

Доклад 1

Схема информационного взаимодействия основных устройств МКСК (*многоканальный стрельбовый комплекс системы ПРО, прим. ред.*) показана на плакате (*не сохранился, прим. ред.*).

Данные целеуказания поступают от СДО через аппаратуру передачи данных (АПД). Данные по целям поступают от РКЦ-35Т (*радиолокатор космической цели, т.е. ракеты противника, прим. ред.*), после траекторной обработки, основанной на баллистической характеристике траектории, и опознавания по данным о поляризационных свойствах сигнала поступают на КВП, который осуществляет управление пусковыми установками, радиолокаторами РКИ-35Т (*радиолокатор космического изделия, т.е. противоракеты, прим. ред.*), вырабатывает команды управления изделием и команду подрыва БЧ (*боевая часть, прим. ред.*).

При сопровождении изделия по ответчику, в отличие от сопровождения цели, исключается необходимость обнаружения и обработки сигналов, закрытых шумами. Однако, обработка траектории здесь сложнее, т.к. ускорение изделия изменяется в широких пределах.

В представленном эскизном проекте предлагается специализированный вычислительный комплекс «Алмаз», рассчитанный для наиболее эффективной реализации боевых алгоритмов МКСК.

Требования к параметрам вычислительных средств были уточнены в соответствии с исходными данными Генерального конструктора и результатами анализа алгоритмов, указанных на плакате.

Были оценены возможности создания высокопроизводительной наземной ЦВМ за счет увеличения рабочих частот элементов, а так же за счет выбора соответствующей структуры и логики.

В настоящее время подготовлены для запуска в серийное производство диодно-транзисторные логические элементы, работающие на тактовой частоте 6 МГц. Ожидается, что в 1968 г. будут разработаны элементы на тактовую частоту

13÷15 МГц, а в 1969 г. на 50 МГц. При традиционных методах построения сложной машины эти элементы позволяют соответственно получить быстродействие порядка 1,0 – 1,5 – 5,0 млн. операций в секунду. Однако быстродействие по реализации алгоритмов будет значительно ниже.

Дальнейшее увеличение частотности элементов и создание машины, работающей на высоких частотах является сложной физико-технологической проблемой, решение которой будет достигаться дорогой ценой и потребует много времени.

Более высокие возможности для повышения производительности ЦВМ создаются при выборе ее структуры и логики на основе методов распараллеливания обработки между отдельными вычислительными устройствами, связанными системой управления.

Исследования непозиционных систем счисления, проведенные в Научном Центре, показывают большую перспективность распараллеливания процессов обработки не на уровне алгоритмов, как это предусматривается в обычных вычислительных системах, а на уровне элементарных операций, т.е. параллельное выполнение операций над соответствующими частями слова.

Именно этот метод положен в основу машины «Алмаз».

В качестве основных логических элементов применены микросхемы «Посол» с тактовой частотой 6 ÷ 10 МГц.

Использование непозиционной арифметики позволило освободиться от необходимости учитывать при выполнении операций переносы из младших разрядов в старшие, которые усложняют аппаратные решения и ограничивают возможность достижения высокого быстродействия.

В непозиционной системе оказалось возможным применить в арифметическом устройстве небольшие таблицы (матрицы), в которых закладываются результаты двухвходовых операций. При этом считывание производится за один такт. Более того, выполнение полиномов, функций Sin, Cos, e^x и др. так же является одно-тактовой операцией. Это позволило существенно повысить алгоритмическую производительность машины «Алмаз».

Важнейшим вопросом при построении ЦВМ является обеспе-

чение заданной надежности. Исследования непозиционных систем, проведенные в Научном Центре, позволили построить теорию кодовых представлений, обладающих способностью самокоррекции не только при передаче информации, но и при выполнении арифметических операций. Это позволило достигнуть заданную надежность при элементах, имеющих $\lambda=10^{-6}$.

При выборе структуры вычислительных средств задачи РКЦ и РКИ рассматривались отдельно.

Для РКЦ оказалось целесообразным использовать два типа вычислительных устройств: непрограммный преобразователь информации, предназначенный специально для формирования единичных замеров, и высокопроизводительная машина (с широким диапазоном представления чисел и большим набором команд) для решения остальных задач.

В пользу такого решения говорят высокие требования по скорости поступления информации (30 тысяч 100-разрядных слов в секунду), а также возможность получать при формировании замеров примерно десятикратное сжатие информации при преобразователе.

Задачи РКИ-35Т решаются высокопроизводительной ЦВМ, такой же, как применяется для РКЦ.

