

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Московский физико-технический институт (государственный университет)

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий  
Кафедра системного программирования ИСП РАН  
Лаборатория (laboratory name)

Выпускная квалификационная работа бакалавра

# Разработка компилятора нейронных сетей на основе инфраструктуры MLIR для процессора с матричной архитектурой

**Автор:**

Студент Б01-009 группы  
Вязовцев Андрей Викторович

**Научный руководитель:**

Кандидат технических наук  
Маркин Юрий Витальевич

**Научный консультант:**

Кандидат технических наук  
Кулагин Иван Иванович



Москва 2024

### Аннотация

Разработка компилятора нейронных сетей на основе инфраструктуры MLIR для процессора с матричной архитектурой  
*Вязовцев Андрей Викторович*

Краткое описание задачи и основных результатов, мотивирующее прочитать весь текст.

Пункт 5: разделить на два: 1. специализированные процессоры для выполнения (inference) нейронных сетей (мб GPU, LG и DaVinci, сюда перенести п. 4 и 7, рассказать про методы оптимизации (двойная буферизация)), сосредоточить внимание на юнитах, привести примеры кода. 2. компиляторы а. Tensorflow, XLA, Onnx, Pytorch, стандарты: TOSA, StableHLO, проблематика: модель -> план, трансляция в код б.

Полиэдральная компиляция, планирование, преобразования циклов. Промышленное внедрение: TVM, Halide, poly, polygeist. Рассмотрение этих компиляторов, примеры (такое будет в диалекте transform). Есть возможность создавать свои операции, но это не удобно. в. Заключение: компиляторы повторяются, большое количество IR, появление LLVM MLIR.

Объединить п. 6, 8, 9, 10 в один и разделить на подпункты. Пайплайны хоста и асценда. Примеры? Соответствие операторов и ассемблерных инструкций. Проблемы: подготовка данных, эффективное использование памяти, параллелизм, синхронизация, расписание (стратегия выполнения цикла).

Заключение, дальнейшая работа.

### Abstract

FIXME: English abstract?

## Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Постановка цели и задач</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Обзор современных нейронных сетей</b>	<b>6</b>
3.1	Общие соображения . . . . .	6
3.2	Обработка естественного языка . . . . .	6
3.3	Компьютерное зрение . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Умножение матриц и свёртка с точки зрения процессора и компилятора</b>	<b>8</b>
4.1	Умножение матриц . . . . .	8
4.2	Свёртка . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Обзор существующих компиляторов и процессоров нейронных сетей</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Обзор архитектуры DaVinci</b>	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Структура компилятора и его реализация</b>	<b>14</b>
7.1	Общая схема компиляции и возможные проблемы . . . . .	14
7.2	Инфраструктура LLVM MLIR . . . . .	14
7.3	Функциональная структура компилятора . . . . .	15
7.4	Ловеринг операций и возможные стратегии . . . . .	16
<b>8</b>	<b>Результаты</b>	<b>17</b>
<b>9</b>	<b>Заключение и дальнейшая работа</b>	<b>18</b>

## 1 Введение

Нейронные сети в последнее время испытывают большой подъём. Это происходит, прежде всего, благодаря успехам Chat GPT, которая показала новые возможности для обработки естественной речи. Стоит отметить, что развитие этой сферы происходит не только за счёт совершенствования точности ответов нейронных сетей. Например, разбатываются процессоры с матричной архитектурой, которые могут быть встроены в смартфоны. Очевидно, что такие решения будут востребованы на мобильном рынке, который занимает крупную часть всего IT-рынка.

Для использования таких процессоров необходим широкий набор утилит, в том числе и компиляторы. Основной задачей любого компилятора является получение наиболее оптимального с точки зрения производительности машинного кода при сохранении всех свойств исходной программы. Заметим, что в таких компиляторах помимо традиционных техник оптимизации, таких как удаление мёртвого кода, распространения констант, сокращения общих подвыражений и других, должны применяться другие техники, связанные с математическими свойствами тензоров и спецификой целевой архитектуры.

В силу описанных выше причин идут активные исследования в области компиляторов для нейронных сетей, в том числе и нашей лабораторией. В данной работе будут исследованы особенности целевой архитектуры и представлены способы генерации эффективного машинного кода.

