鲲鹏 HPC 挑战赛 S2
优化答辩

参赛队伍・ACEtaffy喵

CONV / TRSM / ZGEMM

2026.9.6

 ChenyuHeee・CONV、整合与验收（组长）

 Bill Feng・ZGEMM

 Evelina・TRSM

Part ε・背景 & 环境

缩写	英文全称	中文含义	要完成的计算	本题的优化重点
CONV	Convolution	二维卷积	用卷积核扫描输入，得到输出特征图	保持 FP32 累加顺序，同时计算更多输出
TRSM	Triangular Solve	三角方程求解	求解 L × X = B，其中 L 是下三角矩阵	按依赖顺序求解，把更新阶段并行化
ZGEMM	Double-precision complex General Matrix-Matrix Multiplication	双精度复数通用矩阵乘法	计算 C = alpha × A × B + beta × C	组织复数数据、寄存器块和缓存访问

GitHub 仓库管理

- 用 Issue 记录假设和待验证的问题
- 在分支里写代码，并在集群完成对照实验
- PR

提出假设 → 修改代码 → 误差检查 → 对比测试后决定保留或回退

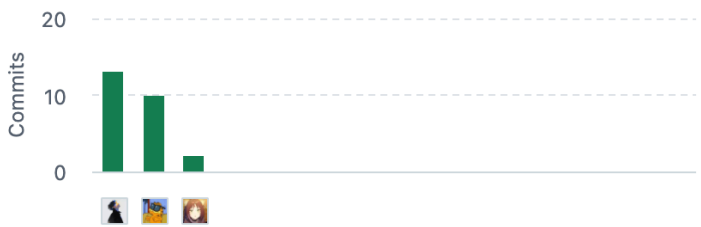
贡献 协作

Summary

Excluding merges, **3 authors** have pushed **23 commits** to main and **25 commits** to all branches.

On main, **60 files** have changed and there have been **3,942 additions** and **281 deletions**

Top committers



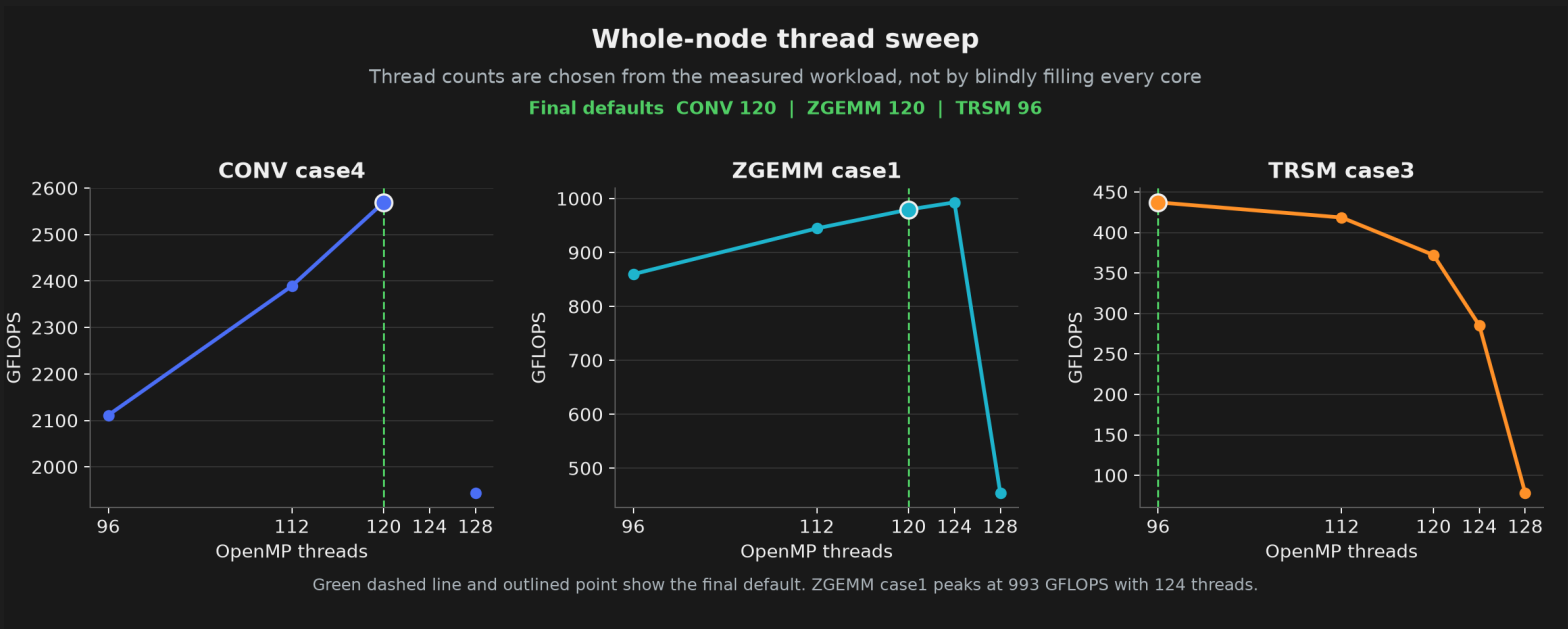
常用命令

```
# 本地：编译并检查三题是否 PASS
./scripts/build_local.sh

# 鲲鹏集群：加载 TRSM 需要的 KML 环境，跑全部官方用例
source ./env_kunpeng.sh && bash run_all.sh
```

