

文章编号: 1000-5641(2019)01-0105-10

基于KNL众核处理器平台的并行矩量法性能优化

顾宗静¹, 赵勋旺¹, 刘莹玉¹, 林中朝¹, 张 玉¹, 赵玉萍²

(1. 西安电子科技大学 电子工程学院, 西安 710071; 2. 英特尔(中国)有限公司, 北京 100013)

摘要: 基于 Intel 第二代 Xeon Phi 代号为 Knights Landing(KNL) 众核处理器平台, 利用 MPI+OpenMP 混合编程策略对并行矩量法(Method of Moments, MoM)进行了优化. 利用 OpenMP 编程技术和 KNL 的计算资源, 提高了 CPU(Center Processing Unit) 使用率; 线程的引入, 大幅度减少了矩阵填充过程中进程间的冗余积分; 为发挥 KNL 的 512 位矢量宽度优势, 通过向量化优化进一步提高了循环结构的执行效率; 对计算密集型、CPU 利用率高的矩阵求解过程, 通过引入的 OpenMP 编程策略, 减少了 MPI(Message Passing Interface) 通信时间, 加速了求解. 数值结果表明, 通过在 KNL 众核处理器平台上的优化, 可以极大地提升矩量法计算复杂电磁问题的效率.

关键词: 众核处理器; MPI+OpenMP; 并行矩量法; 向量化

中图分类号: TN820 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2019.01.012

Optimization of parallel method of moments based on KNL many-core processors

GU Zong-jing¹, ZHAO Xun-wang¹, LIU Ying-yu¹, LIN Zhong-chao¹,
ZHANG Yu¹, ZHAO Yu-ping²

(1. School of Electronic Engineering, XiDian University, Xian 710071, China;
2. Intel (China) Limited, Beijing 100013, China)

Abstract: The parallel method of moments (MoM) is successfully optimized using the MPI+OpenMP hybrid programming strategy, based on the second-generation Intel Xeon Phi many-core processor platform, codenamed Knights Landing (KNL). Using OpenMP programming technology, the utilization rate of the CPU (Center Processing Unit) is increased, and the computing resources of KNL are fully utilized. The introduction of threads substantially reduces the inter-process redundant integrals in the filling matrix process. In order to give full play to the advantage of KNL's 512-bit vector width, the efficiency of the loop structure is further enhanced through vector optimization. For the matrix solution process, which typically requires intensive computation and high

收稿日期: 2017-09-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0202102, 2016YFE0121600); 中国博士后科学基金(2017M613068); NSFC-广东联合基金超级计算科学应用研究专项(第二期)

第一作者: 顾宗静, 男, 博士研究生, 研究方向为电磁场与微波技术. E-mail: xdguzongjing@163.com.

通信作者: 张 玉, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电磁场与微波技术.

E-mail: yuzhang@mail.xidan.edu.cn.

CPU utilization, MPI (Message Passing Interface) communication time is reduced and the solution process is accelerated by introducing an OpenMP programming strategy. Numerical results show that the efficiency of solving complex electromagnetic problems by parallel MoM is greatly improved through optimization on the KNL many-core processor platform.

Keywords: many-core processor; MPI+OpenMP; parallel method of moments (MoM); vectorization

0 引言

随着计算机技术的飞速发展, 针对高度并行工作负载而设计的一种新型处理器, 即众核处理器, 依靠其集成的大量计算单元, 展现出强大的数据处理能力, 在高性能计算领域发挥着越来越重要的作用. 与传统通用多核处理器相比, 众核处理器具有成本低、功耗小等显著优势. 同时其优势还在于集成的核心数量超出同期通用多核处理器一个数量级, 在处理计算密集型、数据密集型任务时, 例如求解矩量法生成的复数稠密矩阵, 能够展现出强大的优势.

近年来, 国内已有若干利用众核处理器加速矩量法的文献^[1-3], 并且取得了较好的成果. 但是, 这些文献中利用的众核处理器都是作为协处理器出现的, 如 CPU/MIC 异构并行矩量法的研究, 由 CPU 控制任务分配和数据传输, 同时也负责部分计算任务, 将高并发度的代码段在 MIC(Many Integrated Core) 协处理器执行, 达到加速并行矩量法的目的^[3]. 但是, CPU 与 MIC 协处理之间的通信都是通过 PCI-E(Peripheral Component Interconnect Express) 接口实现的, 通信速率较慢, 限制了计算性能的提升; 尽管 MIC 协处理器具有独立的内存和存储, 但容量一般都较小, 因此异构协同计算能解决的实际问题受到协处理器存储容量的限制^[4]. 针对上述问题, Intel 于 2016 年推出了全新一代至强融核处理器, 代号为“骑士登陆”(KNL), 通过消除对 PCI-E 总线的依赖, 提供更高的可扩展性, 应对更广泛的工作负载和配置. 所以, 并行矩量法在 KNL 众核处理器平台上的计算和优化具有很高的研究价值.

