

Ю.И. Борисов, к.т.н., НТЦ «Модуль»

О реализуемости трактов приема и обработки пассивных систем подводного акустического наблюдения на основе специализированных микропроцессоров отечественного производства

Пассивные системы подводного акустического наблюдения состоят из массива приемников, усилителей и аппаратуры передачи информации, размещаемых в морской среде и объединенных в т.н. выносную часть и устройств передачи, обработки и отображения данных, находящихся в зоне доступности обслуживающего персонала - бортового прибора.

Связь выносной части и бортового прибора осуществляется обычно по кабелям морского исполнения, имеющим невысокую информационную пропускную способность, что существенно ограничивает поток данных, передаваемых для обработки в бортовой прибор.

Обработку данных в пассивных системах акустического наблюдения принято разделять на пространственно-временную (первичную), имеющую целью повысить отношение сигнал/шум на выходе тракта обработки и вторичную – сравнение с порогами, трассовое накопление, классификацию и т.п. Большие потоки данных и большая часть объема арифметических операций приходится именно на этап первичной обработки.

Ввиду этого размещение аппаратуры первичной обработки сигналов в выносной части позволило бы существенно снизить требования к пропускной способности канала связи выносная часть - бортовой прибор и уменьшить объем кабельных соединений.

Основой для создания современных трактов пространственно-временной цифровой обработки принимаемых сигналов и управления излучаемыми сигналами могут служить

- Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС)

- Микропроцессоры общего назначения
- Специализированные микропроцессоры для цифровой обработки сигналов (ЦОС)

Реализация вычислительных алгоритмов на основе ПЛИС обеспечивает наибольшее быстродействие за счет большого увеличения объема оборудования и, следовательно, энергопотребления.

Микропроцессоры общего назначения зарубежного производства достигают к настоящему моменту пиковой производительности, приближающейся к 10^9 операций с плавающей запятой в секунду. Однако такие процессоры имеют высокое энергопотребление, требуют значительных объемов дополнительного оборудования для связи с оперативной памятью и внешними устройствами, существенно избыточны по своей архитектуре и дороги вследствие универсальности. Кроме того, создание на их основе многопроцессорных систем затруднено их архитектурными особенностями, а применение их в системах реального времени осложняется наличием в их архитектуре большого количества конвейеров и кэшей.

Специализированные микропроцессоры ЦОС отличаются от процессоров общего назначения целенаправленной архитектурой, наличием встроенных средств для компоновки многопроцессорных систем и развитых каналов ввода/вывода информации, низким энергопотреблением и высокой надежностью. Таким образом, именно микропроцессоры ЦОС представляются наиболее подходящей основой для разработки высокопроизводительных трактов пространственно-временной ЦОС.

Процессор NM6403 и его модификации

Среди предлагаемых на рынке микропроцессоров ЦОС следует особо выделить микропроцессор NM6403, разработанный полностью в России Научно-техническим Центром “Модуль” и производимый сериями на

фабрике Samsung, и его последующую модификацию NM1281, готовящуюся к серийному производству [1].

Микропроцессор NM6403 выполнен по КМОП технологии 0.5 мкм, имеет тактовую частоту 40 МГц (цикл 25 нс) и «представляет собой гибрид RISC-процессора с массово-параллельным сверхбыстродействующим вычислителем. Получившаяся в результате такого "скрещивания" архитектура идеально подходит для решения задач цифровой обработки сигналов...» [2]. Потребляемая процессором мощность – 1.3 Вт. Корпус – BGA256. Условия эксплуатации и надежность соответствуют требованиям программы Климат-6. Операнды RISC-процессора имеют длину до 32 разрядов, операнды вычислителя – до 64 разрядов. Для связи с оперативной памятью имеются две отдельно функционирующие шины с шириной магистрали данных 64 разряда, объемом адресуемой памяти до 16 Гбайт и общей пропускной способностью до 800 Мбайт/сек, полностью обеспечивающих управление памятью статического и динамического типов без дополнительных микросхем. Одна из этих шин предусматривает доступ к ней от многих процессоров. Ввод/вывод данных и передача данных в многопроцессорных комплексах может осуществляться через два коммуникационных порта, работающих независимо от RISC-процессора и друг от друга, с пропускной способностью по 20 Мбайт/сек, аппаратно совместимые с коммуникационными портами процессоров TMS320C4x. Общая средняя производительность программно-аппаратного комплекса на основе NM6403 для макрооперации умножения вектора на матрицу большой размерности при 32-разрядных операндах может быть оценена в 2.5 операции умножения двух операндов и сложения с третьим на такт или 100 МОп/сек. На основе процессора NM6403 разработаны и серийно производятся вычислительные модули, содержащие от 1 до 4 процессоров с тестовым интерфейсом JTAG, как автономные, так и управляемые по магистралям PCI или Compact PCI.

