УДК 621.39

СЛЮСАР В.И.

МОДУЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ В СХЕМОТЕХНИКЕ ЦИФРОВОГО ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЯ

Приведен обзор вариантов схемотехнических решений для проектирования радиотехнических систем на основе использования модульных технологий цифрового формирования характеристик направленности антенных решеток.

Реализация цифрового диаграммообразования (ЦДО) как базовой технологии радиолокации [1], связи [2] и других информационных приложений возможна на основе использования унифицированных модулей цифровой обработки сигналов (ЦОС). Поскольку многовариантность подходов ограничена номенклатурой устройств, доступных на мировом рынке, в настоящей статье проведен анализ такой продукции и рассмотрены соответствующие варианты возможных схемных решений, реализующих алгоритмы ЦДО.

По сложившемуся разграничению сфер интересов, ведущие мировые производители АЦП, ЦАП и сигнальных процессоров (Texas Instruments, Analog Devices и т. д.), как известно, не располагают требуемой номенклатурой готовых модулей ЦОС. Их изготовлением занимаются другие компании, что приводит к многократному удорожанию ЦОС-систем по сравнению со стоимостью исходных комплектующих, а нередко и к отставанию в сроках освоения новейших достижений в развитии элементной базы. Об этом позволяет судить размещенная в Интернет информация о базовых модулях ЦОС производства Traquair Data Systems, Pentec (США), Sundance Multiprocessor Technology (Великобритания), Interactive Circuits and Systems (Канада), АО «Инструментальные системы» (Москва) и других фирм, специализирующихся на выпуске ЦОС-продукции.

Однако, несмотря на это обстоятельство, тем, кто впервые приступает к освоению технологии ЦДО, заведомо дешевле воспользоваться готовыми схемотехническими решениями, отложив самостоятельную разработку и производство необходимых специализированных модулей, например, на этап подготовки серийного выпуска продукции. Поэтому предлагаемый обзор может служить ориентиром при выборе схемной реализации ЦДО в зависимости от специфики решаемой задачи.

Для систематизированного изложения последующего материала все многообразие модулей ЦОС, пригодных для систем ЦДО, можно условно классифицировать по ряду признаков. Основными среди них являются тип используемого интерфейса (последовательный либо параллельный (PCI, CompactCPI, VME и др.)); степень воздействия модуля на цифровые данные (без спецвычислителя, со спецвычислителем на базе DSP, ASIC или программируемых матриц логических элементов (ПМЛЭ)); тип используемого преобразователя (АЦП, ЦАП либо их комбинация); количество каналов обработки (одноканальные, многоканальные); конструктивное исполнение (моноблочный, мезонинно-модульный, многомодульный).

Выбор интерфейса — ключевое звено в схемотехнической стратегии разработки любой системы ЦДО. Только при наличии высокопроизводительных цифровых магистралей возможно обеспечить трансляцию массивов напряжений приемных каналов на входы диаграммоформирующих модулей для корректного функционирования процедур ЦДО. Однако, неоправданное завышение требований к интерфейсам обмена может существенно повлиять на стоимость реализации технического проекта.

В условиях постоянного совершенствования информационных технологий задача выбора предпочтительного протокола обмена является весьма сложной и неоднозначной, однако сложившийся на сегодня расклад технологических достижений позволяет достаточно аргументировано высказаться в пользу конкретных вариантов реализации ЦДО. Среди высокоскоростных интерфейсов межмодульного обмена, используемых в промышленном оборудовании, наибольшее распространение получили параллельные протоколы, представленные в табл. 1. До недавнего времени лидерство в промышленном секторе принадлежало семейству интерфейсов VME (VERSAmodule Eurocard), берущему начало от электрической спецификации VERSAbus, разработанной в 1979 г. фирмой Motorola и принятой в качестве коммерческого стандарта для плат формата Eurocard в 1981 г. Наиболее скоростной из них (VME320) является относительно новой разработкой и пока не стал доступным на международном рынке модулей ЦОС, возможно по причине его дороговизны — в отличие от прежде «бесплатных» спецификаций VME, в основу VME320 положена запатентованная Arizona Digital Inc. (США) технология «звездной» разводки проводников к контактам Backplane.