## 2 Постановка цели и задач

Цель исследования: разработать компилятор нейронных сетей для процессоров Ascend, основанных на архитектуре DaVinci, с использованием инфраструктуры LLVM MLIR и обеспечить генерацию эффективного машинного кода в нём. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать архитектуру современных популярных нейронных сетей и типичные для них операции.
2. Исследовать подходы к эффективному исполнению нейронных сетей, в том числе использование специальных процессоров (NPU), компиляторов с разными целевыми архитектурами (CPU, GPU, NPU), узнать их особенности и используемые в них оптимизации.
3. Изучить инфраструктуру LLVM MLIR и предоставляемые ею возможности для написания собственного компилятора.
4. Исследовать архитектуру DaVinci, принцип работы нейроматричного процессора и её язык ассемблера.
5. Разработать набор операторов для целевой архитектуры DaVinci в инфраструктуре MLIR.
6. Исследовать и предложить методы генерации оптимального машинного кода для некоторых типичных операций нейронных сетей.
7. Реализовать наиболее эффективные способы генерации машинного кода, исследовать их производительность.

## 3 Обзор современных нейронных сетей

### 3.1 Общие соображения

Искусственная нейронная сеть — математическая модель, а также её программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации биологических нейронных сетей — сетей нервных клеток живого организма. Этот принцип отражается в её устройстве: нейронная сеть состоит из нескольких слоёв, каждый из которых принимает информацию с предыдущего, обрабатывает её каким-то образом, а затем передаёт её на следующий слой.

Благодаря новым исследованиям в этой области, нейронные сети нашли большое количество применений в разных сферах жизни. В медицине они позволяют проводить более точную диагностику заболеваний (например, онкологии), создавать портативные устройства для диагностики (например, для проведения ЭКГ). Они используются для обработки больших данных в разных исследовательских областях, таких как астрономия и геологоразведка. Также они упрощают жизнь в робототехнике и автоматизации производства.

Рассмотрим наиболее популярные архитектуры нейронных сетей, их основные особенности.

### 3.2 Обработка естественного языка

Обработка естественного языка — общее направление искусственного интеллекта и математической лингвистики. Оно изучает проблемы компьютерного анализа и синтеза текстов на естественных языках. Применительно к искусственному интеллекту анализ означает понимание языка, а синтез — генерацию грамотного текста. Одним из подходов к решению данной задачи стала архитектура трансформер, представленная компанией Google в 2017 году. Эта архитектура используется в переводчиках (например, от компаний Яндекс и Google) и в чат-ботах (например, Chat GPT). BERT, GPT-3, LLaMA — модели, основывающиеся на архитектуре трансформер.

Многие из таких моделей можно скачать, после чего изучить их внутреннее устройство. Нами была выбрана модель BERT. Не погружаясь в детали реализации можно заметить, что подавляющее большинство операций в ней занимают умножения матриц. По этой причине эта операция была выбрана для дальнейшего исследования.

### 3.3 Компьютерное зрение

Компьютерное зрение — теория и технология создания машин, которые могут производить обнаружение, отслеживание и классификацию объектов. Распознавание изображений может быть полезно в любой сфере, например, в сельском хозяйстве — для обнаружения болезни растений, в области безопасности — для обнаружения преступников и т.д.

Одно из наиболее популярных решений в этой области — свёрточные нейронные сети. Принцип их работы схож с работой зрительной коры головного мозга. Основываются они на операции свёртки (конволюции). В функциональном анализе она применяется к двум функциям и возвращает третью, соответствующую их взаимной корреляции. Проще говоря, их можно интерпретировать как «схожесть» двух функций.

В нейронных сетях свёртка применяется к изображениям, её схему можно увидеть ниже. На часть изображения «накладывается» ядро, т.е. эта часть скалярно умножается на ядро. Получившийся результат является каким-то признаком, он записывается в результирующую матрицу — матрицу выходных признаков (output feature map). Стоит

отметить, что общий случай свёртки несколько сложнее, более подробно этот вопрос будет рассмотрен в соответствующей главе.