KNL 众核处理器是 Intel 首款专门针对高度并行工作负载而设计的可独立自启动的主处理器: 能效型集成架构提供了比类似平台高得多的单元计算能力, 有效减少了计算成本; 内存和结构的集成最大限度地提升了内存容量, 并首次实现了内存与高速互连技术的集成, 为大规模并行和矢量化服务提供了有效平台.

为了充分利用 KNL 的众核计算资源以及发挥其超宽的矢量宽度优势, 本文基于 KNL 众核处理器平台对并行矩量法程序开展了优化工作^[5-7]; 通过与商业软件计算结果的对比, 验证了优化算法的正确性; 利用 KNL 计算集群, 仿真了未知量超过 20 万的飞机模型的散射特性, 程序优化后的性能有较大提升. 值得指出的是, 并行矩量法在 KNL 众核处理器平台上的计算和优化此前尚未见有公开的文献报道.

1 并行矩量法

1.1 矩阵填充分析

本文中矩量法采用的基函数为 RWG(Rao-Wilton-Glisson)基函数, 是现今广泛使用的一种矩量法基函数, 它被定义在具有公共边的两个相邻三角形上, 可模拟任意形状物体的表面电、磁流分布, 采用伽辽金方法可得到矩量法矩阵方程^[8]

$$ZI = V, \quad (1)$$

其中, Z 表示大小为 $N \times N$ 的阻抗矩阵, I 和 V 均是 $N \times 1$ 的列向量, 二者分别表示电流列向量和激励电压列向量. Z 中矩阵元素的内外两层面积分可由二维高斯积分来近似得出

$$\begin{aligned} Z_{mn}^{\pm\pm} &= \frac{jk\eta}{4\pi} \frac{l_m l_n}{4A_m A_n} \iint \left[(r_t - v_m^\pm)(r'_s - v_n^\pm) - \frac{4}{k^2} \right] \frac{e^{-jkR}}{R} ds' ds \\ &= \frac{jk\eta}{4\pi} l_m l_n \left[\sum_{t=1}^7 \sum_{s=1}^7 W(t)W(s)(r_t r'_s - \frac{4}{k^2}) \frac{e^{-jkR}}{R} - v_n^\pm \sum_{t=1}^7 \sum_{s=1}^7 W(t)W(s)r_t \frac{e^{-jkR}}{R} \right. \\ &\quad \left. - v_m^\pm \sum_{t=1}^7 \sum_{s=1}^7 W(t)W(s)r'_s \frac{e^{-jkR}}{R} + v_m^\pm v_n^\pm \sum_{t=1}^7 \sum_{s=1}^7 W(t)W(s) \frac{e^{-jkR}}{R} \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中高斯采样点数为 7 个, r_t 和 r'_s 分别为场三角形和源三角形上的采样点, $W(t)$ 和 $W(s)$ 为采样点对应的权值, v_m^\pm 和 v_n^\pm 分别是第 m 和 n 条公共边对应的顶点坐标, $R = |r_t - r'_s|$. 对于并行矩量法, 由于 MPI 分布式内存并行策略的引入会使进程间产生冗余积分.

1.2 冗余计算

在矩阵填充过程中, 相同的积分计算被不同进程反复多次执行, 称为冗余积分. 如图 1 所示, 假设为公共边编号与剖分后三角形网格的对应关系, 公共边个数为 N . 图 2 是将 $N \times N$ 个矩阵元素按照二维块循环的方式分布到二维 MPI 虚拟拓扑网格为 3×2 、分块大小为 2×2 的矩阵分布情况, 框中的数字代表元素的索引. 如果只关心 (7,2) 和 (7,3) 两个矩阵元素, 则会用到图 1 中三角形 KI 的二重积分, 图 2 中 (7,2) 分配到了进程 P_{00} 上, (7,3) 分配到了 P_{01} 进程上, 这两进程都要计算这一积分, 造成冗余计算.