Процессор NM6404 будет иметь встроенную память объемом 2 Мбит удвоенную разрядность векторного вычислителя и тактовую частоту 150

МГц, за счет чего его производительность увеличивается в 10 раз по сравнению с производительностью процессора NM6403.

Существенным преимуществом систем на основе NM6403/ NM6404 является возможность построения на их основе многопроцессорных комплексов. Устойчивое функционирование этих процессоров при температурах среды до +85 С позволяет разрабатывать вычислительные системы с охлаждением только за счет конвективных потоков воздуха.

О возможности реализации цифровой пространственно-временной обработки тракта шумопеленгации на основе процессоров NM6403/ NM6404

Тракт первичной обработки пассивной системы акустического наблюдения, содержащей значительное количество приемников, предъявляет наибольшие требования к производительности вычислительной системы при цифровой реализации алгоритмов обработки. Алгоритм его функционирования для согласованной со средой обработке сигналов и предположении о малости полезного сигнала по сравнению с помехой может быть описан следующим образом (мы будем придерживаться терминологии [3], а числовые значения рассматривать как примерные):

- ввести очередной блок из $2^{10}=1024$ временных отсчетов сигнала по каждому из $2^{12}=4096$ пространственных каналов (частота квантования 20480 Гц, время накопления блока 0.05 сек, разрядность данных - 16);
- по каждому из пространственных каналов подвергнуть блок временных отсчетов дискретному преобразованию Фурье (ДПФ) и получить его спектр;
- для каждого из отсчетов спектра построить очередную оценку матрицы пространственных корреляций для всех пространственных каналов;

- отбелить спектр входного сигнала согласно построенной оценке матриц пространственных корреляций;
- для каждого из элементов пространственного разрешения построить оценку статистики обнаружения;
- сравнить статистики с порогами, решить задачи трассового накопления и классификации
- отобразить и документировать результаты

Общий поток входных данных составляет 3200 Мбайт/сек и может быть распределен с двойным запасом по скорости по магистралям памяти 8 процессоров.

Общая производительность вычислительного комплекса для подобной обработки с традиционными упрощениями алгоритмов вычислений (без отбеливания) оценивается в 3×10^{10} Оп/сек. Такая производительность может быть обеспечена 300 процессорами NM6403 или 30 процессорами NM6404.

Далее рассмотрим требования к объему оборудования для проведения согласованной со средой обработки по возможности без упрощений с целью достижения максимально возможного соотношения сигнал/шум.

ДПФ вещественных данных размерностью 1024 процессор NM6403 осуществляет за 25000 тактов или за 625 мксек. ДПФ по всем пространственным каналам может быть, таким образом, реализовано за время накопления блока на 52 процессорах NM6403. Следовательно, объем вычислителя для ДПФ может быть оценен в 64 процессора, а его энергопотребление примерно в 0.7 кВт. Для процессоров NM6404 эти оценки могут быть уменьшены в 8-10 раз. Разрядность отсчетов спектра может быть принята равной 32 в соответствии с шириной магистрали обмена с памятью.