Алгоритмическая эффективность вычислительных средств считалась отдельно для преобразователя информации (ПИ), машины РКЦ и машины КВП, решающей задачи РКИ. Расчеты показали, что ПИ имеет производительность 3,9 млн. алг. операций в секунду. При этом остается многократный резерв производительности, исчерпываемый полностью лишь при поступлении сигнальных пачек (по 5 слов) каждые 2 мксек.

Эффективность ВМ РКЦ исчисляется цифрой 3,5 млн. алгоритмических операций в секунду, а ВМ КВП – 3,9 млн. алгоритмических операций в секунду.

Пропускная способность ВС МКСК определяется как максимальное количество целей, при работе с которыми средства еще решают поставленные задачи. Расчеты, правда несколько упрощенные, показывают, что РКЦ-35Т могут работать по 700 целям, более осторожно можно считать 500 це-

лей. РКИ-35Т обеспечивает наведение 50 изделий.

На стадии эскизного проектирования проводилось и в настоящее время ведется моделирование реализации основных алгоритмов на универсальных ЦВМ. Полученные результаты подтверждают данные, полученные на основе предварительных расчетов.

Вычислительные средства МКСК, разрабатываемые в Научном Центре, используют в качестве базы технологию интегральных схем и другие методы микроэлектроники.

Это облегчает решения проблемы повышения надежности, уменьшения габаритов, весов, потребляемой энергии и стоимости.

Применяемые элементы «Посол» являются интегральными гибридными диодно-транзисторными логическими схемами, выполняющими функции И-НЕ/ИЛИ-НЕ, и характеризуются такими параметрами:

Время задержки распространения	– 20 ÷ 30 нсек,
Потребляемая мощность	– 10 ÷ 15 мВт,
Нагрузочная способность	– 4,
Число входов «И»	– 8.

Если принять во внимание эти параметры, то утверждение тов. Карцева на предыдущем заседании о том, что на элементах типа «Посол» может быть построена на традиционных принципах машина производительностью в 2 ÷ 4 млн. операций в секунду, вызывает некоторое недоумение. Особенно, если учесть, что в эскизном проекте ИТМ и ВТ, где речь идет о создании машин именно традиционного типа, предполагается для достижения такой производительности использовать элементы с более высокими (на порядок) параметрами по быстрдействию.

Требования к надежности вычислительных средств определяются следующими цифрами: вероятность безотказной работы в течение 15 мин. Должна быть не менее 0,9999 и коэффициент готовности в установившемся режиме должен быть также не менее 0,9999.

Если бы машина была выполнена в непозиционной системе, то введением двух дополнительных оснований проблема на-

дежности была бы решена. Однако, в непозиционной системе может быть построена только половина оборудования машины. При этом вероятность безотказной работы незащищенной части будет меньше четырех девяток – 0,9875, а части, защищенной по непозиционной системе – 0,999936, т.е. подавляющая часть ненадежности приходится на долю оборудования, не допускающего построения в непозиционной системе.

Задача обеспечения надежности решается резервированием этой части оборудования на уровне блоков с применением контроля исправности. В этом случае надежность системы в целом составит 0,999912, т.е. удовлетворяет требованиям. Коэффициент готовности при этом будет обеспечен при времени восстановления 20 мин.

Машина «Алмаз» размещена в 10 шкафах на площади 50 ÷ 100 кв. м., потребляет 1 кВт электроэнергии.

Стоимость машины, понимая под этим затраты на производство машины, на комплектацию стендовой аппаратуры и ЗИП, была рассчитана по предложенному НИИ-2 МО методу и составляет для серийного образца 2,6 млн. руб., для опытного образца (может быть изготовлен в 1971 г.) – 4,2 млн. рублей.

В эскизном проекте показана возможность применения современной прогрессивной технологии – микроэлектроники для создания основных устройств высокопроизводительной машины, позволяющей изготавливать отдельные микросхемы в едином технологическом цикле.

В проекте отражено специальное назначение вычислительных средств МКСК. Для предварительной обработки радиолокационной информации создано специальное устройство преобразования, позволяющее проводить на проходе необходимое сжатие информации, поступающей в накопители вычислительных средств, что освобождает вычислительные средства РКЦ от необходимости выполнять 3,9 млн. операций в секунду и хранить более 100 тысяч полноразрядных слов.

Применение непозиционных систем (при относительно малом быстродействии элементов) дало возможность получить

алгоритмическую производительность порядка 4 млн. оп/сек и разработать специальные самокорректирующие коды, способные обнаруживать и исправлять ошибки не только при хранении и транспортировке информации, но и при ее обработке в устройствах вычислительной машины, что позволило при применении ограниченного резерва достигнуть необходимой надежности и боеготовности.