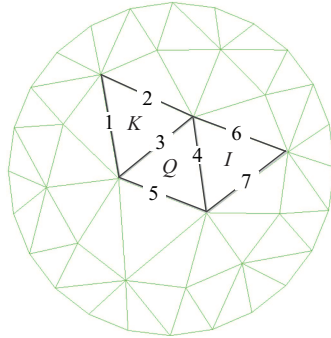


图 1 三角形和公共边编号对应关系

Fig.1 Correspondence between triangle and common edge number

	0	1	0	1	
0	11 12	13 14	15 16	17 18
	21 22	23 24	25 26	27 28
1	31 32	33 34	35 36	37 38
	41 42	43 44	45 46	47 48
2	51 52	53 54	55 56	57 58
	61 62	63 64	65 66	67 68
0	71 72	73 74	75 76	77 78
	81 82	83 84	85 86	87 88
	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓

图 2 二维块循环分布

Fig.2 2D block-cyclic distribution

根据上述分析可知, 矩阵填充过程中的 MPI 进程越多, 进程间产生的冗余积分计算量越大, 影响了矩阵填充的效率.

1.3 矩阵求解

采用 LU 分解算法对复数稠密矩阵进行求解, LU 分解过程包含 panel 列分解、panel 行更新和 trailing 更新这 3 个部分^[8-9]. 假设矩阵大小为 $N \times N$ 、分块矩阵的大小为 $n_b \times n_b$ 、进程网格选择为 $P_r \times P_c$, 计算机发送一次消息的通信延迟为 α , 发送一个矩阵元素的时间为

β , 则一次性发送 L 个矩阵元素所需要的通信时间 (T) 为

$$T = \alpha + \beta L. \quad (3)$$

以双精度复数矩阵 LU 分解为例, 参考文献 [8], 得出 panel 列分解、panel 行更新、trailing 更新的通信时间分别为

$$T_{\text{panel,Column,comm}} = 2\alpha n_b \log_2 P_r + 2\beta n_b^2 \log_2 P_r, \quad (4a)$$

$$T_{\text{panel,Row,comm}} = (P_c - 1) \left(\alpha + \frac{n_b^2}{2} \beta \right), \quad (4b)$$

$$T_{\text{trailing,comm}} = (P_c - 1) \left(\alpha + \frac{(N - kn_b)n_b}{P_r} \beta \right) + (\log_2 P_r - 1) \left(\alpha + \frac{(N - kn_b)n_b}{P_c} \beta \right). \quad (4c)$$

由式 (4a)–式 (4c) 可以看出, 进程网格 $P_r \times P_c$ 、分块矩阵的大小 $n_b \times n_b$ 、矩阵维数 N 决定了矩阵求解过程的 MPI 通信开销. 如果能够降低 LU 分解过程的通信时间, 则会大幅提升矩阵求解的效率^[10].

2 计算平台简介

本文使用的 KNL 众核处理器编号为 7210 (简称 KNL7210), 采用 Slivermont 的微架构和光刻 14 nm 工艺, 处理器基本频率为 1.3 GHz, 拥有 64 核, 每核支持四线程, 即总计 256 个线程. 每个处理器有 32 个核片, 每个核片由两个核组成, 并共享 1 MB 二级缓存, 每个核心内搭载两个 512 位宽的 VPU (Vector Processing Units), 可以同时处理 8 个双精度浮点或者 16 个单精度浮点运算, 超宽的矢量宽度, 提高了高度并行计算性能的标准.

单个 KNL7210 能提供超过 3 TFlops 的双精度浮点处理性能或大于 6 TFlops 的单精度浮点处理性能. 最大内存达到 384 GB, 内存类型为 DDR4-2133, 最大内存带宽为 102 GB/s, 同时集成 16 GB 高带宽内存-MCDRAM(Multi-Channel DRAM), 可为内存访问密集型的工作负载提供高达 500 GB/s 的可持续高内存带宽^[11].

3 优化策略分析

3.1 向量化优化分析

为了充分发挥 KNL7210 超宽的矢量宽度优势, 进一步提高循环结构的执行效率, 对公式 (2) 中的高斯数值积分过程进行向量化优化^[9,12], 加速矩阵填充过程. 图 3 给出了向量化过程的伪代码.

并行矩量法向量化优化前后, 利用单个 KNL7210, 计算未知量为 58 652 的飞机模型的散射特性, 性能的提升情况如表 1 所示.

由表 1 可以得出, 向量化后矩阵填充效率提升 11.09%. 所以, 在 KNL 众核处理器平台进行向量化优化对提升程序效率至关重要.