Рис. 1: Операция свёртки для изображения с тремя цветами

Существует большое количество свёрточных нейронных сетей: LeNet-5, AlexNet, VGG, GoogLeNet, ResNet, Inception. Нами была выбрана ResNet для дальнейшего исследования. Она представлена несколькими вариантами, которые отличаются количеством слоёв, а следовательно, точностью вычислений и размерами весов модели. Модель с 18 слоями представлена на рисунке ниже. Как видно из рисунка, в ней используются только операции свёртки. Но внутри них также есть операции сложения и *Relu*, где

$$Relu(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

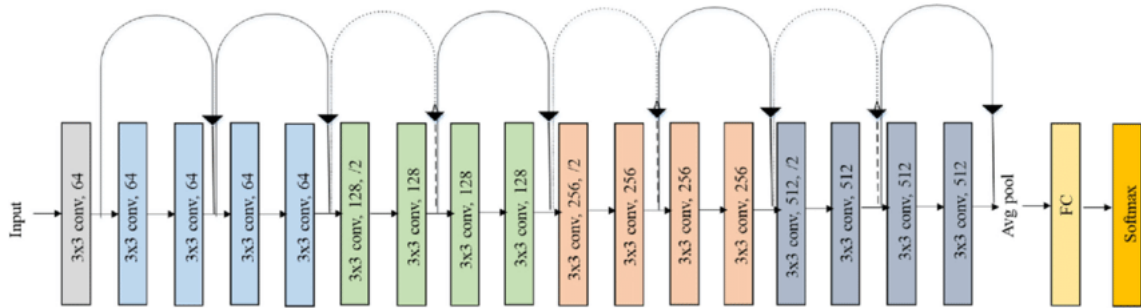


Рис. 2: Модель ResNet18

## 4 Умножение матриц и свёртка с точки зрения процессора и компилятора

### 4.1 Умножение матриц

Как было упомянуто ранее, нейропроцессоры в своей системе команд имеют операцию умножения матриц. Но, в силу особенностей разработки и применения процессоров, они имеют некоторые ограничения.

Во-первых, данные для умножения берутся из локального кэша, размер которого сильно ограничен (характерный размер — 64 КБ). Это означает, что в подавляющем количестве случаев необходимо производить перемножение по кусочкам. Удобный математический аппарат для этого — блочное перемножение матриц. Сама же техника называется *tiling* или *slicing*.

Во-вторых, сам процессор для удобства может требовать блочное расположение матриц. Например, в целевой архитектуре

В-третьих, в целях экономии целевой процессор поддерживает только умножение матриц у коротких типов. Для чисел с плавающей точкой это `float 16`, для целочисленных вычислений — `int 8`.

В связи с перечисленными выше причинами процедура перевода исходной крупно-блочной операции в команды процессора (будем называть эту процедуру *lowering-ом*) нетривиальной. Можно выделить несколько стадий *lowering-a*:

1. Перевод исходных данных в соответствующий блочный формат.
2. Копирование данных из оперативной памяти в локальный кэш.
3. Умножение матриц.
4. Повторение п. 2-3 необходимое количество раз.
5. Изменение формата хранения выходных данных (при необходимости).

Отметим, что п. 1 и 5 выходят за рамки исследования данной работы. Но, зачастую, они необходимы только на первом и последнем слоях нейронной сети, так как промежуточные данные используются только самим процессором.

### 4.2 Свёртка

Реализация свёртки на нейроматричных процессорах несколько сложнее, чем умножения. На некоторых архитектурах (FIXME: ссылка) она поддерживается нативно. К сожалению, наша не является таковой. Но с помощью особого преобразования её можно свести к умножению матриц. Приведём некоторые общие соображения, которые позволят понять его.

Итак, пусть есть входное изображение (*image*) размеров  $H_i \times W_i$ , содержащее  $C$  цветов. Будем называть его *входной картой признаков* (*input feature map*). Ядро (*kernel*) свёртки представляет из себя небольшую матрицу размеров  $H_k \times W_k$  (характерный размер — 3 — 5). Ядро имеет такое же количество входных цветов  $C$ , но также имеет и  $F$  выходных цветов. Таким образом, изображение имеет формат  $H_i W_i C$ , а ядро —  $F H_k W_k C$ . Выходная карта признаков, имеет структуру, схожую со входной:  $H_o W_o F$ , где  $H_o = H_i - H_k + 1$ ,  $W_o = W_i - W_k + 1$  в простейшем случае. Если обозначить:  $a$  — входная карта,  $k$  — ядро,  $c$  — выходная, то свёртка выражается следующей формулой:

$$c_{ijf} = \sum_{h=0}^{H_k} \sum_{w=0}^{W_k} \sum_{c=0}^C a_{i+h, j+w, c} \cdot k_{fhwc}$$



Заметим, что операция чем-то схожа на скалярное умножение векторов (если цвета считать вектором) или матричное умножение. Если первый тензор преобразовать в матрицу  $A$ , где одной строке будет соответствовать одна такая сумма (т.е. размеры матрицы станут  $H_o W_o \times H_k W_k C$ ), а ядро — в матрицу  $K$  размеров  $H_k W_k C \times F$ , то выходная матрица  $C = A \times K$ . Этот процесс преобразования входной карты признаков называется *img2col* (*image-to-column*), оно содержится в архитектуре команд целевого процессора.

