

РГБ ОД

- 3 НОЯ 1997

На правах рукописи

УДК:621.383:681.7

Стариков Ростислав Сергеевич

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ И РАЗРАБОТКИ
ОПТИЧЕСКИХ ЛИНЕЙНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ
ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

01.04.21 - лазерная физика,

05.13.06 - автоматизированные системы управления

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва 1997

Работа выполнена в Московском Государственном Инженерно-Физическом Институте (техническом университете).

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, профессор
Евтыхий Н.Н.

Официальные оппоненты:

член-корреспондент РАН Бахрах Л.Д.;
кандидат технических наук Одинокоев С.Б.

Ведущая организация - Санкт-Петербургский Государственный
Технический Университет.

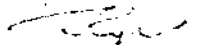
Защита состоится 18 ноября 1997 г. в 15⁰⁰ час на заседании
диссертационного совета К053.03.08 МИФИ по адресу 115-409, Москва, Каширское
шоссе 31, тел. 324-84-98. 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан 9 сентября 1997 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета.
к.ф.-м.н.



Корнилов С.Т.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы В современных приложениях теории обработки сигналов и изображений важнейшую роль играют построение высокопараллельных вычислительных систем с дискретными информационными каналами. Бурное развитие современных систем обработки информации, критическое увеличение размерности потоков обрабатываемых данных, необходимость получения результата обработки в масштабе времени, близком к реальному, предъявляет все более высокие требования к вычислительным системам и, прежде всего, к скорости проведения вычислений над массивами данных.

Оптимальным способом формирования массивов дискретных данных является их представление в виде векторов и матриц, и, следовательно, их обработка должна быть реализована при помощи алгоритмов, допускающих линейно-алгебраическую формализацию. При этом, важнейшими математическими операциями являются операции типа умножения вектора на вектор, вектора на матрицу и матрицы на матрицу. Среди задач обработки информации, эффективное решение которых возможно только на базе высокопараллельных систем обработки массивов данных, можно выделить, как важнейшие, следующие: спектральный анализ, адаптивная обработка сигналов, распознавание сигналов и изображений и некоторые другие. Кроме того, необходимо особо выделить быстро развивающуюся в последние годы новую направление развития вычислительной техники, использующее принципиально отличные методы построения вычислительных систем, заключающиеся в применении нейросетевых методов. Использование нейросетевых принципов и алгоритмов организации работы систем обработки информации, позволяет успешно решать широкий класс задач и с каждым годом находит все большее число практических применений. Суть нейросетевого принципа организации вычислений, состоящая в обеспечении параллельной работы большого числа связанных между собой простых вычислительных элементов, также хорошо моделируется при использовании аппарата линейной алгебры.

В связи с тем, что матричная алгебра является оптимальным способом проведения параллельных вычислений, последние семь - десять лет активно исследуются перспективы создания оптических процессоров, ориентированных на выполнение операций линейной алгебры (далее ОПЛА - оптические линейно-

алгебраические процессоры). Такие процессоры, базирующиеся на полупроводниковых лазерах, позволяют организовать проведение параллельных вычислительных операций над большими массивами данных, что, в принципе, обеспечивает в таких системах чрезвычайно высокие скорости обработки. Отмеченные возможности обусловлены присутствием оптике параллелизмом, естественным образом допускающим устойчивую организацию трехмерных связей между двумерными массивами данных. В основе работы оптических вычислительных систем лежат преобразования интенсивности в оптической вычислительной системе, что, вообще говоря, принципиально диктует аналоговый характер оптических вычислений. Однако, за счет дискретизации представления величины в системе имеется возможность достижения цифровой точности оптических вычислений, необходимой при решении большинства задач обработки сигналов и изображений. При построении же непрямых вычислительных систем значимость проблемы аналогового характера оптических вычислений существенно снижается, благодаря принципиальным особенностям работы нейросетей: устойчивость нейросетей к зашумлению и погрешностям работы элементов системы хорошо согласуется со спецификой оптических вычислений.

В связи с указанными обстоятельствами перспективы создания и применения оптических линейно-алгебраических процессоров вызывают неуклонно растущий интерес. Работы по исследованию методов создания и непосредственной разработке ОПЛА активно ведутся как за рубежом, так и в России.