3.2 MPI+OpenMP 混合编程

根据前文分析的矩阵填充算法以及存在的问题, 综合考虑实现数据的局部性、提高 Cache 命中率^[13-15]、降低冗余积分计算量以及充分利用 KNL7210 的计算资源等条件, 在 MPI 进程内部利用 OpenMP 共享内存的编程方式开启超线程, 获取最优性能^[16].

```

//PROGRAM:
INPUT epsi(:),eta(:),zeta(:),wk(:)      !epsi(:),eta(:),zeta(:)为确定采样点的位置参数, wk(:)采样点对应权值
OUTPUT(fm,fn,fnn)                       !三角形二重积分的积分值
!Dir$ attributes align : 64 ::epsi,eta,zeta,wk
Do m=1, NG                               !高斯采样点循环

    split-array(rm(:))                   !拆分数组

    !Dir$ simd reduction(+:rnG1,rnG2,rnG3,G)
    Do n=1,NG                             !高斯采样点循环
        compute(rnG1,rnG2,rnG3,G)
    Enddo                                  !高斯采样点循环结束

    join-array(rg(:))                   !合并数组, 数组赋值

    compute(f,fn,fn,fnn)
Enddo                                     !高斯采样点循环结束

```

图 3 矩阵填充向量化优化伪代码

Fig. 3 Pseudo-code of vector optimization for the filling matrix

表 1 矩阵填充向量化优化结果

Tab. 1 Results of vector optimization for the filling matrix			
	进程网格	矩阵填充/s	矩阵填充效率提升/%
优化前	8×8	766.94	—
向量化优化	8×8	681.87	11.09

图 4 给出了矩阵填充过程优化后的伪代码.

对于计算密集型、数据密集型的矩阵求解部分, CPU 利用率高, 求解速度与处理器的物理核数有关^[17]. 在不改变 LU 分解算法的基础上, 降低分解过程的通信时间, 将会大幅提升矩量法求解电磁问题的效率. 分析式(4a)–(4c)可以得出 panel 列分解和 panel 行更新过程中通信时间和进程网格 $P_r \times P_c$ 成正比的结论. trailing 更新过程中同时存在行向和列向通信, 为方便讨论, 将根据式 (4a)–式 (4c) 分析 trailing 更新过程的通信时间换算为分析如下两式.

$$\text{coefficient1} = \frac{P_c - 1}{P_r} + \frac{\log_2 P_r - 1}{P_c}, \quad (5a)$$

$$\text{coefficient2} = P_c + \log_2 P_r - 2. \quad (5b)$$

由式 (5a) 和式 (5b) 可以看出, coefficient1 的第二项 $(\log_2 P_r - 1)/P_c$ 值小于 1, 考虑第一项 $(P_c - 1)/P_r$ 和 $P_r \leq P_c$ 条件^[8], 得出当 P_r 和 P_c 较小时, coefficient1 的值较小; 同样, coefficient2 的值也是随着 P_r 和 P_c 的减小而减小. 通过分析可以得出, 矩阵求解过程的通信时间随着 P_r 和 P_c 的变小而变短, 所以求解过程可通过引入线程来减少 MPI 进程数, 达到减少 LU 分解通信开销的目的.

4 数值算例

首先在单个 KNL7210 上分析飞机模型 I 的散射特性, 与商业软件 FEKO 的计算结果对比, 验证程序优化的正确性^[18]; 其次, 在 KNL7210 集群(8 个 KNL7210 组成)上分析未知量超过 20

万的飞机模型 II 的散射特性, 研究程序优化后在集群上性能的提升.

CALL omp_set_number_threads(number_threads)	!设置线程数
!SOMP PARALLEL	!定义所有线程执行的并行区域开始
!SOMP DO private(variable)	!DO循环的代码将被多个线程并行执行
!SOMP collapse(2)	!两层循环折叠到一个单层循环结构
!SOMP schedule(static, NumFieldTriangles)	!执行静态任务调度
Do pp = 1, NumFieldTriangles	!场三角形循环
p = FieldTriangleList(pp)	
Do qq = 1, NumSourceTriangles	!源三角形循环
q = SourceTriangleList(qq)	
compute_interactions(p,q)	!计算三角形对(p,q)的积分
Do e = 1, 3	!场三角形边循环
mm = edge_num(p,e)	!得到第p个场三角形边的全局索引mm
If (mm.NE.-1 .and. nn is on this process) then	!判断第mm条边是否为公共边并确定所在进程
Do f = 1, 3	!源三角形边循环
nn = edge_num(q,f)	!得到第q个源三角形边的全局索引nn
If (nn.NE.-1 .and. mm is on this process	!判断第nn条边是否为公共边并确定所在进程
Z(mm,nn) = Z(mm,nn) + delta_Z(mm,nn)	!阻抗矩阵累加计算
Endif	
Enddo	!源三角形边循环结束
Endif	
Enddo	!场三角形边循环结束
Enddo	!源三角形循环结束
Enddo	!场三角形循环结束
!SOMP END DO	!多线程执行DO循环代码结束
!SOMP END PARALLEL	!多线程执行的并行区域结束