Таким образом, свёртка есть композиция *img2col* и умножения матриц. Отметим, что в реальности свёртка имеет такие параметры, как *stride*, *dilation* и *pad*. Они усложняют приведённые формулы, но не меняют сути происходящего. Также в качестве обобщения можно взять  $N$  изображений, форматы входной и выходной карт приобретают вид  $NH_i W_i C$  и  $NH_o W_o F$  соответственно.

## **5 Обзор существующих компиляторов и процессоров нейронных сетей**

## 6 Обзор архитектуры DaVinci

Архитектура DaVinci — нейропроцессор (NPU, neural processing unit), разработанный компанией HiSilicon (подразделение Huawei). В отличие от обычных CPU и GPU, которые необходимы для вычислений общего назначения, и ASIC, предназначенной для конкретного алгоритма, архитектура Da Vinci предназначена для исполнения уже обученных нейронных сетей. Работа с NPU является обычной схемой гетерогенных вычислений, в ней CPU является хостом (главным устройством, которое запрашивает вычисления), а NPU — девайсом (подчинённым устройством, производящим вычисления). Взаимодействие между ними происходит по следующему алгоритму:

1. Хост производит инициализацию, необходимую для общения с девайсом.
2. Хост аллоцирует память (общую для него и девайса) и загружает данные в неё.
3. Хост загружает объектный файл девайса и регистрирует функцию для исполнения.
4. Хост передаёт указатели на аллоцированную память и даёт команду к исполнению.
5. Девайс исполняет выбранную функцию.
6. Хост копирует результат исполнения девайса к себе.

Теперь перейдём к внутреннему устройству чипа Ascend. Схема архитектуры представлена на рисунке. Рассмотрим её основные особенности.

