

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по научной и  
исследовательской деятельности,  
к наук

А.В. Метелица

\_\_\_\_\_ 2023 г.

### **Отзыв ведущей организации**

федерального государственного автономного ~~образовательного~~ образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» на диссертационную работу Валуевой Марии Васильевны «Разработка методов и алгоритмов построения цифровых устройств интеллектуального анализа визуальных данных», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

Диссертационная работа Валуевой М.В. посвящена исследованию и разработке методов увеличения производительности систем обработки и анализа изображений в условиях ограниченности ресурсов. Разработанные алгоритмы для проектирования аппаратных ускорителей свёрточных нейронных сетей и комплекс программ на языке описания аппаратуры могут использоваться в системах анализа медицинских снимков, изображений со спутников, в системах видеонаблюдения и робототехнических системах для повышения производительности без потери качества анализа визуальных объектов.

### **Актуальность темы диссертационной работы**

В настоящее время разработано множество инструментов интеллектуального анализа визуальных данных, позволяющих качественно решать данную задачу. Абсолютное большинство указанных инструментов используют методы и алгоритмы машинного обучения, в частности свёрточные нейронные сети (СНС). Современные алгоритмы интеллектуального анализа информации требуют больших вычислительных затрат и ресурсов для их реализации. Для решения данной проблемы на практике зачастую используются удалённые вычислительные ресурсы, например, большие центры обработки данных. Но такие решения подходят не для всех практических задач. Некоторые системы требуют автономности решения, например, беспилотные транспортные средства, для которых

потеря связи с удалённым сервером может привести к аварии. Подобные системы, как правило, имеют ограниченные технические возможности, и для них остро стоит проблема потребления большого количества вычислительных ресурсов, которая требует разработки новых подходов к реализации алгоритмов интеллектуального анализа визуальных данных. В связи с этим диссертационная работа М.В. Валуевой посвящена решению актуальной задачи – увеличению производительности системы обработки и анализа изображений в условиях ограниченности ресурсов.

### **Структура и основное содержание диссертационной работы**

Структура диссертации логична, дает возможность последовательно и полно исследовать предложенные в работе модели, методы и алгоритмы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературных источников из 114 наименований, и 2 приложений. Общий объём основного текста работы 154 страницы, включая 19 таблиц и 44 рисунка.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, выбраны объект и предмет исследования, показаны научная новизна, практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлена математическая модель СНС и проведен сравнительный анализ методов улучшения ее технических характеристик. Предложено использование системы остаточных классов (СОК) с модулями специального вида для улучшения характеристик аппаратной реализации СНС. Изложены основные сведения о СОК и сформулирован алгоритм процесса проектирования аппаратной реализации СНС с вычислениями в СОК.

**Вторая глава** посвящена решению задачи увеличения производительности цифровых фильтров, которые применяются для реализации операции свертки в СНС. Предложен метод проектирования устройства, реализующего операцию свертки на основе метода Винограда и СОК с модулями специального вида. Рассмотрены случаи масок фильтров размерности  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  и  $5 \times 5$ , для которых разработаны цифровые фильтры двумерной фильтрации на основе предложенного метода. Установлено, что цифровые фильтры, разработанные на основе предлагаемого метода, имеют большую производительность по сравнению с рассмотренными известными аналогами, но также требуют больших аппаратных затрат.

**В третьей главе** рассмотрены методы реализации вычислительно сложных операций в СОК, таких как обратное преобразование чисел из СОК в позиционную систему счисления (ПСС), сравнение чисел и определение знака числа, и предложены архитектуры устройств для их выполнения. Результаты теоретического анализа и аппаратного моделирования показали, что разработанные архитектуры устройств реализации вычислительно сложных операций в СОК обладают меньшей задержкой. Предложены метод проектирования устройства, реализующего функцию активации ReLU, и метод проектирования устройства, реализующего операцию выбора максимального элемента из окрестности на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами.

**В четвёртой главе** предложен алгоритм проектирования аппаратной реализации сверточных нейронных сетей с вычислениями в системе остаточных классов. Представлена архитектура СНС с вычислениями в СОК, включающая все предложенные методы реализации компонентов СНС. Также представлены результаты эксперимента по квантованию весовых коэффициентов, которые показали, что разрядность весовых коэффициентов может быть уменьшена без потери точности распознавания СНС. Результаты аппаратного моделирования показали, что использование метода Винограда позволяет увеличить производительность устройства в 4,3-5,56 раза, а применение предлагаемого подхода организации вычислений в СОК увеличивает производительность устройства на 2,84-12,13% по сравнению с рассмотренными аналогами.

**В заключении** подведены итоги и обобщены результаты проведенных исследований. **В приложениях** представлены акт о внедрении результатов диссертационного исследования и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ по теме диссертации.

### **Основные результаты диссертационной работы**

В диссертационной работе Валугеой М.В. получены следующие результаты.

1. Разработана математическая модель СНС с реализацией вычислений в СОК с модулями специального вида.

2. Разработан метод преобразования чисел из ПСС в СОК с модулями специального вида. Предложено устройство для перевода чисел из ПСС в СОК с модулями специального вида  $2^a$  и  $2^a - 1$  и соответствующие программы на языке описания аппаратуры VHDL. Результаты теоретического анализа и аппаратного моделирования показали, что предложенная архитектура устройства вычисления остатка от деления по

модулю  $2^a - 1$  обладает меньшей задержкой и площадью по сравнению с рассмотренными аналогами.

