofeng,LIU Jin,et al. Modeling and simulation of netted radar system[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2018.)

[2] 杨会军,李强. 组网雷达分布式协同干扰仿真研究[J]. 航天电子对抗, 2019,35(1):36-39. (YANG Huijun,LI Qiang. Research on simulation of distributed cooperative jamming to netted radar[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2019,35(1):36-39.) doi:10.16328/j.htdz8511.2019.01.009.

[3] WANG Yang,JIANG Xu,GUAN Nan,et al. Partitioning-based scheduling of OpenMP task systems with tied tasks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2020,32(6):1322-1339. doi:10.1109/TPDS.2020.3048373.

[4] 林跃杉,林郁,尹韬,等. FIR 基于 FPGA 的高并行度 DA 结构[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):170-175. (LIN Yueshan,LIN Yu,YIN Tao,et al. FPGA based high parallelism DA architecture for FIR[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):170-175.) doi:10.11805/TKYDA201801.0170.

[5] 裴向东,王庆林,廖林玉,等. 多核数字信号处理器并行矩阵转置算法优化[J]. 国防科技大学学报, 2023,45(1):57-66. (PEI Xiangdong,WANG Qinglin,LIAO Linyu,et al. Optimizing parallel matrix transpose algorithm on multi-core digital signal

- processors[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023,45(1):57–66.)
- [6] FANG Jianbin, VARBANESCU A L, SIPS H. A comprehensive performance comparison of CUDA and OpenCL[C]// 2011 International Conference on Parallel Processing. Taipei, Taiwan, China: IEEE. 2011:216–225. doi:10.1109/ICPP.2011.45.
- [7] ZHANG Wei, WU Q M J, YANG Xiaokang, et al. Multilevel framework to detect and handle vehicle occlusion[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008,9(1):161–174. doi:10.1109/TITS.2008.915647.
- [8] 刘扬,王鹏,杨瑞,等. 基于 OpenMP 的遥感影像并行 ISODATA 聚类研究[J]. 计算机工程, 2016,42(7):238–243. (LIU Yang, WANG Peng, YANG Rui, et al. Research on parallel ISODATA clustering for remote sensing image based on OpenMP[J]. Computer Engineering, 2016,42(7):238–243.) doi:10.3969/j.issn.1000–3428.2016.07.040.
- [9] 李博,黄东强,贾金芳,等. 基于 CPU+GPU 异构的模板计算优化研究[J]. 计算机工程, 2023,49(4):131–137. (LI Bo, HUANG Dongqiang, JIA Jinfang, et al. Research on optimization of heterogeneous stencil computing based on CPU+GPU[J/OL]. Computer Engineering, 2023,49(4):131–137.) doi:10.19678/j.issn.1000–3428.0064282.
- [10] 王雪,施岩龙,袁家斌. 雷达预警系统多目标轨迹预测的并行处理方法[J]. 小型微型计算机系统, 2016,37(4):835–840. (WANG Xue, SHI Yanlong, YUAN Jiabin. Parallel processing method of multiple targets trajectory prediction in radar early warning system[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2016,37(4):835–840.) doi:CNKI:SUN:XXWX.0.2016–04–039.
- [11] 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(10):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(10):39–42.) doi:10.16592/j.cnki.1004–7859.2015.10.010.
- [12] 鹿瑶,韩春雷,杨笛,等. 复杂环境下的多雷达点迹融合并行处理方法研究[J]. 现代导航, 2020,11(3):222–228. (LU Yao, HAN Chunlei, YANG Di, et al. Research on parallel processing method of multi-radar point track fusion in complex environment[J]. Modern Navigation, 2020,11(3):222–228.) doi:10.3969/j.issn.1674–7976.2020.03.013.
- [13] 衣晓,张怀巍,曹昕莹,等. 基于区间灰数的分布式多目标航迹关联算法[J]. 航空学报, 2013,34(2):352–360. (YI Xiao, ZHANG Huaiwei, CAO Xinying, et al. A track association algorithm for distributed multi-target systems based on Gray interval numbers[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013,34(2):352–360.) doi:10.7527/S1000–6893.2013.0040.
- [14] 施裕升,王晓科,蔡红豪,等. 一种分布式组网雷达的航迹融合二次处理方法[J]. 航天控制, 2021,39(6):54–59. (SHI Yusheng, WANG Xiaoke, CAI Honghao, et al. A secondary processing method of track fusion for distributed netted radar[J]. Aerospace Control, 2021,39(6):54–59.)
- [15] CHAPMAN B, JOST G, VAN DER PAS R. Using OpenMP: portable shared memory parallel programming[M]. Massachusetts, USA: The MIT Press, 2007.
- [16] 徐国伟,陈建,成怡. 基于 GPU 并行计算的雷达杂波模拟研究[J]. 计算机工程, 2020,46(11):306–314. (XU Guowei, CHEN Jian, CHENG Yi. Research on radar clutter simulation based on GPU parallel computing[J]. Computer Engineering, 2020,46(11):306–314.) doi:10.19678/j.issn.1000–3428.0055955.
- [17] 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(7):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(7):1526–1531.) doi:CNKI:SUN:XTFZ.0.2015–07–018.
- [18] 陈志杰,饶彬,李永祯,等. 雷达组网数据融合系统仿真实现[J]. 系统仿真学报, 2016,28(1):205–212. (CHEN Zhijie, RAO Bin, LI Yongzhen, et al. Simulation realization of netted radar data fusion systems[J]. Journal of System Simulation, 2016,28(1):205–212.) doi:CNKI:SUN:XTFZ.0.2016–01–029.

作者简介:

吴 静(1998–), 女, 在读博士研究生, 研究方向为组网雷达数据处理. email:763999965@qq.com.

谢晓霞(1974–), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电子信息系统仿真评估技术.

艾小锋(1983–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为双基地雷达成像、特征提取.

赵 锋(1978–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电子信息系统仿真建模评估.

徐振海(1977–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为阵列雷达设计与处理.