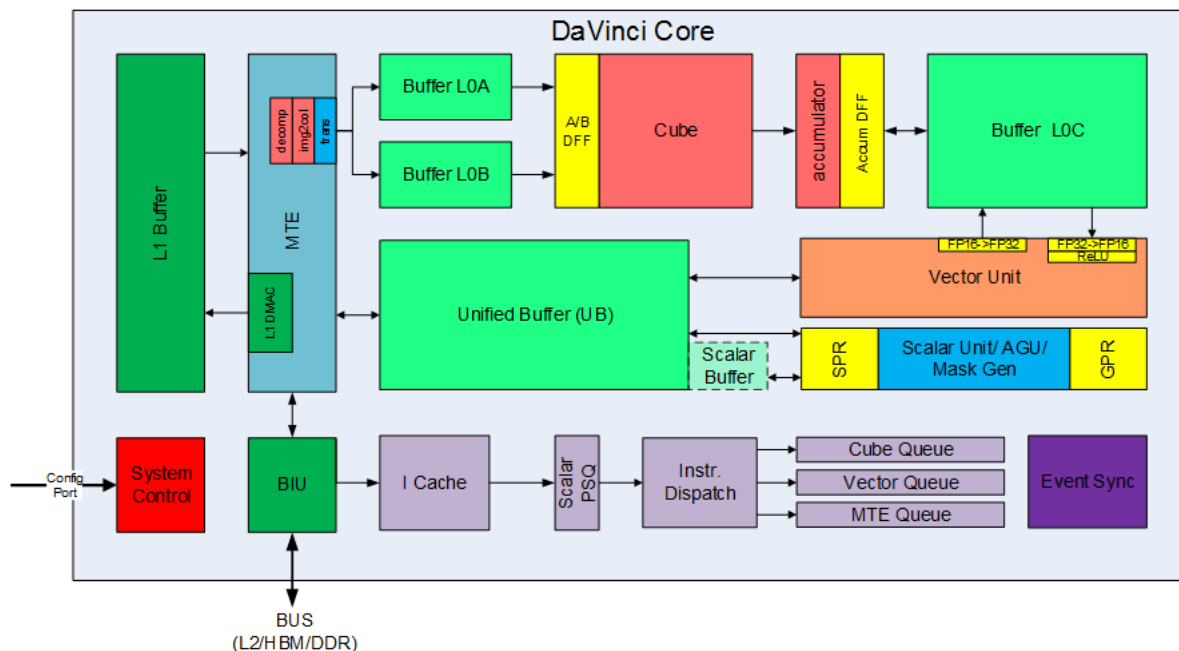


Рис. 3: Архитектура DaVinci

В ядре есть три вычислительных юнита: матричный, векторный и скалярный, которые используются для соответствующих вычислений. Исполнение на юнитах происходит параллельно, для каждого юнита существует отдельная, независимая очередь задач. Ещё три очереди предназначены для копирования из разных буфферов друг в друга (о них речь пойдёт ниже). Для синхронизации очередей используются команды `set_flag`

и `wait_flag`, которые по своей сути представляют систему событий. Первая команда сигнализирует, что событие произошло, а вторая запускает ожидание события. Правильное использование механизмов синхронизации позволяет значительно увеличить загрузку всех юнитов и, следовательно, снизить общее время исполнения. В данной работе не будут рассматривать проблемы с расстановкой операций синхронизации и будет считаться, что они всегда расставлены наиболее оптимальным образом.

Матричный юнит на вход принимает матрицы с типом элементов `float 16` или `int 8`, на выходе же элементы имеют тип `float 16`, `float 32` или `int 32`. Умножение работает в двух режимах:

1. Обычное умножение:  $C = A \times B$
2. Режим накопления:  $C = A \times B + C$ , т. е. результат текущего умножения прибавляется к предыдущему.

Каждая из входных матриц должна быть разбита на блоки  $16 \times 16$  (в случае `float 16`) или  $16 \times 32$  (в случае `int 8`). Расположение элементов внутри блоков и блоков относительно друг друга также различно. Существуют две стратегии размещения: по строкам (формат `Z`) и по столбцам (формат `N`). Примем обозначение: размещение внутри блока обозначается строчной буквой, а между блоками — заглавной. При умножении матрица  $A$  должна быть заранее быть записана в формате `Zz`, матрица  $B$  — в формате `Zn`, а выходная матрица  $C$  будет `Nz`.

Матричный юнит работает по принципу систолического массива. Систолический массив — однородная сеть тесно связанных блоков обработки данных. Его схему для архитектуры DaVinci можно увидеть на картинке ниже.

Принцип умножения довольно прост: за первый такт (FIXME: лучше не использовать слово такт в данном контексте) происходят все умножения, после чего за оставшиеся четыре такта произведения суммируются. Таким образом, за пять тактов можно перемножить две матрицы  $16 \times 16$ . Матричный юнит, итерируясь по матрицам и перемножая их поблочно, быстро получает результат перемножения.