Целью работы являлись сравнительный теоретический анализ основных типов и алгоритмов работы ОПЛА, с целью нахождения оптимальных, разработка принципов построения конкретных систем обработки информации на их основе и экспериментальное подтверждение полученных выводов и результатов.

В соответствии с поставленной целью работ, основной задачей исследования являлось:

- проведение сравнительных оценок параметров различных архитектур и алгоритмов работы ОПЛА, определение их принципиальных ограничений, нахождение оптимальных архитектур и алгоритмов;
- экспериментальные исследования элементной базы ОПЛА;

- компьютерное моделирование работы ОПЛА с учетом влияния реальных факторов - шумов и погрешностей узлов и элементов ОПЛА;
- разработка методов использования ОПЛА при решении конкретных задач обработки информации: а) при построении гибридной иерархической нелинейной системы распознавания изображений на базе оптоэлектронной двухслойной нейросети с блоком инвариантной предобработки изображений и б) при построении контура управления адаптивной антенной решеткой на базе прецизионного оптоэлектронного процессора, реализующего прямые алгоритмы решения систем линейно-алгебраических уравнений;
- экспериментальное макетирование аналогового бинарного оптического вектор-матричного перемножителя (далее ОВМП) и базовых узлов прецизионных ОПЛА.

Положения, отличающие результаты проведенных работ от других исследований в этой области и определяющие научную новизну диссертации могут быть сформулированы следующим образом:

1. На основе проведенного теоретического анализа архитектур оптических линейно-алгебраических процессоров, показано, что наиболее оптимальными являются ОПЛА, строящиеся на базе архитектуры оптического вектор-матричного перемножителя. С учетом возможностей современной базы показано, что чисто аналоговый ОВМП, при вычислениях полностью сохраняющих точность результата, наиболее конкурентоспособен при бинарном представлении входных массивов, экспериментально обоснована возможность достижения скорости вычислений в таких схемах на уровне 10^{13} операций в секунду. Показано, что требуемая эффективность вычислений известных точных ОВМП, использующих методы аналоговой свертки дискретных сигналов, может быть достигнута только использованием методов свертки с временным интегрированием. Впервые предложено применение нового алгоритма быстрых цифровых перемножений к вектор-матричным перемножениям.

2. Предложены две оригинальные архитектуры точных аналого-цифровых ОВМП - схемы с временным и пространственным интегрированием - базирующиеся на принципе частотного мультиплексирования сигнала акустооптического модулятора, обладающие преимуществами по эффективности вычислений по сравнению с ранее предлагавшимися архитектурами ОВМП.

Экспериментально показана возможность реализации предложенных схем при достижении производительности вычислений порядка 10^{11} - 10^{12} операций в секунду.

3. На основе анализа задачи построения многослойных нейронных сетей предложена и экспериментально подтверждена оптимальная схема реализации двухслойной нейронной сети на базе бинарных аналоговых ОВМП с числом нейронов в каждом слое до 100.

4. Впервые рассмотрена и теоретически подтверждена возможность создания гибридной оптоэлектронной системы инвариантного распознавания изображений на базе двухслойной нейронной сети, реализованной на ОВМП, и блока предобработки изображений по методу инвариантных геометрических моментов изображения. Теоретически подтверждена возможность устойчивой работы такой системы (т.е. возможность корректного распознавания) при уровне - до 30 процентов - затуманенности входных сигналов сети.

5. На основе анализа задачи обработки сигналов адаптивных антенных решеток предложена оптимальная схема сигнального процессора ААР, реализующая прямые алгоритмы решения систем линейно-алгебраических уравнений и базирующаяся на точном ОВМП с временным интегрированием.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что они служат теоретической и экспериментальной основой для разработки и применения методов построения оптических линейно-алгебраических процессоров и построения на их основе систем обработки информации. Исследования проводились в рамках межотраслевой программы "Вычислительная оптоэлектроника", межвузовской программы "Оптические процессоры" и федеральной программы "Информатизация России". Выводы и результаты диссертационной работы используются в НИИРО и МЦФН и внедрены в НИИРО.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальное подтверждение возможности создания на базе полупроводниковых лазеров оптических линейно-алгебраических процессоров (ОПЛА) со скоростями обработки порядка 10^{11} - 10^{12} операций в секунду для высокопараллельных систем обработки информации.