- 本地只核对正确性；性能数据以鲲鹏集群复测结果为准
- run_all.sh 会编译并运行 10 个官方用例，结果写入 results.md

环境/线程



- 鲲鹏 920，共 128 个物理核
- NEON 是 ARM 架构提供的 SIMD 向量指令，一条指令可以同时处理多个数据

```arm_neon.h>

float32x4_t acc = vdupq_n_f32(0);     // 4 个 FP32 累加器
float32x4_t x   = vld1q_f32(input);    // 一次加载 4 个数据
acc = vfmaq_n_f32(acc, x, weight);    // 4 路同时做乘加
vst1q_f32(output, acc);
 // 写回 4 个结果
```

这段代码来自 CONV/conv2d.c 的向量化路径；float32x4_t 表示 4 个单精度浮点数，vld1q、vfmaq_n 和 vst1q 分别完成向量加载、乘加和存储。

Part 1 · CONV

CONV 的约束

- 卷积计算使用单精度浮点数（FP32）
- 每个输出点都按参考代码的顺序计算：先遍历卷积核的行，再遍历列
- 一次多算几个输出点；连续数据用向量指令处理，并尽量复用已经读入的输入
- 边缘凑不满一个完整块时，改走收尾代码，保证所有尺寸的结果都正确

CONV 的计算与优化过程

CONV 计算过程

先保证一个输出元素的累加顺序不变，再扩大不同输出之间的并行度，并复用输入行

不能改变

一个标量输出

out[y][x] = sum

for jk = 0 .. KH-1

for ik = 0 .. KW-1

sum += input[y+jk][x+ik]

× kernel[jk][ik]

同一个输出元素内部

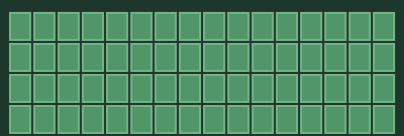
始终保持 jk → ik

扩大
工作单位

允许改变

一次计算 4 行 × 16 列输出

64 个输出元素各自保留累加器



外层同时计算多个输出

连续 16 列一起做向量计算

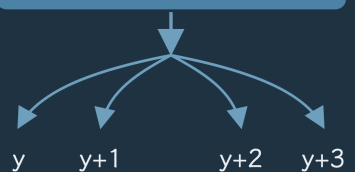
每个输出元素仍按原来的顺序累加

边界不足一个完整块时走安全回退

一条输入行怎么被复用

读取连续窗口 input[Y][x … x+15+KW-1]

固定的一条输入行 Y



只给满足 0 ≤ Y - 输出行 < KH 的输出行使用

每个输出行只在对应的 jk 位置使用这条输入行

红色 一个输出元素的累加顺序

绿色 多个输出一起算，连续列做向量计算

蓝色 一条输入行给相邻输出行复用

能并行是因为不同输出彼此独立，不是因为改了同一个输出的求和顺序

保留累加顺序

```
for (int kh = 0; kh < kH; ++kh) {
    for (int kw = 0; kw < kW; ++kw) {
        acc += input[row + kh][col + kw] * kernel[kh][kw];
    }
}
```

优化没有重排单个输出点的累加链，先保证结果和参考实现一致，再从多个输出点之间寻找并行性。

NEON 向量化

```
float32x4_t x = vld1q_f32(inrow);
q0 = vfmaq_n_f32(q0, x, k0);
q1 = vfmaq_n_f32(q1, x, k1);
```

一次加载 4 个 FP32 数据，并同时更新多个输出累加器。向量化放在不改变单个输出顺序的位置。

四行复用输入

```
q0 = vfmaq_n_f32(q0, x, k0);
q1 = vfmaq_n_f32(q1, x, k1);
q2 = vfmaq_n_f32(q2, x, k2);
q3 = vfmaq_n_f32(q3, x, k3);
```