3. Разработан метод проектирования устройства, реализующего операцию свёртки на основе метода Винограда и СОК с модулями специального вида. Предложены архитектуры двумерных цифровых фильтров с масками размера  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  и  $5 \times 5$  для свёрточных слоев СНС, а также соответствующие программы на языке VHDL. Результаты теоретической оценки параметров и моделирования показали, что предложенные архитектуры цифровых фильтров обладают большей производительностью по сравнению с рассмотренными аналогами, но за счет увеличения аппаратных затрат.

4. Разработан метод для проектирования функции активации ReLU (Rectified Linear Unit) в СОК и программа на языке VHDL для проектирования устройства, основанного на предложенной архитектуре. Результаты теоретической оценки технических параметров устройства и аппаратного моделирования показали, что разработанное устройство имеет меньшую задержку и площадь по сравнению с рассмотренными аналогами.

5. Разработан метод для проектирования слоя выборки максимального элемента из окрестности элементов, представленных в СОК, а также соответствующие архитектура и программа на языке VHDL. Результаты теоретической оценки технических параметров устройства и аппаратного моделирования показали, что предлагаемое устройство обладает меньшей задержкой и площадью по сравнению с рассмотренными аналогами.

6. Разработана архитектура устройства обратного преобразования чисел из СОК в ПСС на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами (КТОд) и ее программная реализация на языке VHDL. Проведён теоретический анализ временных и аппаратных затрат, а также аппаратное моделирование, которые показали преимущество в скорости работы по сравнению с рассмотренными аналогами, но за счёт увеличения площади.

7. Разработан алгоритм проектирования аппаратной реализации СНС, который использует разработанные оригинальные методы для проектирования компонентов СНС. Установлено, что разрядность весовых коэффициентов может быть снижена без потери точности распознавания, следовательно, требуется меньше памяти для их хранения в устройстве.

8. Разработан программный комплекс на языке описания аппаратуры VHDL для аппаратной реализации СНС с использованием модулярных вычислений, включающий все разработанные оригинальные алгоритмы для проектирования СНС в СОК. Рассмотрено несколько конфигураций СНС. Проведено сравнение архитектуры СНС, использующей свертку по методу

Винограда в свёрточном слое, и архитектуры, использующей MAC(Multiply-ACcumulate) блоки. Данные архитектуры были спроектированы в ПСС и с использованием предлагаемого метода аппаратной реализации СНС в СОК. Результаты моделирования показали, что использование метода Винограда позволяет увеличить производительность устройства в 4,3-5,56 раза, а применение предлагаемого подхода организации вычислений в СОК увеличивает производительность устройства на 2,84-12,13%.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается результатами математического и имитационного моделирования и анализом эффективности разработанных методов и алгоритмов, а также апробацией на конференциях и научных мероприятиях всероссийского и международного уровней и публикациями, среди которых 12 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах научных работ Scopus и Web of Science. Кроме того, получены 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Практическая значимость**

Разработанные в рамках диссертационного исследования алгоритмы для проектирования аппаратных ускорителей СНС, использующих модулярные вычисления, и соответствующий комплекс программ внедрены в организации ООО «Инфоком-С» в системе интеллектуального реагирования на инциденты и события «Darvis». Кроме того, полученные результаты могут использоваться в системах анализа медицинских снимков, изображений со спутников, в системах видеонаблюдения и робототехнических системах для повышения производительности без потери качества анализа визуальных объектов.

### **Замечания**

1. В первой главе одна и та же переменная  $W$  используется для обозначения весов на полносвязных слоях нейронной сети и коэффициентов фильтра.

2. В третьей главе две архитектуры различных устройств имеют одно и то же название СОМР. Несмотря на то, что оба устройства реализуют сравнение чисел, одно из устройств выводит знак разности сравниваемых чисел, а другое непосредственно результат сравнения «>», «<» или «=». Указанные устройства имеют различные технические характеристики, используемые в дальнейших расчётах, поэтому называть их одинаково некорректно.

## Заключение

Указанные замечания не являются критическими и не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы и проведенных исследований. Диссертация является законченным научным исследованием, написанном на высоком уровне. Результаты диссертационного исследования представлены в статьях автора, а также докладывались на всероссийских и международных конференциях. Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание работы и оформлен надлежащим образом.

Диссертационная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей», а её автор, Мария Васильевна Валуева, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Отзыв подготовлен профессором кафедры прикладной математики и программирования, доктором технических наук (05.13.18 –Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ) Анатолием Борисовичем Усовым (344090, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8А, тел. раб. +7(863)2975411, эл. почта: abusov@sfedu.ru).

Отзыв обсуждён и утверждён на заседании кафедры прикладной математики и программирования Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета от 19 сентября 2023 г., протокол № 2. Присутствовало на заседании 7 чел.

Результаты голосования: «за» – 7 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет.

Заведующий кафедрой прикладной математики и программирования Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», д.ф.-м.н., профессор

Г.А. Угольницкий

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Личную подпись Угольницкого Г.А.

ЗАВЕРЕНО:

Главный специалист по управлению персоналом

Богданова М.И.  
« 20 » \_\_\_\_\_ 19 \_\_\_\_\_ 20 23 г.