2. Экспериментальное и теоретическое обоснование оптимальной методики создания как чисто аналоговых, так и точных эффективных оптических линейно-алгебраических процессоров для решения задач адаптивного управления и распознавания образов.

3. Разработка архитектур точных акустооптических вектор-матричных перемножителей (ОВМП), базирующихся на многоканальном многочастотном акустооптическом модуляторе. Экспериментальное подтверждение возможности их создания. Теоретические оценки параметров предлагаемых архитектур и их экспериментальное подтверждение.

4. Разработка оптимальной схемы реализации двухслойной нейронной сети на базе оптических вектор-матричных перемножителей, теоретическое и экспериментальное подтверждение схемы. Подтверждение возможности построения гибридной нейроразличной системы распознавания изображений на базе двухслойной нейронной сети, реализованной на ОВМП, и блока предобработки входных изображений по методу геометрических моментов.

5. Разработка оптимальной схемы контура управления приемными адаптивными антенными решетками, базирующейся на точном оптическом вектор-матричном перемножителе с временным интегрированием.

Апробация работы: По результатам исследований сделано семь докладов: на международной конференции "Оптические вычисления" (Эдинбург, 1994), на международной конференции "Оптическая обработка информации" (Москва, 1994), на международных конференциях "Аэрокосмические датчики - SPIE" (Орlando, 1995; Орlando, 1996), на всероссийской конференции "Нейрокомпьютеры и их применение" (Москва, 1996), на международной конференции по оптической обработке информации SPIE (Денвер, 1996), на международной конференции "Оптическая обработка информации - SPIE" (С.-Петербург, 1996).

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 9 работ.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, списка цитированной литературы и приложения. Основная

часть работы изложена на 160 страницах машинописного текста и включает также 57 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 135 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенных исследований и их практическая значимость, сформулирована цель исследования, представлены основные результаты, составившие научную новизну работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, и кратко изложено содержание глав диссертации.

В диссертации рассмотрены базовые архитектуры и современная элементная база ОПЛА. Проведен сравнительный анализ базовых архитектур ОПЛА - архитектуры оптического вектор-матричного перемножителя (далее ОВМП), архитектуры оптического вычислителя внешнего произведения векторов (далее ОВВПВ) и архитектуры оптического матрично-матричного перемножителя (далее ОММП). В качестве критерия перспективности архитектуры ОПЛА предложено использование (при данной точности вычислений) совокупности трех параметров: быстродействия (число операций в секунду), эффективности (число операций в секунду на единицу потребляемой мощности) и модифицированного отношения Псалтиса, более обще характеризующего эффективность архитектуры и понимаемому как отношение числа вычислительных операций оптического процессора к полному числу требуемых операций электронной постобработки результата. На основе анализа базовых архитектур ОПЛА, показано, что по сумме показателей производительности и отношения Псалтиса единственной перспективной из них представляется архитектура ОВМП, результаты анализа сведены в табл. 1. В таблице: N - размерность, f_T - тактовая частота работы системы.

С учетом возможностей современной элементной базы ОПЛА, показано, что, в связи с ограниченностью выходного динамического диапазона (современная элементная база ОПЛА ограничивает точность результата семью - восемью разрядами), на настоящий момент наибольший интерес представляют бинарные ОВМП. При глубокой технологической проработке размерность таких перемножителей может достигать 100, и, соответственно, пропускная способность может составить 10^{13} - 10^{14} (при тактовых частотах 500 МГц-10 ГГц). Показано

также, что при проведении матрично-матричных умножений также наиболее эффективно использование ОВМП.

Таблица 1

Схема	ОВМП	ОММП	ОВВПВ
Быстродействие	$(2N^2 - N)f_T$	$2N^2 f_T$	$N^2 f_T$
Размерность	УВ1	N	N
	УВ2	N^2	N
	ФП	N	N^2
Отношение Псалтиса	$2N - 1$	2	1
Производительность при матрично-матричных умножениях	f_T / N	$f_T / (2N - 1)$	f_T / N

На основе простых моделей шумов и погрешностей элементной базы построен программный эмулятор работы бинарного аналогового ОВМП. Эксперименты с построенной математической моделью ОВМП показали, что при использовании современной элементной базы, точность представления результата в системе соответствует 6-7 двоичным разрядам, что хорошо согласуется с известными экспериментальными и теоретическими результатами.