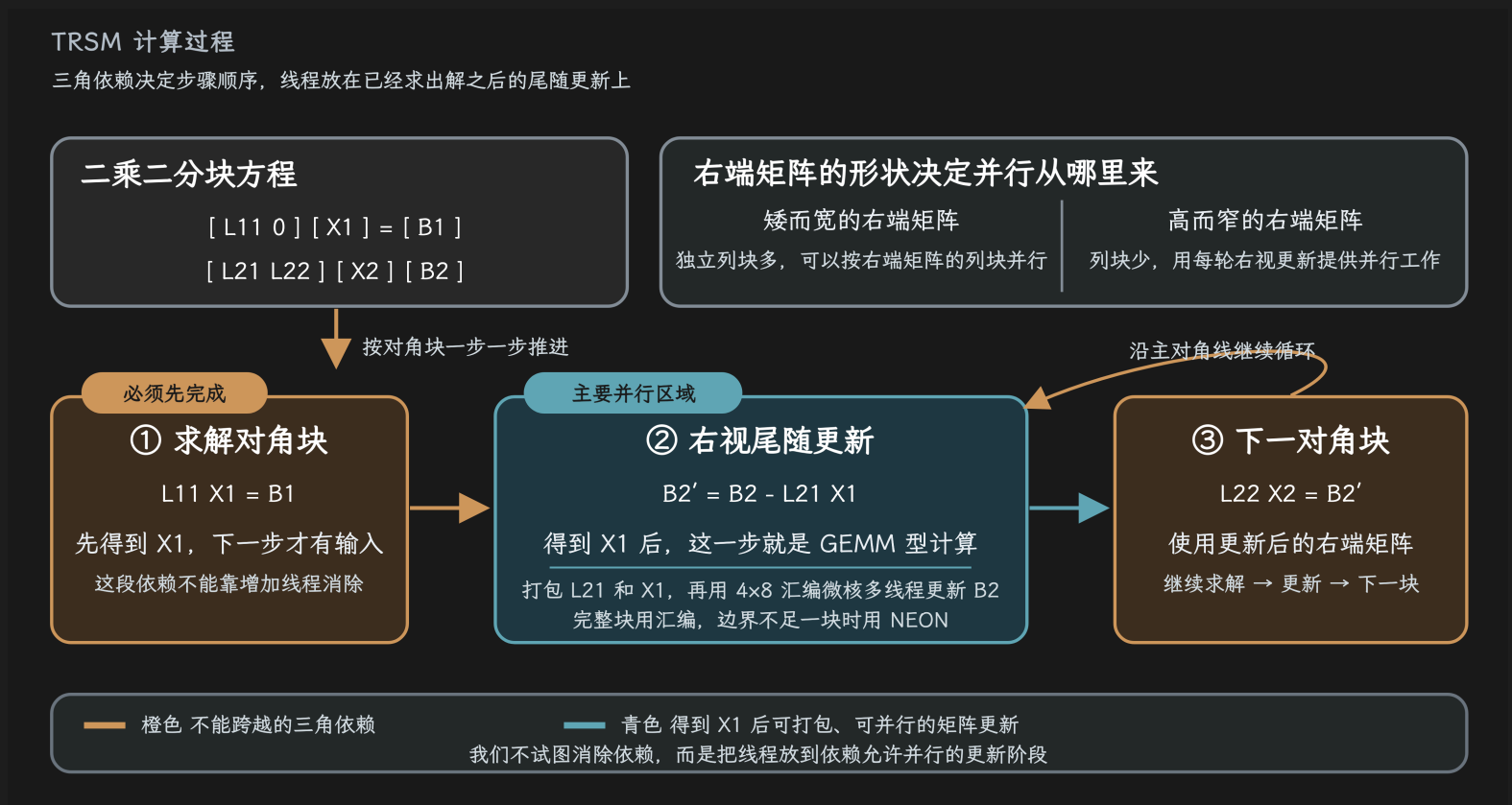
同一批输入服务四个输出累加器，减少重复加载。凑不满向量的边界区域则走收尾路径。

Part 2 · TRSM

TRSM 的依赖

- 下三角方程要沿着对角线逐块求解：当前块算完，下一块才能继续
- 右端矩阵矮而宽时，独立的列块很多，可以把不同列块分给不同线程
- 右端矩阵高而窄时，列块不够分；先解出当前块，再并行更新后面的区域
- 大小完整的块使用 AArch64 汇编核；边缘剩下的小块用 NEON 代码处理

TRSM 的分块求解过程



按矩阵形状分派

```
if (nrhs >= n) {
    solve_by_columns(L, B, nrhs);
} else {
    solve_right_looking(L, B, n, nrhs);
}
```

右端矩阵矮而宽时优先利用列并行，高而窄时转向右视分块，避免线程没有足够的独立列块可做。

对角块与更新阶段

```
solve_diagonal_block(Bc, Lc);
#pragma omp parallel for schedule(dynamic)
for (int b = bs; b < n; b += bs)
    update_trailing_block(Bc, Lc, b);
```