Широкому распространению интерфейса VME64 способствовала возможность компенсации его низкой пропускной способности с помощью дополнительного параллельного протокола FPDP (Front Panel Data Port, стандарт VITA 17-199x), применяемого в виде навесных 80-жильных шлейфов в VME-модулях.

С развитием индустрии персональных компьютеров в промышленных приложениях все чаще стали применяться интерфейсные стандарты, присущие компьютерам семейства PC. Естественно, схемотехника ISA- и EISA-подходов не могла конкурировать с более производительными VME-решениями, однако с появлением протокола PCI (Peripheral Component Interconnect) ситуация изменилась. Сегодня можно утверждать, что с точки зрения удобства совместимости с программным обеспечением компьютеров линии Intel PC, на

фоне технологической сложности и дороговизны использования тандемов VME + FPDP нередко предпочтительным выбором являются решения в классе интерфейсов PCI и их разновидности CompactPCI, разработанной в 1994 г. специалистами PICMG (PCI Industrial Computer Manufacturer's Group) под форм-фактор плат Eurocard. Наряду с реализацией стандартного интерфейса PCI у шины CompactPCI имеется ряд специфичных особенностей, которые можно с успехом использовать для нужд независимого от PCI-интерфейса управления.

Таблица 1

Шина	Тактовая частота шины (МГц)	Макс. пропускная способность (Мбайт/с)	Разрядность адресной шины	Разрядность шины данных
VME64 (6U), спец. ANSI/VITA 1-1994	10	80	64	64
VME64x (6U), спец. VITA 1.1-1997	20*	160	64	64
VME320	40*	320	32	64
FPDP	40	160	32	32
ISA	8,33	5	24	16
EISA	8,33	33	32	32
PCI v2.1	33	133	32	32
PCI v2.2	66	533	32	64
CompactPCI	33	133	32	32
CompactPCI Ver.2.0 rev.3.0	33	266	32	64

* — срабатывание по фронту и срезу тактовых импульсов.

С учетом сказанного дальнейший обзор модульных решений будет касаться исключительно ниши PCI-совместимых технологий. При этом CompactPCI-подход следует рассматривать как ключевой для отлаженных систем Hi–Fi-класса, тогда как PCI-концепцию целесообразно ориентировать на опытные, демонстрационные версии оборудования, а также доминирование в серийной продукции, критичной не к промышленным условиям эксплуатации, а к значениям показателей «эффективность-стоимость».

Такому выбору способствует ценовой фактор (аналогичные модули CompactPCI обычно в 2—3 раза дороже PCI-альтернатив) и появление в последнее время большого ассортимента интерфейсных расширителей, допускающих установку до 18 и более PCI-устройств на одну несущую плату (Backplane) вместо 3—6 слотов в обычном компьютере. Следует также учесть, что интенсивная эволюция PCI-протокола уже привела к внедрению в промышленные модули стандарта PCI v.2.2, который при тактовой частоте 66 МГц и 64-разрядной шине данных позволяет получить теоретическую пропускную способность до 533 Мбайт/сек. При этом, благодаря запатентованным разработкам фирмы Arizona Digital Inc., существует реальная возможность увеличить количество слотов на соответствующей (66 МГц) PCI–Backplane до 21, не прибегая к помощи развязывающих мостов (PCI–to–PCI–bridges), и даже создать оптимизированные под 133 МГц 21-слотовые кросс-платы с пропускной способностью на шине PCI–X до 1.066 Гбайт/с. В этой связи переход к PCI-технологиям в их нынешнем варианте создает предпосылки для эффективного освоения высокоскоростных версий PCI в будущих проектах. Учитывая, что PCI-схемотехника без особых проблем масштабируется в CompactPCI-решения и наоборот, большинством производителей изготовление ЦОС-модулей может осуществляться под выбранный заказчиком протокол обмена. Поэтому далее для удобства изложения речь будет идти в основном о PCI-решениях, которые при необходимости можно рассматривать как прототип для CompactPCI-эквивалентов.