Детально рассмотрены методы повышения точности вычислений ОПЛА и проведен обзор архитектур их реализующих. Показано, что перспективными методами повышения точности ОПЛА могут быть признаны только методы, базирующиеся на вычислении дискретной свертки аналоговых сигналов. Показано, что эффективные вычисления известных точных аналого-цифровых ОВМП могут быть организованы только при применении архитектур, базирующихся на схемах дискретной свертки с временным интегрированием (далее ВИ). Рассмотрен новый алгоритм быстрого цифрового перемножения, впервые предложено его применение к линейно-алгебраическим операциям.

Предложены две оригинальные архитектуры точных акустооптических ОВМП, использующих принцип мультиплексирования сигнала акустооптического модулятора. Предложенная схема с пространственным интегрированием (далее ПИ) лишена принципиальных недостатков присущих ранее предложенным схемам

с пространственным интегрированием, но ее размерность существенно ограничивается параметрами современной элементной базы.

Схема предложенной архитектуры ОВМП ВП на основе многоканального многочастотного акустооптического модулятора представлена на рис.1. Система выполняет операции над $N \times N$ -мерными матрицами и N -мерными векторами с L -разрядным представлением чисел. Вектор подается на линейку лазеров (соответствующий элемент на соответствующий лазер побитно); матрица - в многоканальный АО-модулятор так, что индексы ij определяют номер канала и местоположение элемента в нем, а биты ij -того элемента матрицы вводятся одновременно за счет мультиплексирования. Перекрестные произведения элементов результирующего вектора снимаются с матрицы фотодетекторов размерности $N \times L$. Исходя из возможностей современной элементной базы, при десятибитном представлении входных величин размерность массивов может достигать ста. Предложенная схема с временным интегрированием, сохраняя все достоинства ОВМП с временным интегрированием, обладает рядом схематехнических преимуществ, по сравнению с ранее предложенными схемами (последовательно-параллельный ввод информации, снижение тактовых частот ввода ММАОМ, существенное снижение преобразований к суммирующей оптической системе).

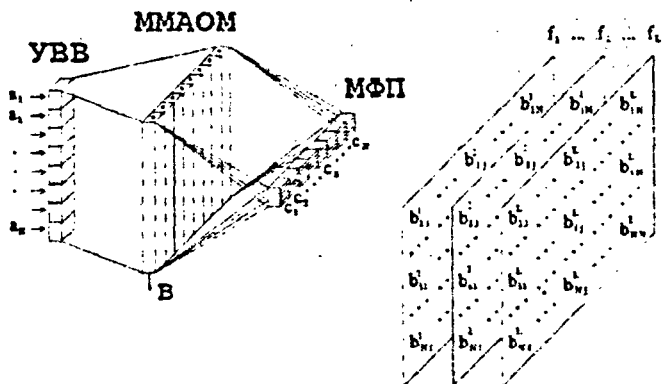


Рис.1. Архитектура точного оптического вектор-матричного перемножителя на основе многоканального многочастотного акустооптического модулятора

Рассмотрена возможность реализации ОВМП в виде гибридных оптоэлектронных микросхем.