В целом в эскизном проекте показана возможность разработки вычислительных средств МКСК в соответствии с требованиями на этот комплекс.

Ряд вопросов, относящихся к организации вычислительных средств, проработаны в эскизном проекте недостаточно подробно и должны быть детализированы на этапе технического проектирования.

Доклад 2

В настоящее время области применения ЦВМ значительно расширились и объем информации, предъявляемой для обработки на ЦВМ различными реальными системами и вычислительными центрами, возрос настолько, что для реализации требуемой эффективной производительности необходимо привлечение существенно новых идей и новой технологической основы построения ЦВМ.

Генеральной идеей в повышении эффективной производительности вычислительных систем является распараллеливание и распределение процессов обработки для одновременного выполнения по отдельным машинам и устройствам. В соответствии с этой идеей создаются системы машин, связанных воедино сложной структурой иерархического управления. Реализация обработки информации в такой системе требует широкого распараллеливания алгоритмов обработки, что далеко не всегда возможно, т.к. значительное число практически важных алгоритмов имеют сугубо последовательный характер.

Весьма перспективным вариантом указанной генеральной идеи является распараллеливание не на уровне алгоритмов, а на уровне элементарных операций, т.е. разбиение обраба-

тываемого слова (числа) на малые части и параллельное выполнение элементарных операций над этими частями. В этом плане необходимо вести поиск соответствующих теоретико-арифметических концепций, определяющих характер частей разбиения слова, способов их параллельной обработки и путей восстановления полного значения слова по значениям отдельных его частей.

Такой концепцией явилась система остаточных классов, базирующаяся на классических разделах теории чисел (теория сравнений, теория первообразных корней и индексов и др.) За последние годы была создана машинная арифметика в системе остаточных классов и значительно продвинуто практическое внедрение системы.

В НИИ-37 коллективом разработчиков, часть которых в настоящее время работает в Центре микроэлектроники, построен действующий лабораторный образец, изготовлен и заканчивается отладкой заводской экземпляр и подготавливается серийное освоение ЦВМ, работающей в системе остаточных классов с весьма высокой эффективной производительностью.

Система остаточных классов не является единственной системой распараллеливания. В настоящее время в центре микроэлектроники разработана новая, более общая концепция, названная слабопозиционной системой, включающая, как частный случай, систему остаточных классов. Эта концепция позволяет улучшить, по сравнению с остаточными классами, реализацию операций, апеллирующих в той или иной форме ко всему слову в целом, и ввести числовые системы представления, принципиально немислимые в остаточных классах (например, представления с участием производных). Для слабопозиционной системы теоретической базой является не только теория чисел, но и некоторые разделы классического анализа (теория интерполяции, теория полиномов и др.).

Именно указанные концепции собственно остаточных классов и слабопозиционных систем лежат в основе реализации арифметических устройств и методов выполнения операций в ЦВМ «Алмаз», разрабатываемой в Центре микроэлектро-

ники, которая создается на интегральных схемах и является первой отечественной машиной высокого класса, создаваемой на микроэлектронной базе.

Применение в ЦВМ высоких рабочих частот приводит к существенному усложнению аппаратурной части (задержки в передаче сигналов, необходимость монтажных проводов рассматривать как двухпроводную линию связи с распределенными параметрами и невысоким волновым сопротивлением, трудности синхронизации, согласование элементов и т.д.).

Для упрощения аппаратурной части и увеличения устойчивости элементов в ЦВМ "Алмаз" принята рабочая частота 1 МГц, а необходимая эффективная производительность реализуется за счет новой системы счисления и оригинальной структуры арифметического устройства.

Для принятой в "Алмазе" слабопозиционной системы счисления все арифметические операции являются одноктактными, следовательно, рабочее быстродействие машины – 1 млн. любых операций: в секунду. В позиционной машине простейшая операция типа сложения, с учетом межразрядных переносов, выполняется обычно за 5 машинных тактов. Для удобства последующих сопоставлений примем за единицу операцию сложения C :

C_H – операция сложения в слабопозиционной системе,

C_P – операция сложения в позиционной системе.

$$C_P = 5C_H.$$

Однако, основной характеристикой ЦВМ является не рабочее быстродействие, а эффективная производительность, т.е. производительность, достигаемая при реализации тех или иных классов алгоритмов. Эта характеристика зависит уже не только от рабочего быстродействия, а и от организации машины в целом, от ее структуры и логики, иначе говоря, от ее способности эффективно обрабатывать комплексы операций.