В случае обработки низкочастотных сигналов, когда допустимо иметь сравнительно медленный темп программного формирования цифровой характеристики направленности, совпадающий с периодом дискретизации АЦП (ЦАП), аппаратная часть системы цифрового синтеза луча сводится к использованию модулей ЦОС, не содержащих спецвычислителя и оборудованных интерфейсом какой-либо универсальной шины из числа указанных в табл. 1. Сравнительный анализ таких модулей приведен, например, в [3], их применение возможно в акустических и гидроакустических приложениях при узкополосных сигналах. Однако для высоких темпов работы АЦП, когда в цифровом виде дополнительно необходимо осуществить коррекцию характеристик каналов [4], а также фильтрацию и расквадратуривание принятых сигналов, возникает необходимость в предварительной обработке отсчетов цифровых данных. Ее реализация возможна только при использовании спецвычислителей, однако простейший вариант многомодульного конструктива, когда обмен между платами АЦП (ЦАП) и спецвычислителя, образующих многомодульный приемный канал, осуществляется через традиционный интерфейс (табл. 1), здесь не применим.

Несложные расчеты показывают, что для выполнения жестких требований по пропускной способности аппаратуры первичной обработки сигналов предпочтительнее отказаться от многомодульного построения приемных каналов и перейти к моноболочным либо мезонинно-модульным конструктивам (мезонином называют дочернюю плату, устанавливаемую на основной модуль-носитель параллельно его поверхности).

Это позволяет ограничить круг возможных аппаратных решений, исключив из рассмотрения модули высокоскоростных АЦП (ЦАП), оснащенные лишь интерфейсом PCI (CompactPCI), а также акселераторные платы спецвычислителей, не имеющие мезонинных разъемов для подключения субмодулей ввода-вывода данных. Поэтому дальнейший анализ можно осуществлять без учета продукции американских фирм Pentek, VMIC, Systran Corp., Catalina Research Inc., канадских Interactive Circuits and Systems, Gage Applied Sciences Inc., германской Keithley Instruments, и других, в каталогах которых применительно к PCI-стандартам фигурирует преимущественно такая продукция.

Отказ от передачи данных с выходов АЦП (ЦАП) на входы модулей последующей цифровой обработки через PCI-интерфейс обеспечивает выполнение жестких требований по пропускной способности аппаратуры первичной обработки данных при условии использования PCI-шины для выдачи результирующих комплексных напряжений приемных каналов на диаграммообразующую схему. Согласно предварительным расчетам, при 32-разрядном представлении напряжений квадратур сигналов PCI-протокол v.2.1 позволяет осуществить закачку массива комплексных напряжений из восьми модулей ЦОС в диаграммообразующую схему (с учетом задержек на мосту PCI-to-PCI) и выполнить обратное извлечение из нее напряжений синтезированных вторичных каналов в течение интервала времени более 3 мксек. При этом предполагается, что формирователь диаграммы направленности и узлы сбора напряжений синтезированных в результате ЦДО вторичных каналов расположены на той же плате Bakplane, что и составные модули «АЦП(ЦАП) + спецвычислитель» (рис. 1).

Ориентируясь на использование готовых модульных решений, дальнейший отбор элементной базы может быть осуществлен на основе анализа номенклатуры PCI-плат сигнальных процессоров с мезонинными интерфейсами для подключения субмодулей быстродействующих АЦП (ЦАП). К сожалению, разработки российского ЗАО «L-Кард» [3], украинских Holit Data Systems, Saturn Data International (Киев) и им подобных по номенклатуре предлагаемых модулей ЦОС не удовлетворяют требованиям специфики ЦДО, поскольку имеют недостаточные по быстродействию параметры преобразователей. К фирмам, чья продукция по своим параметрам подходит для проектирования систем с цифровым формированием луча, прежде всего следует отнести

Traquair Data Systems (США), Heron Enginering, Nallatech Ltd. и Sundance Multiprocessor Technology (Великобритания), московское АО «Инструментальные системы», воронежскую фирму Scan Engineering Telecom и ее днепропетровского партнера «Пульсар Лтд».