Проведен сравнительный анализ различных возможных архитектур ОИТА по быстродействию, отношению Псалтиса и ограничениям на размерность, определяющимся для случая точных вычислений, исходя из достигаемого динамического диапазона на выходе системы и контраста используемых устройств ввода. Результаты анализа сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Схема	Быстродействие	Размерность			Отношение Псалтиса	Ограничения на размерность
		УВ1	УВ2	ФП		
ОВМП	$(2N^2 - N)f_i$	NN	N	N	$2N - 1$	$Nk_1d_2 < D,$ $K > D$
ОВВПВ	N^2f_i	N	N	NN	1	$d_1d_2 < D,$ $N < K$
ОММП	$2N^2f_i$	NN	NN	NN	2	$Nk_1d_2 < D,$ $K > D$
ОВМП ПИ	Nf_i/L	NLN	NL	N	$\frac{1}{L^2 + 2L - 2}$	$Lk^2 < D,$ $K > D$
ОВМП ВИ	$(2N^2 - N)f_i/L$	N	NNL	N	$\frac{2N - 1}{L^2 + 2L - 2}$	$Nk^2 < D,$ $K > D$
ОВМП ПИМ	$(2N^2 - N)f_i/L$	NL	NNL	N	$\frac{2N - 1}{L^2 + 2L - 2}$	$NLk^2 < D,$ $K > D$
ОВВПВ ВИ*	N^2f_i/L	NL	NL	$NNLL$	$\frac{1}{L^2 + 2L - 2}$	$k^2 < D,$ $N < K$
ОВВПВ ПИ	N^2f_i/L	NL	NL	NN	$\frac{1}{L^2 + 2L - 2}$	$Lk^2 < D,$ $K > D$
ОММП ПИ	N^2f_i/L	NNL	NNL	NN	$\frac{1}{L^2 + 2L - 2}$	$Lk^2 < D,$ $K > D$
ОММП ВИ	$2N^2f_i/L$	NNL	NNL	NNL	$\frac{2}{L^2 + 2L - 2}$	$NLk^2 < D,$ $K > D$

*) рассматривается общий случай с суммированием поддиагоналей (в цифровом варианте с получением только бит переноса отношение Псалтиса стремится к бесконечности).

В таблице: N - размерность, J - диапазон изменения входных величин на входе аналоговой системы, $k+1$ - основание представления величин в случае точных систем, L - разрядность представления, D - динамический диапазон на выходе системы, K - контрастное отношение используемых устройств ввода, f_T - тактовая частота работы системы. ВИ - схемы с временным интегрированием, ПИ - схемы с пространственным интегрированием, ПИМ - схема с пространственным интегрированием на основе мультиплексирования сигнала акустооптического модулятора.

Также проведены оценки быстродействия, отношения Писаттиса и эффективности различных схем ОПЛА при частоте ввода 50 МГц. Оценки эффективности проводились с учетом параметров серийных образцов элементной базы. Оценки быстродействия и отношения Писаттиса показали превосходство схем аналоговых ОВМП и точных ОВМП ВИ и ОВВПВ ВИ над другими ОПЛА и показали, что на настоящий момент, точные ОПЛА эффективны при бинарном представлении и при небольшой - до 8 бит - разрядности представления величин на входе системы. Оценки эффективности показали возможность достижения значений эффективности лучших схем ОПЛА до 10^{10} операций на Ватт в секунду, что на порядки выше значений эффективности как существующих суперкомпьютеров (для сравнения брались ТМ СМ200 и Gray Y-MP) так и возможных специализированных электронных вычислителей (для сравнения брался перемножающий чип TRW TMC2208).

В экспериментальной части работы приводятся результаты экспериментальных исследований, проводившихся для подтверждения основных положений данной работы. Экспериментальные работы включали в себя три основных направления, а именно:

1 - исследования важнейших элементов ОПЛА, определяющих их принципиальные параметры.

2 - создание и исследование функционирования макетов основных схем конволверов, реализующих алгоритмы дискретной свертки, и являющихся базовыми узлами точных ОПЛА.

3 - создание и исследование функционирования действующих макетов оптических вектор-матричных перемножителей.

Целью предварительных экспериментов по исследованию характеристик тракта "полупроводниковый лазер - фотодиод" являлась проверка возможности использования его различных конфигураций при построении ОВМП. Были исследованы тракты, построенные на базе полупроводниковых лазеров аналогичных ИППН-780 (длина волны 0,87 мкм) и двух типов фотодиодов - лавинного фотодиода ИПО "Орион" и р-п фотодиода аналогичного ФД-256. Результаты измерения АЧХ трактов в полосе 1 МГц - 1,25 ГГц показали, что более предпочтительным при построении ОВМП представляется использование лавинных фотодиодов. Целью предварительных экспериментов по исследованию характеристик имеющегося восьмиканального многочастотного акустооптического модулятора (ММАОМ) на TeO_2 (в комплексе с устройством управления) являлась проверка возможности его использования при построении ОВМП. В ходе измерений оценивались:

- дифракционная эффективность каналов;
- разброс дифракционной эффективности по длине каждого канала вследствие затухания акустической волны в звукопроводе;
- взаимовлияние каналов вследствие расходимости акустической волны в каждом канале. Измерения показали возможность коррекции значений дифракционной эффективности по каналам и частотам каналов модулятора и отсутствие, при данной точности измерений, эффекта взаимовлияния каналов.