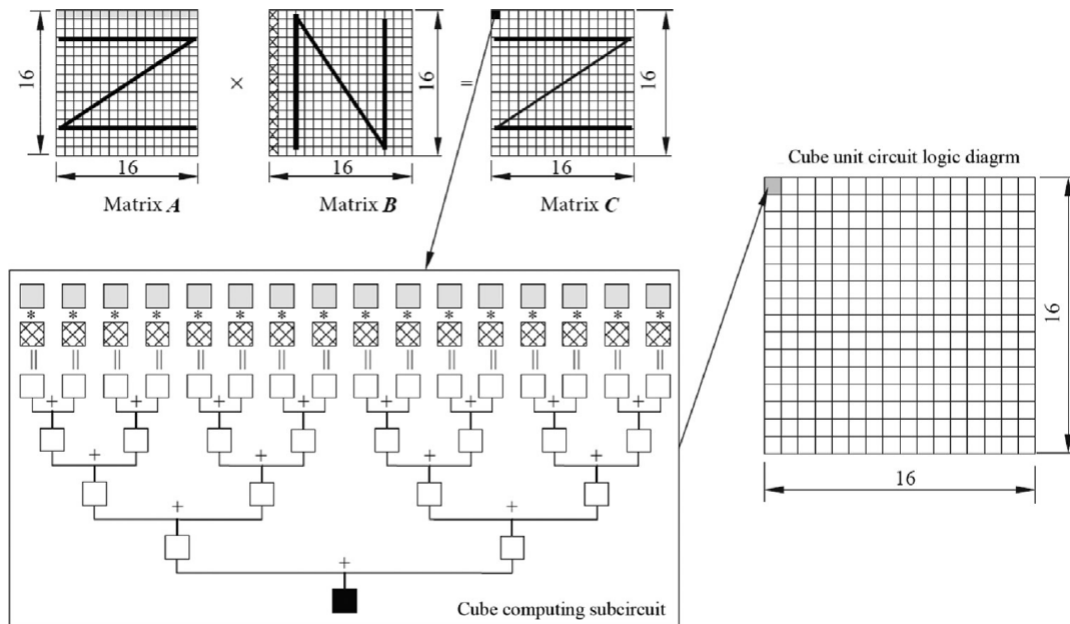


Рис. 4: Схема вычисления в матричном юните

Теперь рассмотрим работу векторного юнита. Существуют два режима работы: *common* и *VA*. В обоих случаях память делится на блоки по 32 байта, а векторная операция представляется в виде цикла, на каждой итерации которого обрабатывается 8 блоков. Таким образом, за одну итерацию может быть обработано 128 элементов типа `float 16` или 64 элемента 32-разрядных типов (`float 32`, `int 32`). Стоит отметить, что не обязательно обрабатывать такое количество элементов. Для выбора, с какими именно элементами будет работать операция необходимо задать маску. Векторный юнит обрабатывает только те элементы, на позиции которых в маске стоит бит 1. На каждой следующей итерации блоки сдвигаются на заранее заданный шаг, после чего операция повторяется. Отличаются режимы способом описания этих блоков. В случае *VA* режима блоки задаются в виде восьми указателей, а в случае *common* — указателем на первый блок и шагом между блоками. Для первого, второго аргумента и результата шаг может быть различным. Юнит поддерживает большое количество операций: математических, логических, приведения типов и т. д. Есть и специфичные операции: *relu*, часто используемый в нейронных сетях, операция транспонирования.

Память ядра неоднородна. В ядре существует 5 буферов: L1, L0A, L0B, L0C, UB. Также существует внешняя память (GM), через которую происходит общение с хостом. Опишем общую схему потока данных между этими кэшами. Данные из внешней памяти загружаются в L1 и UB. Данные в UB предназначены для обработки векторным и скалярным юнитами. Данные из L1 загружаются в L0A и L0B, которые соответствуют матрицам A и B матричного умножения. Результат после перемножения (которое, как было упомянуто раньше, выполняется матричным юнитом), попадает в буфер L0C, из которого происходит данные отправляются в UB. Выгрузка результата вычислений во внешнюю память возможна только из UB. Отметим, что описанные выше буферы имеют небольшой размер, что является одной из основных проблематик нашей работы. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в главе, посвященной логированию.

Процессоры, основанные на архитектуре DaVinci и их основные характеристики представлены в таблице ниже:

Процессор	Производительность для float 16/int 8	Мощность	Тех. процесс
Ascend 910	320/640 терафлопс	310 Вт	7 нм, N7+
Ascend 310	16/8 терафлопс	8 Вт	12 нм, FFC

## 7 Структура компилятора и его реализация

### 7.1 Общая схема компиляции и возможные проблемы

подготовка данных, эффективное использование памяти, параллелизм, синхронизация, расписание (стратегия выполнения цикла)

### 7.2 Инфраструктура LLVM MLIR

Как можно заметить из предыдущего параграфа, компиляторы из предыдущего параграфа решали сходные задачи, но они отличались некоторыми деталями, из-за чего приходилось создавать новый компилятор и пересоздавать большое количество компонентов. В связи с этим сообщество разработчиков LLVM придумали и реализовали переиспользуемую и расширяемую инфраструктуру MLIR.

Основная концепция MLIR — диалекты. Диалект объединяет в себе типы, операции и их преобразования на каком-либо уровне абстракции. В MLIR существует более 40 встроенных диалектов, имплементация собственных диалектов возможна с помощью декларативного языка *ODS* или на языке C++.

Рассмотрим некоторые диалекты, которые будут использованы в данной работе.