图4 矩阵填充 MPI+OpenMP 优化伪代码

Fig. 4 Pseudo-code of optimization using MPI+OpenMP for the filling matrix

4.1 飞机模型 I 的散射特性

飞机 I 电磁仿真模型如图 5(a) 所示, 入射平面波频率为 500 MHz(沿机头方向), 极化方向为垂直极化, 计算其双站 RCS(Radar-Cross Section)^[19]. 该模型被剖分为 39 102 个三角形, 公共边个数为 58 652, 故阻抗矩阵大小为 58 652×58 652. 计算得到飞机的 3D 双站 RCS 结果如图 5(b) 所示. 图 6 给出了飞机的 xoy 面和 xoz 面的 2D 双站 RCS 结果, 可见程序优化后的计算结果与商业软件 FEKO 的仿真结果吻合, 进而证明了程序在 KNL7210 众核处理器上优化的正确性.

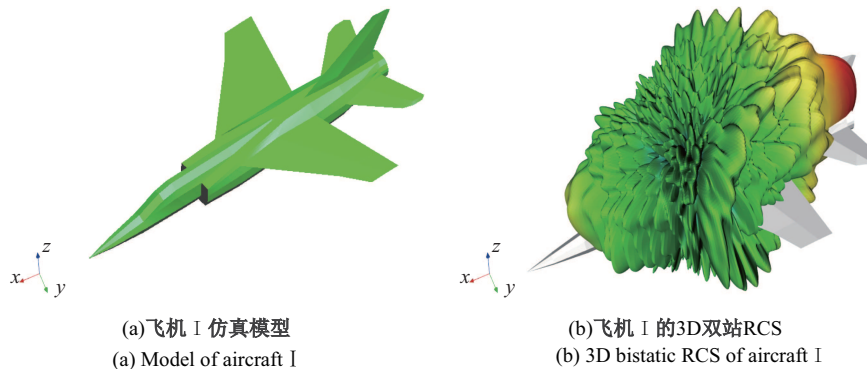


图5 飞机 I 仿真模型及 3D 双站 RCS 结果

Fig. 5 Model of aircraft I and 3D bistatic RCS

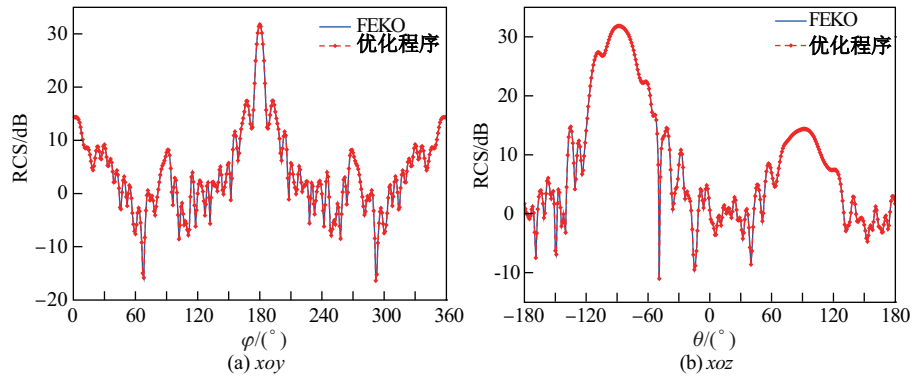


图6 飞机 I 的 2D 双站 RCS 结果

Fig. 6 2D bistatic RCS of aircraft I

在该算例中, 表 2 给出了并行矩量法优化前后其矩阵填充过程中的总积分次数和进程间产生的冗余积分情况. 由表 2 的数据可得, 程序优化前冗余比例为 70.18%, 明显高于优化后冗余积分所占比例, 这会大大影响矩阵填充的速度. 表 3 列出了并行矩量法优化前后各部分的计算时间情况. 由表 3 可以看出, 采用 4 个 MPI 进程、矩阵填充和矩阵求解分别开启 64 和 16 个 OpenMP 线程时, 仿真该模型的效率最佳, 比优化前加速了 2.62 倍, 其中矩阵填充加速了 5.81 倍. 由于该模型的计算规模较小, 矩阵求解过程的通信时间较短, 所以, 仿真该模型时矩阵求解过程的加速效果不明显.