先完成有依赖的对角块，再并行更新后面的区域。并行从依赖允许的位置开始。

完整块与边界块

```
if (mr == 4 && nr == 8)
    micro_asm_4x8(Ap, Bp, C);
else
    micro_neon_edge(Ap, Bp, C, mr, nr);
```

完整块使用 AArch64 汇编微核，边缘尺寸使用 NEON 兜底，兼顾主路径效率和任意尺寸的正确性。

Part 3・ZGEMM

ZGEMM 的优化范围

- 我们重点优化行主序、A 和 B 都不转置的常用调用
- 一个复数乘法拆成实部和虚部的实数运算，方便用向量指令计算
- 打包 A 时顺手乘上 alpha；第一次读取 C 块时再处理 beta，减少内层循环的重复工作
- 其他存储方式或转置组合继续用通用代码处理，保证各种调用都能正确运行

ZGEMM

ZGEMM 计算过程

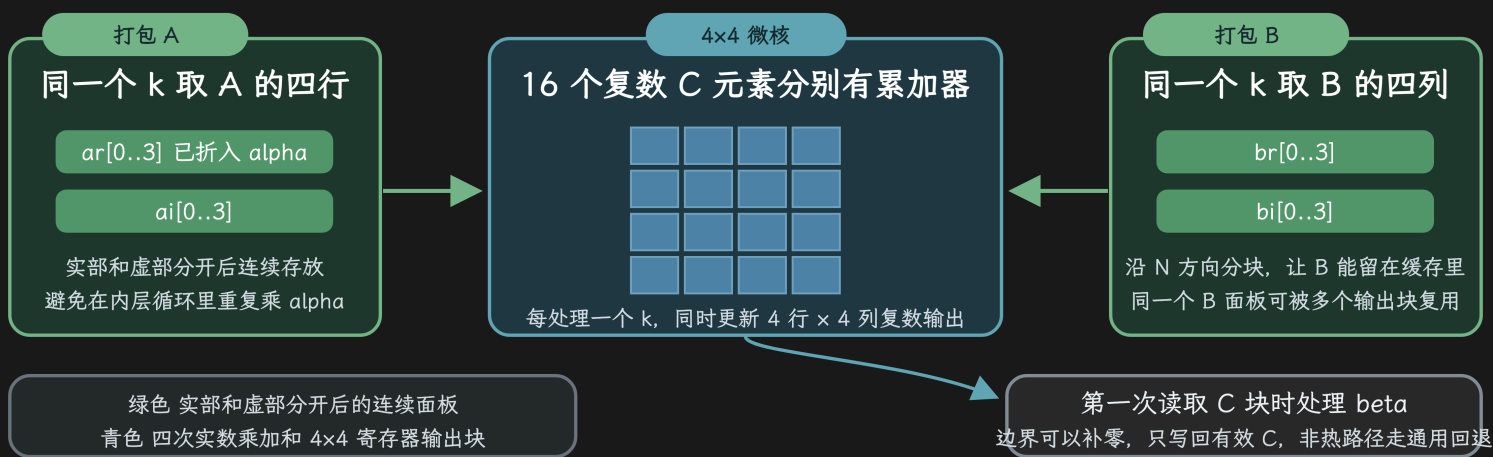
先展开复数乘法，再让打包、寄存器块和缓存复用都服务同一个内层循环

一个输出元素怎么算

$$C_{ij} \leftarrow \beta \cdot C_{ij} + \alpha \cdot \sum_k A_{ik} \cdot B_{kj}$$

$$A = a_r + i\,a_i \quad B = b_r + i\,b_i$$

$$Re \mathrel{+}= a_r \cdot b_r - a_i \cdot b_i \qquad Im \mathrel{+}= a_r \cdot b_i + a_i \cdot b_r$$



数据打包与复数计算

```
// A、B 按微核需要的布局打包
pack_A(A, Ap);
pack_B(B, Bp);

// 复数乘法拆成实部和虚部的实数乘加
real = ar * br - ai * bi;
imag = ar * bi + ai * br;
```

先把 A 和 B 整理成连续布局，再把复数乘法拆成实部和虚部的实数乘加，便于使用 NEON。A 在打包时融合 alpha，第一次读取 C 小块时处理 beta。

4×2 复数微核

```
for (int k = 0; k < K; ++k) {
    acc[0] += Ap[k] * Bp[2 * k + 0];
    acc[1] += Ap[k] * Bp[2 * k + 1];
}
store_4x2(C, acc);
```

微核一次计算 C 中的一个 4×2 小块，把中间结果放在寄存器中持续累加，最后集中写回，减少数据搬运。

Part 4・总结

总结

- CONV：不改每个输出点的计算顺序。把相邻的一小块输出放在一起算
- TRSM：该按顺序算的地方按顺序算；能同时更新的地方就交给多个线程
- ZGEMM：提前把数据整理好，让 CPU 少花时间找数据，多花时间做计算

感谢聆听。