Результаты исследований серийных образцов элементной базы показывают возможность создания ОВМП с производительностью до 10^{17} операций в секунду.

С целью исследования функционирования устройств дискретной аналоговой свертки были собраны макеты конволверов

- с пространственным интегрированием на базе акустооптического модулятора и неизменяемого транспаранта;
- с временным интегрированием на базе неизменяемой маски и линейного ФПЗС;
- с временным интегрированием на базе акустооптического модулятора, работающего в многочастотном режиме и линейного ФПЗС.

Такие устройства являются базовыми узлами архитектур ОПЛА соответственно:

- на "скрещенных" модуляторах - ОВМП ПП, ППМ и ОММП ПП;
- точных ОВМП с временным интегрированием - ОВМП ВП;

- точного ОВМП с временным интегрированием на базе многоканального многочастотного акустооптического модулятора - ОВМП ВИ ММАОМ.

На основе исследования функционирования построенных макетов устройств, реализующих аналоговую свертку дискретных сигналов, экспериментально подтверждены, как сама возможность построения предложенных схем, так и преимущества предложенной в главе II схемы с временным интегрированием.

Были собраны макеты двух вариантов аналоговых ОВМП:

- на основе неизменяемого транспаранта;
- на основе ММАОМ.

Проведено исследование работы макетов, функционировавших под управлением IBM PC. Результаты проведенных исследований показывают возможность создания в лабораторных условиях перемножителя с производительностью порядка 10^8 опер/сек при полном использовании размерности модулятора и при тактовой частоте ввода данных в диапазоне 1 - 7 МГц. При предельном повышении тактовых частот работы макета (что потребует использования более быстродействующих блоков управления) можно ожидать повышения производительности макетов, до 10^{11} опер/сек.

Изложенные результаты экспериментальных исследований полностью подтверждают теоретические положения глав I и II.

В работе рассматривается возможность создания на базе ОВМП гибридной нейророботной системы инвариантного распознавания изображений.

На основе анализа задачи построения многослойной нейронной сети, показано, что многослойные НС могут быть эффективно реализованы на базе аналоговых ОВМП. Предложена оптимальная схема реализации двухслойной нейронной сети на базе бинарных аналоговых ОВМП, с числом нейронов в каждом слое до 100.

Рассмотрена и проанализирована возможность создания гибридной системы инвариантного распознавания изображений на базе двухслойной нейронной сети, реализованной на ОВМП, и блока предобработки изображений, реализующего вычисление инвариантных геометрических моментов изображения. Применение предобработки позволяет снизить требования к информационной емкости сети, а значит ускорить процесс обучения и снизить вычислительную нагрузку при функционировании сети. Были проведены компьютерные

эксперименты с последовательным изменением уровня зашумления входного сигнала сети для различных значений зашумления остальных параметров сети. Таблицы экспериментов приведены в приложении. При нулевом зашумлении всех параметров сети (т.е. например, использовании программного эмулятора) ИС позволяет правильно распознавать изображения (здесь и далее изображение - это набор из трех нормированных моментов) с вероятностью более 99% при зашумлении входа до 50% (для 64 нейронов внутреннего слоя) и до 60% (для 120 нейронов). Практически такие же результаты получаются и для уровня зашумления параметров ИС 5% и 10%, что может соответствовать оптоэлектронной аналоговой реализации нейросети на базе векторно-матричного перемножителя при использовании алгоритмов ДМАС или цифрового разделения. Если же допустимый уровень зашумления параметров ИС составляет 30% - правильное распознавание - 99% - сохраняется при уровне зашумления входного изображения до 35% (64 нейрона) и до 45% (120 нейронов). Этот случай позволяет согласовать необходимую точность аналоговой оптической реализации нейросети с точностью, получаемой при предобработке. Таким образом, результаты компьютерных экспериментов позволяют ожидать успешного сопряжения предобработки изображений с алгоритмом реализации нейронной сети на базе оптических вектор-матричных перемножителей.