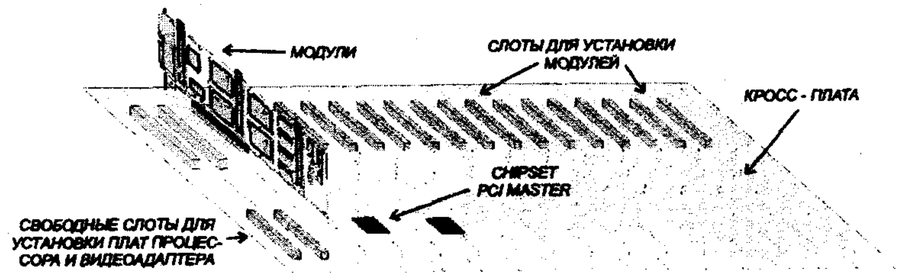

Рис. 1

Достаточно привлекательным в продукции большинства указанных фирм является наличие в ассортименте несущих плат с PCI-разъемом, на которые может устанавливаться до четырех мезонинов с сигнальным процессором или АЦП (ЦАП). При таком подходе достигается компактность многоканальных конструктивов, существенно снижается потребное количество PCI-гнезд на материнских платах HOST-процессоров, необходимое для осуществления многоканального сбора информации.

В качестве разъема для подключения мезонинов к указанным несущим PCI-платам наибольшее распространение получила устаревшая спецификация TIM-40 (1992 г.) фирмы Texas Instruments. Пока что таковая не имеет альтернатив в многомодульных кросс-платах от АО «Инструментальные системы» (Россия), тогда как Traquair Data Systems (США) и ее британский партнер Heron Enginering дополнительно внедрили новый интерфейс собственой разработки HEART, обеспечивающий темп межмодульного обмена до 400 МБайт/с. Речь идет о мезонинно-несущих модулях HEPC8 и HEPC9, представление о функциональной схеме которых позволяет получить рис. 2. Sundance Multiprocessor Technology (Великобритания) добилась такой же скорости межмодульного трафика (до 400 МБайт/с) в рамках оригинальной TIM-совместимой спецификации для несущей платы SMT350 (рис. 3). При этом максимальная скорость обмена по линии «модуль процессора C6x — шина PCI» достигает 120 МБайт/с, что почти полностью реализует потенциал протокола PCI v. 2.1 (табл. 1). Очевидно, что подход Sundance Multiprocessor Technology более удачен, поскольку является дальнейшим развитием традиционного стандарта и совместим с его менее скоростным прототипом.

Отличительной особенностью номенклатуры устройств, выпускаемых АО «Инструментальные системы», является наличие двухканальных мезони-

нов с высокоскоростными АЦП (ЦАП), стыкуемых по специальному ADM-интерфейсу с PCI-платой ADP6x01PCI (ADP620xPCI) сигнального процессора TMS320C6x. Пропускная способность ADM-шины обеспечивает передачу данных с выходов АЦП со скоростью до 200 МБайт/сек.

Следует отметить, что анализ характеристик продукции перечисленных фирм не позволяет выделить явного лидера и безоговорочно принять решение об окончательном варианте комплектации цифрового тракта обработки сигналов. Traquair Data Systems, имея наиболее продвинутый задел в освоении новейших сигнальных процессоров (HERON-модули с TMS320C6203, рассчитанным на тактовую частоту 300 МГц, выпускаются с 1999 г., в стадии освоения — модули под процессоры TMS320C64 с тактовой частотой более 1 ГГц), до недавнего времени обладала посредственными показателями в быстродействии плат АЦП (в 2-канальном режиме модули 12-разрядных АЦП HEGD9 имеют предельную частоту дискретизации 33,3 МГц) и лишь новые, совместные с Heron Enginering, разработки HERON-IO1 (IO2) на базе двух АЦП AD9432 как-то выравнивают ситуацию. В свою очередь, предлагая мезонины с достаточно скоростными АЦП (ЦАП), специалисты АО «Инструментальные системы» оказались пока не в состоянии освоить выпуск многомодульных несущих PCI-плат с требуемой пропускной способностью мезонинного интерфейса. В этом смысле Sundance Multiprocessor Technology занимает пока компромиссную середину, однако ее продукция, равно как и Traquair Data Systems, дороже аналогичных решений московского конкурента. Впрочем, не исключено, что в перспективе такой расклад вполне может измениться. В частности, в Sundance Multiprocessor Technology ведутся интенсивные работы по внедрению дешевой серии мезонинов сигнальных процессоров SMT600 с двух и даже трехкратным снижением стоимости по сравнению с аналогичными модулями нынешней спецификации SMT300, а также освоена плата четырехканального АЦП SMT354 с частотой дискретизации по каждому каналу до 105 МГц.