1. *HLO* — диалект, который позволяет представлять модели нейросетей, написанных на *tensorflow*, в представлении MLIR. Несмотря на то, что он не является стандартным и представлен в виде отдельного репозитория, пользуется популярностью благодаря широкой известности *tensorflow*.
2. *tensor* — диалект для представления тензоров и операций, позволяющих менять форму тензоров, изменять их размеры, «вырезать» и «вставлять» части из них. Стоит отметить, на данном уровне абстракции считается, что тензоры не имеют какого-то конкретного расположения в памяти. Этим они похожи на виртуальные регистры из теории компиляторов.
3. *memref* — диалект, который абстрагирует работу с многомерными массивами. Операции в этом диалекте схожи с операциями из диалекта *tensor*, но этих диалектов есть существенное отличие: *memref* является представлением реальных объектов.
4. *affine* — диалект, который предоставляет возможность работы с аффинными циклами и преобразованиями над ними, тем самым реализуя возможности для полиэдральной компиляции.
5. *scf* (*structured control flow*) — диалект, в котором представлен структурный поток исполнения (т.е. в виде системы вложенных блоков).
6. *cf* (*control flow*) — диалект, представляющий исполнение в виде графа потока управления.
7. *func* — диалект, реализующий концепцию функций, их вызова, передачи аргументов, возвращения значения.
8. *transform* — диалект, необходимый для реализации преобразований внутри одного диалекта. С его помощью операция представляется в виде одной или нескольких операций (зачастую, более эффективных по производительности, чем исходная), что позволяет подготовить код для дальнейшего *lowering*-а или оптимизировать его.

9. `llvm` — самый низкоуровневый диалект, реализующий семантику LLVM IR. Его можно перевести в LLVM IR непосредственно, после чего воспользоваться другими средствами LLVM для компиляции. Отметим, что получение кода именно в таком представлении является нашей непосредственной задачей.

Выше были перечислены лишь те диалекты, которые непосредственно будут использоваться во время lowering-a из HLO в `llvm`. Помимо в них в MLIR существует большое количество других диалектов, например, для графических ускорителей (GPU), для векторных инструкций (AVX512), для распараллеливания исполнения программ (OpenMP) и другие. Общая диаграмма диалектов и их соотношения представлена на рисунке ниже.