表 2 矩阵填充过程积分次数测试

Tab. 2 Integral numbers of the filling matrix

	进程数目	进程网格	线程数目	总积分次数	冗余次数	冗余比例/%
串行	1	1	1	1 529 435 664	0	0
优化前	64	8×8	1	5 129 137 924	3 599 702 260	70.18
优化后	2	1×2	128/32	2 293 527 768	764 092 104	33.32
	4	2×2	64/16	3 439 353 316	1 909 917 652	55.53
	8	2×4	32/8	4 069 270 002	2 539 834 338	62.41
	16	4×4	16/4	4 814 555 769	3 285 120 105	68.23

注: 线程数目一列中, m/n 表示矩阵填充和矩阵求解在每个节点分别开启 m 和 n 个 OpenMP 线程.

表 3 运行时间对比

Tab. 3 Comparison of running time

	进程网格	线程数目	矩阵填充/s	矩阵求解/s	总时间/s	总加速倍数
优化前	8×8	1	766.94	255.27	1022.21	—
优化后	1×2	128/32	230.20	285.76	515.96	1.98
	2×2	64/16	131.91	258.49	390.40	2.62
	2×4	32/8	153.16	261.16	414.32	2.47
	4×4	16/4	177.24	259.23	436.47	2.34

注: 线程数目一列中, m/n 表示矩阵填充和矩阵求解在每个节点分别开启 m 和 n 个 OpenMP 线程.

4.2 飞机模型 II 的散射特性

飞机模型 II 的仿真模型如图 7(a) 所示, 平面入射波频率为 450 MHz (沿机头方向), 极化方向为垂直极化, 计算其双站 RCS. 该模型被剖分为 151 452 个三角形, 公共边个数为 227 178, 故阻抗矩阵大小为 227 178×227 178. 计算得到飞机的 3D 双站 RCS 如图 7(b) 所示. 图 8 给出了飞机的 xoy 面和 xoz 面的 2D 双站 RCS 结果.