Эффективное быстродействие ЦВМ "Алмаз" значительно превышает ее рабочее быстродействие. Дело в том, что слабопозиционная система (включая ее частный случай – сис-

тему остаточных классов) обладает, помимо возможностей организации параллельной арифметической обработки частей слова, рядом существенных особенностей, которые могут быть использованы для повышения эффективной производительности, и которыми ни в коей мере не обладают обычные позиционные системы. Это:

- Возможность выполнения любой операции за 1 машинный такт, причем за машинный такт принимается такт частоты синхронизации.

- Возможность выполнения за один машинный такт любой сложности функции одной или двух переменных, если имеется однозначное соответствие между значениями операндов и результата. Выполнение таких функций может быть введено в систему команд ЭВМ в виде специальной операции.

- Возможность обнаружения и исправления ошибок в арифметическом устройстве.

Рассмотрим эти особенности подробнее.

1. Выполнения любой операции за 1 машинный такт.

Очевидно, что эффективная производительность позиционной машины существенно зависит от характера и состава операций, которые надлежит выполнить для реализации алгоритма. Так, например, для алгоритмов первичной и вторичной обработки радиолокационной информации в позиционной системе может быть принят следующий состав операций:

- Сложения-вычитания, логические и управленческие - 80%,
- Умножения - 15% (для умножения мы уже приняли оценку $4C_n$),
- Деления - 5%. (Для деления можно принять оценку $15C_n$).

Таким образом, в единицах C этот состав операций для позиционной машины может быть оценен:

$$80 \times C_n + 4 \times 15 \times C_n + 5 \times 15 \times C_n = 215 C_n = 1075 C_n.$$

А для ЦВМ "Алмаз", где $C_n = 1$, соответствующая оценка составляет $100 C_n$.

Таким образом, только от однотоктности всех операций ЦВМ

"Алмаз" (с системой команд, не включающей команды выполнения функций) по эффективной производительности выше позиционной более чем в 10 раз ($1075 : 100 = 10,75$).

2. Возможность выполнения функции за один машинный такт.

Реализация большого класса алгоритмов связана с вычислением значений функций одной или двух переменных, на которые в позиционных ЭВМ обычно затрачивается до 40 машинных операций типа сложения.

Среди операций, реализующих вычисление значений функций в позиционной машине, 25% составляют умножения, каждое из которых выполняется не менее чем за $4C_{\text{п}}$. Таким образом, на вычисление одного значения функции должно быть затрачено порядка:

$$40 \times 0,75 \times C_{\text{п}} + 40 \times 0,25 \times 4C_{\text{п}} = 70C_{\text{п}} = 350C_{\text{н}}$$

Слабопозиционная система позволяет вычислять значения элементарных функций на основе их полиномиальных приближений одной выборкой из таблицы, т.е. также равно $1C_{\text{н}}$.

Таким образом, значение элементарной функции в ЦВМ "Алмаз" (с системой команд, включающей команды выполнения функций) будет вычисляться в 350 раз быстрее, чем в позиционной машине с той же тактовой частотой.

Реально в алгоритмах решения задач ПРО используются и обычные операции, и элементарные функции. Из всей совокупности операций, реализующих алгоритмы ПРО, 15% отнимает вычисление значений элементарных функций. Тогда общая эффективная производительность ЦВМ "Алмаз" на этом классе алгоритмов будет больше эффективной производительности позиционной ЦВМ в:

$$0,15 \times 350 + 0,85 \times 10 = 61 \text{ раз}$$

3. Обнаружению и исправлению ошибок в арифметическом устройстве.

Эффективным способом обеспечения правильности обработки является применение самокорректирующихся кодовых систем. Такие системы были разработаны для передачи ин-

формации по каналам связи и давали возможность восстановить на приемном конце истинную переданную информацию, даже если она подвергалась по пути довольно существенным искажениям.

Оказывается, что в отличие от обычной позиционной системы, где самокоррекция принципиально возможна только при передаче информации, в слабопозиционной системе, включая и систему остаточных классов, могут быть построены самокорректирующиеся коды, позволяющие восстанавливать истинные результаты вычислений по цепи элементарных операций, если во время этих вычислений имели место какие-либо ошибки.

Такая теория специального кодирования построена. Она позволяет введением минимальной избыточности в представлении слова осуществлять исправление методами близкими к исправлению по смыслу на основе анализа получающихся искажений слов на основе последовательной обработки. Такая система специального кодирования предусматривается в ЦВМ "Алмаз". Она по своим результатам эквивалентна применению двойных просчетов для установления правильности проведенных вычислений и тройных для исправления возникшей ошибки.

Таким образом слабопозиционные машины всегда производительнее и надежнее позиционных и чем сложнее вычисляемые функции, чем их больше, тем они эффективнее.