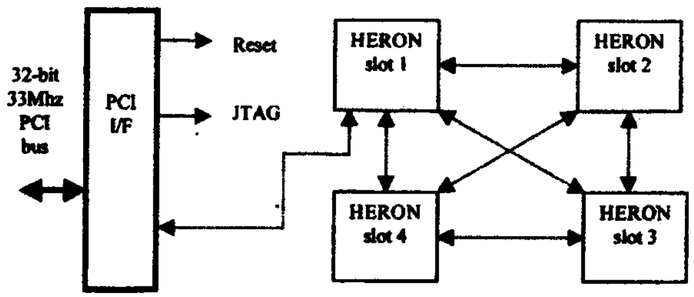

Рис. 2

Принимая во внимание изложенное, в условиях жестких финансовых ограничений на данном этапе можно рекомендовать продукцию АО «Инструментальные системы» в качестве приемлемого варианта решения задач ЦДО в классе модулей «АЦП (ЦАП) + DSP».

Альтернативный подход к построению систем ЦДО состоит в применении модулей ЦОС на базе ПМЛЭ, в частности фирмы Xilinx. FPGA-серия Virtex-E таких ПМЛЭ позволяет осуществить предварительную обработку отсчетов АЦП с частотой ввода данных до 300 МГц. При формате кодов АЦП 12—14 разрядов и частоте дискретизации до 400 МГц такой вариант реализации является серьезной альтернативой использованию сигнальных процессоров как с точки зрения стоимости образцов, так и рассеиваемой ими мощности. Это особенно важно при построении многоканальных систем с ЦДО. Использование FPGA, в отличие от DSP-схемотехники, позволяет жестко синхронизировать пошаговое выполнение алгоритмов ЦОС в многоканальных системах благодаря отказу от использования аппаратных прерываний. Наличие в ПМЛЭ до 50000 и более системных вентилей способствует также интеграции на один кристалл процедур цифровой коррекции характеристик приемных каналов, например типа [4].

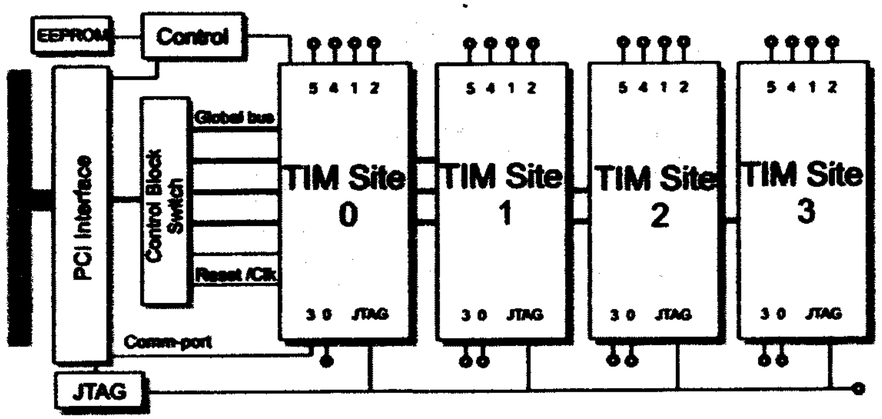

Рис. 3

Во многом по этим причинам FPGA-направление в обработке сигналов сегодня существенно потеснило рынок процессорных систем и заняло рекордные по достигнутым показателям позиции. Например, великобританская компания Nallatech Ltd. в августе 2001 г. разместила на своем Интернет-сайте информацию о создании CompactPCI-модуля Benadic в конструктиве 6U, содержащего 20 АЦП с тактовой частотой до 105 Мгц и разрядностью 14 бит (стоимость модуля около 35360$). Функциональная схема «рекордсмена» приведена на рис. 4. Данный модуль относится к классу монолитных FPGA-устройств и в случае оцифровки квадратурных составляющих аналоговых сигналов позволяет сформировать цифровой отклик 10-канальной ЦАР, взяв на себя функции цифрового формирования луча. Указанный модуль предназначен для установки в многослотовые шасси (Backplane) с CompactPCI-интерфейсом. Предельный вариант таких конструктивов рассчитан на 21-слотовую компо-