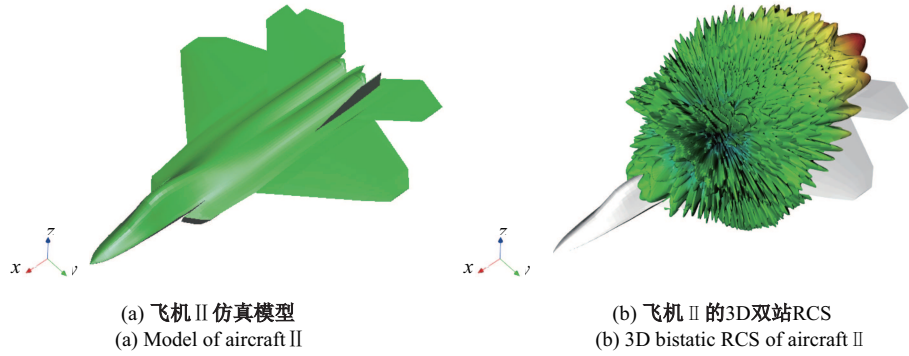


图 7 飞机 II 仿真模型及 3D 双站 RCS 结果

Fig. 7 Model of aircraft II and 3D bistatic RCS

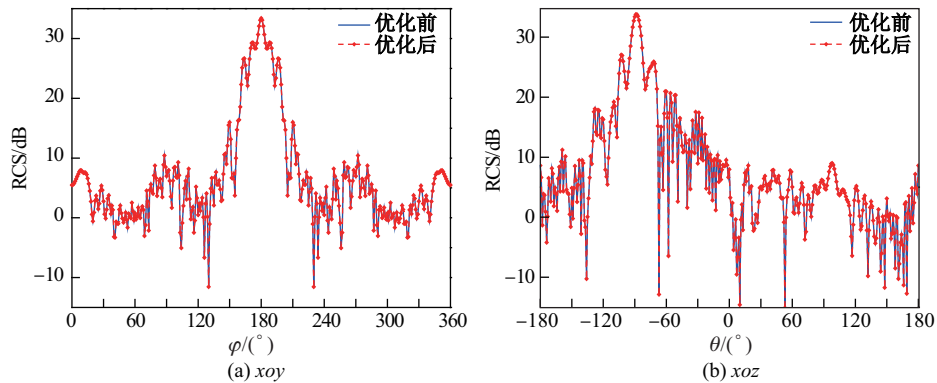


图 8 飞机 II 的 2D 双站 RCS 结果

Fig. 8 2D bistatic RCS of aircraft II

表 4 给出了该算例矩阵填充过程中的总积分次数和进程间产生的冗余积分情况. 由表 4 的数据可得, 程序优化前冗余比例为 73.77%, 均高于优化后冗余积分所占的比例. 矩阵求解部分开启 OpenMP 线程后, 减少了 MPI 进程数; 根据公式(7)得出减少了通信时间, 加速了矩阵求解过程. 表 5 列出了并行矩量法优化前后各部分的计算时间情况, 其中矩阵填充和矩阵求解每个节点使用 4 个 MPI 进程、分别开启 64 和 16 个 OpenMP 线程, 可以获得最优性能. 该算例中进程和线程的最优分配策略和上例中的计算资源分配策略一致. 所以, 本文中的计算资源分配策略对今后矩量法在 KNL 系列上的优化具有重要的借鉴和指导意义. 由表 5 可得, 优化后矩阵填充速度加速 13.27 倍, 矩阵求解速度加速 1.26 倍, 总的仿真计算速度加速了 3.62 倍. 程序优化后在 KNL7210 集群上的运行性能得到了明显提升.

5 结论

本文基于 KNL7210 众核处理器计算平台, 对并行矩量法进行了优化, 通过引入 OpenMP 共享内存的并行编程策略, 显著减少了矩阵填充过程的冗余积分计算量, 降低了矩阵求解过程的通信时间, 向量化优化进一步提高了高斯数值积分过程中循环结构的执行效率. 通过对飞机模型 I 和飞机模型 II 散射特性的仿真分析, 验证了优化算法的正确性, 并分析了并行矩量法优化后其矩阵填充和求解的加速情况. 测试结果表明, 基于 KNL7210 众核处理器平台, 优化后的并行矩量法各部分计算均有较好的性能提升, 对后续在 KNL 系列平台开展矩量法研究和优化, 解决更多具有实际意义的电磁问题奠定了基础.

表 4 矩阵填充过程积分次数测试

Tab. 4 Integral numbers of the filling matrix

	进程数目	进程网格	线程数目	总积分次数	冗余次数	冗余比例/%
串行	1	1	1	22 937 708 304	0	0
优化前	512	16×32	1	87 453 385 158	64 515 676 854	73.77
优化后	8	2×4	256/64	61 178 300 578	38 240 592 274	62.51
	16	4×4	128/32	71 538 061 156	48 600 352 852	67.94
	32	4×8	64/16	76 226 472 670	53 288 764 355	69.91
	64	8×8	32/8	81 222 150 025	58 284 441 721	71.76
	128	8×16	16/4	84 157 313 530	61 219 605 226	72.74

注: 线程数目一列中, m/n 表示矩阵填充和矩阵求解在每个节点分别开启 m 和 n 个 OpenMP 线程。

表 5 运行时间对比

Tab. 5 Comparison of running time

	进程网格	线程数目	矩阵填充/s	矩阵求解/s	总时间/s	总加速倍数
优化前	16×32	1	7 977.94	3 079.69	11 057.63	—
优化后	2×4	256/64	1 124.01	3 261.46	4 385.46	2.52
	4×4	128/32	715.20	3 231.76	3 946.96	2.80
	4×8	64/16	601.36	2 449.08	3 050.44	3.62
	8×8	32/8	810.63	2 947.81	3 758.44	2.94
	8×16	16/4	1 243.13	3 081.21	4 324.35	2.56

注: 线程数目一列中, m/n 表示矩阵填充和矩阵求解在每个节点分别开启 m 和 n 个 OpenMP 线程。

[参 考 文 献]