Рассматривается и оценивается возможность создания на базе точного ОВМП с временным интегрированием специализированного процессора, реализующего прямые алгоритмы решения систем линейно-алгебраических уравнений для задач управления адаптивными антенными решетками. Показано, что задача управления линейной адаптивной антенной решеткой может быть эффективно решена при использовании в качестве элемента, выполняющего основную вычислительную нагрузку точного ОВМП ВП. Предложена схема контура управления ААР на основе такого ОВМП. Система выполняет матрично-матричные перемножения, необходимые для реализации оптимальных алгоритмов решения систем ЛАУ ААР - LU- и QR-разложений. Для представления комплекснозначных величин в системе используется метод циклических матриц ЭхЭ. Исходя из предельных возможностей современной элементной базы система, при достаточно глубоком уровне технологической проработки сможет управлять сигналами линейной ААР с 30 (в пределе с 90) элементами. Требования к пропускной способности чистого электронного вычислительных блоков системы (10-

10¹⁰ операций в секунду при восьмибитной точности) представляются выполнимыми (в случае QR-алгоритма возможно использование чисто цифрового ОВВПВ ВИ). Точность результата вычислений системы (17-18 бит) полностью удовлетворяет задаче ААР. Контур управления ААР с большим числом элементов может быть построен при "каскадировании" предлагаемых систем, а реализуемый алгоритм допускает оптимизацию, исходя из конкретных условий работы системы, при использовании свойств "разреженности" и "квазидиагональности" матрицы.

В приложении представлены таблицы результатов компьютерных экспериментов по моделированию распознавания двухслойной нейронной сетью изображений, представленных инвариантными геометрическими моментами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные полученные результаты и выводы настоящей диссертационной работы были сформулированы следующим образом:

1. Проанализированы базовые варианты архитектур ОПЛА. На основе предложенной методики показано, что наиболее перспективной из них является архитектура оптического вектор-матричного перемножителя (ОВМП). Показано, что, при точных вычислениях, в связи с ограниченностью выходного динамического диапазона, чисто аналоговый ОВМП, построенный на современной элементной базе, наиболее конкурентоспособен при бинарном представлении данных.

2. Рассмотрены и проанализированы методы повышения точности ОПЛА. Показано, что точные вычисления могут быть эффективно организованы только при применении ОВМП, использующих метод дискретной свертки с временным интегрированием (ВИ). Предложено применение алгоритма быстрых цифровых перемножений к вектор-матричным операциям. Предложены и рассмотрены возможные архитектуры интегральных ОВМП в виде гибридных оптоэлектронных микросхем.

3. Предложены две оригинальные архитектуры точных акустооптических ОВМП, использующих принцип мультиплексирования сигнала акустооптического модулятора. Предложенные схемы по ряду показателей превосходят известные аналоги. На основе исследования построенных макетов акустооптических

конволверов экспериментально подтверждены как сама возможность реализации предложенных схем, так и их преимущества.

4. Проведены экспериментальные исследования характеристик основных узлов, использующихся при разработке и построении ОВМП. Исследования показали как возможность коррекции разброса дифракционной эффективности по каналам и частотам каналов ММАОМ, так и устойчивость работы трактов лазер-фотодиод в полосе частот, верхняя граница которой, превышает предельные частоты работы современной электронной полупроводниковой элементной базы (единицы ГГц), что, в пределе, позволяет ожидать значений пропускной способности ОВМП на уровне 10^{11} опер/сек.

5. На основе простых математических моделей шумов элементов ОВМП создан программный эмулятор бинарного аналогового ОВМП. Эксперименты с построенной моделью показали, что при использовании элементной базы, обеспечивающей низкий класс точности системы, точность представления результата в системе соответствует 6-7 двоичным разрядам, что хорошо согласуется с известными экспериментальными и теоретическими результатами.

6. Собраны макет ОВМП, выполняющий, в зависимости от режима подачи и съема данных, аналоговое перемножение бинарных векторов и матриц или точные перемножения векторов по алгоритмам дискретной аналоговой свертки. Проведены экспериментальные исследования функционирования собранного макета, показавшие возможность достижения значений производительности макета до 10^{11} опер/сек.