Формирование оценки корреляционной матрицы путем скользящего по времени усреднения пространственных корреляций компонент вектора

отсчета временного спектра требует с учетом симметрии приблизительно N^2 операций на каждый из 512 отсчетов спектра ($N=4096$ – число пространственных каналов). Для реализации этой операции в режиме реального времени понадобится примерно $2^{24} \times 2^9 \times 20 \times 10^{-8} = 1718$ процессора NM6403 и, соответственно, 172 процессора NM6404. Сужение частотного диапазона, снижение требований к частоте обновления оценки матриц корреляций и/или априорный учет малости радиуса пространственной корреляции могут снизить эту оценку в несколько десятков раз.

Собственно отбеливание входного сигнала выполняется путем решения систем линейных алгебраических уравнений с матрицами, равными матрицам пространственных корреляций, и правой частью, равной вектору пространственных отсчетов, для каждого отсчета временного спектра. В случае усреднения матриц корреляций по числу реализаций большому числу приемных каналов можно предполагать матрицы пространственных корреляций имеющими полный ранг и применять модификации метода Холецкого [4]. Число операций в подобных методах пропорционально $N^3/3$, что требует для их осуществления в режиме реального времени производительности примерно $1/3 \times 2^{36} \times 2^9 \times 20$ Оп/сек или 351844 процессоров NM6403 или 35185 процессоров NM6404. Однако, физический смысл позволяет предположить малую скорость изменения корреляционной матрицы и проводить ее разложение, например, только 1 раз в секунду, что позволит уменьшить число требуемых процессоров до 350 или 35. Априорный учет малости радиуса пространственной корреляции снова может существенно улучшить эту оценку. При реализации метода Холецкого на многих процессорах следует учесть существование его модификаций, ориентированных на многопроцессорные системы [5].

Если число реализаций M , по которым проводится усреднение, меньше числа приемных каналов N , то для отбеливания можно применить QR разложения неполного ранга [4] матрицы векторов, по которым проводится усреднение. Оценка числа требуемых для этого операций

имеет вид $M^2 \times (N-M/3)$ на каждый отсчет временного спектра, так что если производить усреднение по 1024, а не по 4096 реализациям, то требования к производительности соответствующего вычислителя снижаются в 17.5 раз.

Формирование статистик обнаружения для P элементов пространственного разрешения путем скалярного умножения векторов передаточных функций на отбеленный вектор сигнала и суммирование норм результатов по всем частотам требует $P \times N$ операций на каждый отсчет спектра и при $P=N$ требует для осуществления в реальном масштабе времени 1718 процессоров NM6403. Снова сужение частотного диапазона могут снизить эту оценку в несколько десятков раз. Отметим также, что в случае представления передаточных функций в лучевом приближении в виде набора задержек экономию объема вычислений до $N/\log_2 N = 341$ раз может принести применение быстрых методов умножения на матрицы из экспонент [6].

Вывод. Современные алгоритмы обработки вполне могут быть реализованы вычислительной системой на основе нескольких тысяч/сотен процессоров NM6403/ NM6404. В то же время для реализации полностью согласованной первичной обработки в тракте пассивного акустического наблюдения и других приемных трактов с подобной обработкой со значительно меньшим числом приемников (или узкой полосой, как для активной покачки или обнаружения узкополосных сигналов), например, $N = 128$ оказывается достаточным при прочих равных условиях порядка десяти процессоров NM6403.

1. www.module.ru

2. Компьютерное обозрение, №10, 1999.

3. Малышкин Г.С., Холостов М. В. Оптимальное обнаружение пространственно-временных гидроакустических сигналов. – Ленинград: ИПК МСП, 1990.

-
4. Голуб Дж., Ван Лоун Ч., Матричные вычисления, Пер. с англ. – М.: Мир, 1999.
 5. Валях Е. Последовательно-параллельные вычисления. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
 6. Нечепуренко Ю.М. Быстрые алгоритмы умножения на вектор матрицы Вандермонда. Архитектура ЭВМ и численные методы. – М.: ОВМ АН СССР, 1985.