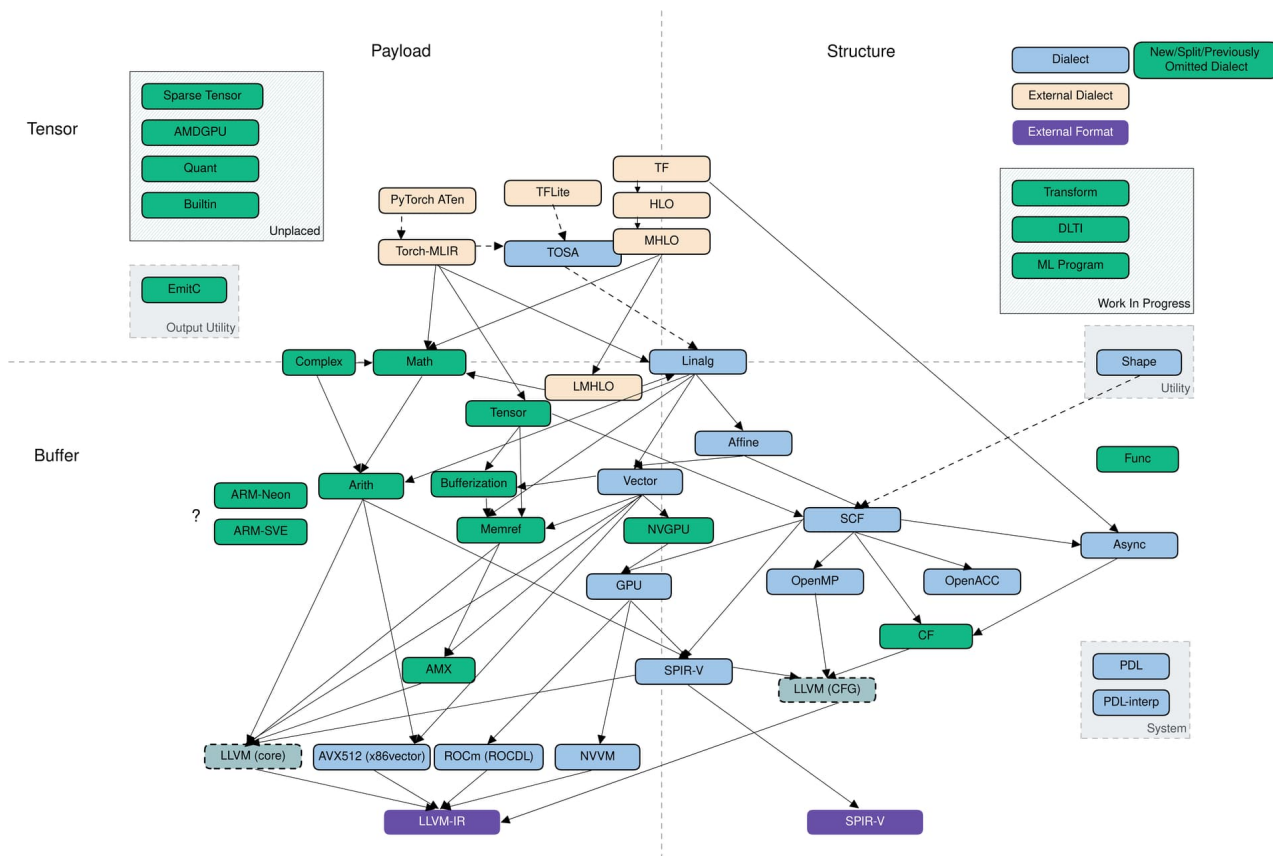


Рис. 5: Структура проекта MLIR и соотношения диалектов в них

### 7.3 Функциональная структура компилятора

Используя знания о MLIR и DaVinci, полученные в результате исследовательской работы, наша команда приступила к разработке нового компилятора. Было решено создать новые диалекты, которые на разных уровнях абстракции отражают особенности архитектуры DaVinci. Перечислим их и отметим основные особенности:

1. `ascend` — диалект крупноблочных операций. Является аналогом HLO, но операции в нём предъявляют требования к типам данных: матрицы должны быть расположены в блочном формате. Поэтому в процессе lowering-a из HLO в `ascend` для входных и выходных данных вставляются операции фактализации, т.е. приведения матрицы к нужному виду. Для остальных диалектов требование на формат данных сохраняется, при этом считается, что оно выполняется благодаря корректности представления графа исполнения в диалекте `ascend`.

2. `cse` — диалект операций, схожих с ассемблерными инструкциями. Основная его особенность заключается в сохранении семантики тензоров, что позволяет упрощать процесс генерации таких операций и их верификации (проверки корректности).
3. `hivm` — диалект непосредственных ассемблерных инструкций. Он в точности повторяет их семантику, что упрощает его ловеинг в `llvm`.

Конвейер (пайплайн) компиляции для девайса выглядит следующим образом:



Рис. 6: Пайплайн компиляции для девайса

#### 7.4 Ловеинг операций и возможные стратегии

Изучив особенности целевой архитектуры, можно перейти к рассмотрению конкретных стратегий ловеинга и их классификации. В связи с тем, что именно работа с внешней памятью занимает большую часть времени, будем пытаться оптимизировать её. Как было упомянуто в одной из предыдущих глав, из-за малого объёма внутренних кэшей данные приходится загружать частями, при этом каждая часть, скорее всего, будет загружена несколько раз. В связи с этим, уменьшение количества повторных загрузок — самый простой способ оптимизации, а стратегия разбиения, при которой достигается наименьшее количество повторных загрузок, будет считаться нами наиболее оптимальной.



## 8 Результаты

WIP

Output Stationary — самая эффективная стратегия? Графики (или в аппендикс?)?

## 9 Заключение и дальнейшая работа

WIP

Работа не закончена...

## Список литературы

- [1] *Mott-Smith, H.* The theory of collectors in gaseous discharges / *H. Mott-Smith, I. Langmuir* // *Phys. Rev.* — 1926. — Vol. 28.
- [2] *Морз, Р.* Бесстолкновительный PIC-метод / *Р. Морз* // Вычислительные методы в физике плазмы / Ed. by Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. — М.: Мир, 1974.
- [3] *Киселёв, А. А.* Численное моделирование захвата ионов бесстолкновительной плазмы электрическим полем поглощающей сферы / *А. А. Киселёв, Долгонос М. С., Красовский В. Л.* // Девятая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». — 2014.