7. На основе анализа задачи построения многослойных нейронных сетей, показано, что такие сети могут быть эффективно реализованы на базе аналоговых ОВМП. Впервые предложена оптимальная схема реализации двухслойной нейронной сети на базе бинарных аналоговых ОВМП, с числом нейронов в каждом слое сети до 100.

8. Впервые рассмотрена и проанализирована возможность создания гибридной системы инвариантного распознавания изображений на базе двухслойной нейронной сети, реализованной на ОВМП, и блока предобработки изображений, реализующего вычисление геометрических моментов изображения. Компьютерные эксперименты по моделированию работы такой системы показали возможность корректного распознавания входного образа при сильном - до 30° - зашумлении входного сигнала сети.

9. На основе проведенного анализа задачи управления адаптивных антенных решеток (ААР) предложена оптимальная схема сигнального процессора ААР, реализующая прямые методы решения систем линейно-алгебраических уравнений и базирующаяся на точном ОБМН с временным интегрированием. С учетом предельных характеристик современной элементной базы, такая схема позволит обрабатывать сигналы 30-элементной решетки с производительностью до 10^{12} операций в секунду.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. N.N. Evtihiev, R.S.Starikov, B.N. Onyky, V.V. Perepelitsa, I.B. Scherbakov. "Experimental investigation of the performance of the two-layer neural network based on an optical vector-matrix multiplier" Optical Computing international conference, Edinburgh 22-25 August 1994. Abstracts WP-147.

2. N.N. Evtihiev, R.S.Starikov, B.N. Onyky, V.V. Perepelitsa, I.B. Scherbakov. "Experimental investigation of the performance of the two-layer neural network based on an optical vector-matrix multiplier" Optical Computing (Inst.Phys.Conf.Ser.) N139 Part 4 pp.467-470 I.O.P. Publishing Ltd 1995.

3. N.N. Evtihiev, R.S.Starikov, B.N. Onyky, V.V. Perepelitsa, I.B. Scherbakov. "Experimental investigation of the performance of the optical two-layer neural network" SPIE International conference on optical memory and neural networks, Moscow, Russia, Aug. 1994.

4. N.N. Evtihiev, R.S.Starikov, I.B. Scherbakov, A.E. Gaponov, B.N. Onyky. "Hybrid optoelectronic neurocomputer: variants of realizations" SPIE v2492 pp.96-103 1995.

5. N.N. Evtihiev, R.S.Starikov, B.N. Onyky, V.V. Perepelitsa, I.B. Scherbakov. "Experimental investigation of the performance of the optical two-layer neural network" Optical Memory & Neural Networks v4, N4 1995 pp.15-321.

6. N.N.Evtihiev, R.S.Starikov, I.B.Scherbakov, B.N.Onyky, D.V.Repin, M.I.Zabulonov. "Optical Hardware Implementation of the Two-Layer Neural Network with the Pre-Processing Unit for Invariant Pattern Recognition" proc.SPIE v2752 pp.281-289 1996.

7. N.N.Evtihiev, B.N.Onyky, D.V.Repin, I.B.Scherbakov, and R.S.Starikov. "The Hierarchical Optoelectronic Processor Based on Neural Network with Pre-Processing Unit" Photonics and Optoelectronics (2 N4 1994(96) pp.187-197.

8. N.N.Evtihiev, R.S.Starikov, I.B.Scherbakov, B.N.Onyky, D.V.Repin, M.I.Zabulonov. "The Hierarchical Hybrid Optoelectronic Neural Network System Based on the Vector-Matrix Multiplier with the Pre-Processing Unit" II Международная конференция по оптической обработке информации. С.-Петербург июнь 1996. Тезисы докладов стр.5.

9. N.N.Evtihiev, R.S.Starikov, I.B.Scherbakov, B.N.Onyky, D.V.Repin, M.I.Zabulonov. "The Hierarchical Hybrid Optoelectronic Neural Network System Based on the Vector-Matrix Multiplier with the Pre-Processing Unit" proc.SPIE v 2969 1996.

Подписано в печать 30.09.97 Заказ 742

Тираж 80 экз.