- [1] CHEN Y, ZHANG G, LIN Z, et al. Solution of EM problems using hybrid parallel MIC/CPU implementation of higher-order MoM [C]//IEEE, International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and Emc Technologies. IEEE, 2016:789-791.
- [2] 张光辉. CPU/MIC异构平台中矩量法与时域有限差分法的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [3] 左胜, 陈岩, 张玉, 等. 一种可扩展异构并行核外高阶矩量法 [J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2017, 44(1): 146-151.
- [4] 赖明澈. 数据并行协处理器体系结构的研究与实现 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [5] HARRINGTON R F, HARRINGTON J L. Field Computation by Moment Methods [M]. NewYork: Oxford University Press, 1996.
- [6] ZHANG Y, SARKAR T K. Parallel Solution of Integral Equation Based EM Problems in the Frequency Domain [M]. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2009.
- [7] RAO S M, WILTON D R, GLISSON A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1982, 30(3): 409-418.
- [8] 张玉, 赵勋旺, 陈岩, 等. 计算电磁学中的超大规模并行矩量法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.
- [9] RANA V S, LIN M, CHAPMAN B. A scalable task parallelism approach for LU decomposition with multi-core CPUs [C]//Proceedings of the 2nd Internationsl Workshop on Extreme Scale Programming Models and Middleware. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2016: 17-23.
- [10] ZHANG G, CHEN Y, ZHANG Y, et al. MIC accelerated LU decomposition for method of moments [C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/ursi National Radio Science Meeting. IEEE, 2015: 756-757.
- [11] JEFFERS J, REINDERS J. Intel Xeon Phi协处理器高性能编程指南 [M]. 陈健, 李慧, 杨昆, 等, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [12] 高伟, 赵荣彩, 韩林, 等. SIMD自动向量化编译优化概述 [J]. 软件学报, 2015, 26(6): 1265-1284.
- [13] 周领良, 朱延超, 刘轶, 等. 基于Cache命中率校准的并行程序性能预测 [C]//2014全国高性能计算学术年会论文集. 中国计算机学会, 2015: 814-817.
- [14] 艾维丽. 浅析Cache命中率与块的大小之间的关系 [J]. 价值工程, 2011, 32: 153.
- [15] 叶凝, 应忍冬, 朱新忠, 等. 众核处理器系统可靠性优化方案 [J]. 计算机与现代化, 2013, 218(10): 143-148.

- [16] MIWA M, NAKASHIMA K. Progression of MPI Non-blocking Collective Operations Using Hyper-Threading [C]//2015 23rd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP). IEEE, 2015: 163-171.
- [17] QUN N H, KHALIB Z I A, WARIP M N, et al. Hyper-threading technology: Not a good choice for speeding up CPU-bound code [C]//International Conference on Electronic Design. IEEE, 2017: 578-581.
- [18] RAJESH N, MALATHI K, RAJU S, et al. Design of vivaldi antenna with wideband radar cross section reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 2102-2105.
- [19] HU C F, LI N J, CHEN W J, et al. High-precision RCS measurement of aircraft's weak scattering source [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(3): 772-778.

(责任编辑: 李 艺)

(上接第 104 页)

- [19] CAO J, XU B Y, LUO B D, et al. Novel BiOI/BiOBr heterojunction photocatalysts with enhanced visible light photocatalytic properties [J]. Catalysis Communications, 2011, 13: 63-68.
- [20] HENDON C H, TIANA D, FONTECAVE M, et al. Engineering the optical response of the titanium-MIL-125 metal-organic framework through ligand functionalization [J]. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135: 10942-10945.
- [21] CHEN Y J, WEN M, WU Q S. Stepwise blossoming of BiOBr nanoplate-assembled microflowers and their visible-light photocatalytic activities [J]. CrystEngComm, 2011, 13: 3035-3039.
- [22] LEI Y Q, WANG G H, SONG S Y, et al. Room temperature, template-free synthesis of BiOI hierarchical structures: Visible-light photocatalytic and electrochemical hydrogen storage properties [J]. Dalton Transactions, 2010, 39: 3273-3278.
- [23] YU C L, YU J C, FAN C F, et al. Synthesis and characterization of Pt/BiOI nanoplate catalyst with enhanced activity under visible light irradiation [J]. Materials Science and Engineering B, 2010, 166: 213-219.
- [24] ROSS H, BENDIG J, HECHT S. Sensitized photocatalytic oxidation of terbutylazine [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1994, 33(4): 475-481.
- [25] CHATTERJEE D, MAHATA A. Demineralization of organic Pollutants on the DyeModified TiO₂ semiconductor particulate system using visible light [J]. Applied Catalysis Environmental, 2001, 33(2): 119-125.
- [26] MOSER J, GRAETZEL M. Photosensitized electron injection in colloidal semiconductors [J]. Journal of the American Chemical Society, 1984, 106: 6557-6564.

(责任编辑: 李 艺)