

# УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТЕХНИКА на пороге третьего тысячелетия

В. Слюсар

**Провожая уходящий век, сообщество ведущих мировых производителей УЗ-медицинского оборудования вступает в динамичный период кардинальной смены поколений диагностических систем. Казавшиеся фантастическими еще каких-то десять лет назад, новые технические решения де-факто стали общепринятыми стандартами средств визуализации. Применительно к УЗ-платформам речь прежде всего идет о широкомасштабном внедрении цифровой технологии формирования луча, используемой как при приеме, так и при излучении зондирующих сигналов. В сочетании с полноценной цифровой обработкой сигнала эта технология позволяет реализовывать новые подходы к формированию диаграммы направленности УЗ-датчиков. Что это за подходы и в чем их достоинства? Каково их практическое применение?**

Цифровое формирование диаграммы направленности излучателей в УЗ-платформах позволяет добиться высокой идентичности амплитудно-частотных характеристик приемных каналов, скорректировать их в соответствии с заданным эталоном и легко устранить неизбежные технологические погрешности, возникающие в процессе изготовления датчиков. Это обеспечивает высокую чувствительность диагностической системы и длительную стабильность параметров тракта обработки сигнала. Благодаря отсутствию присущих

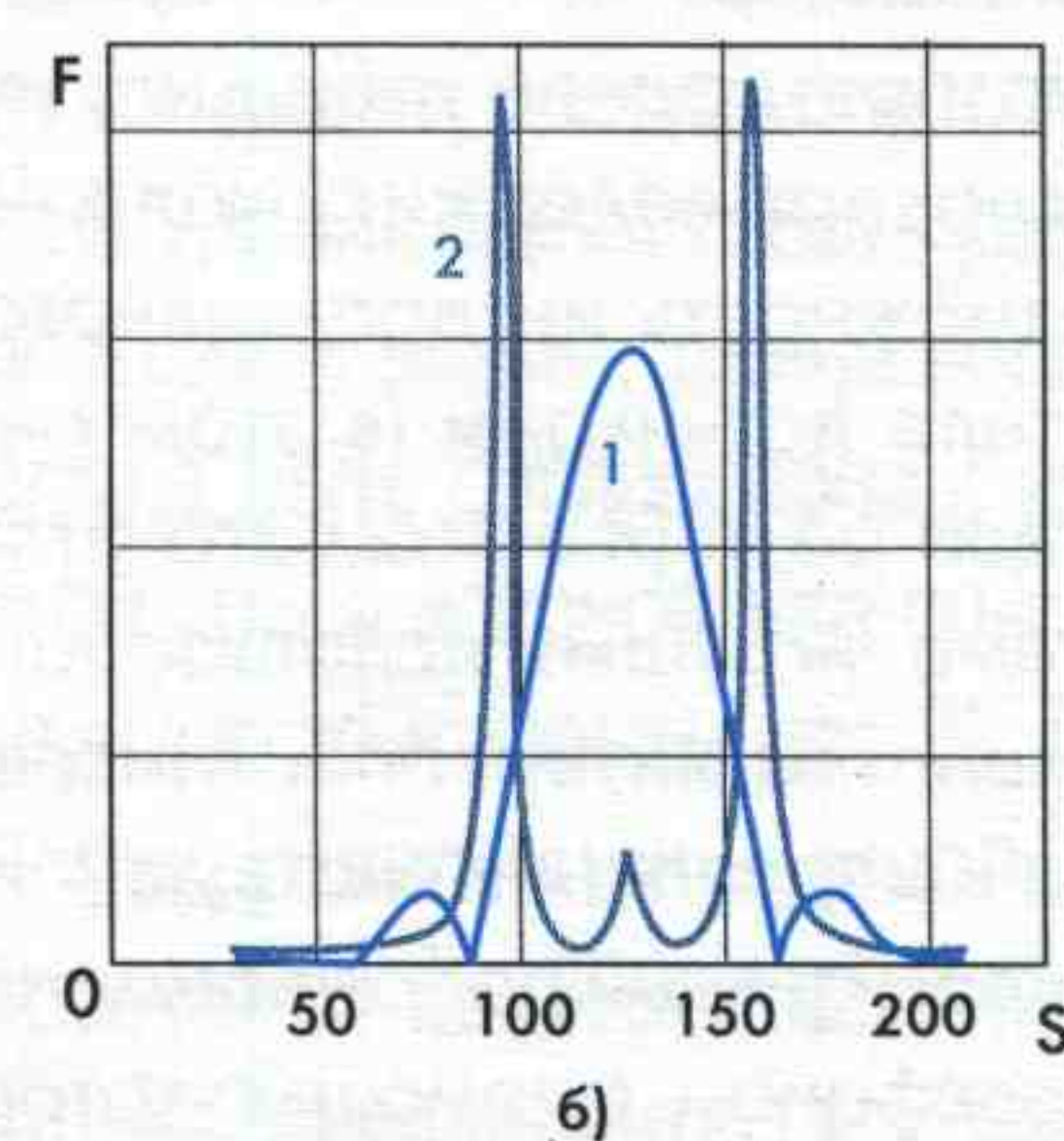
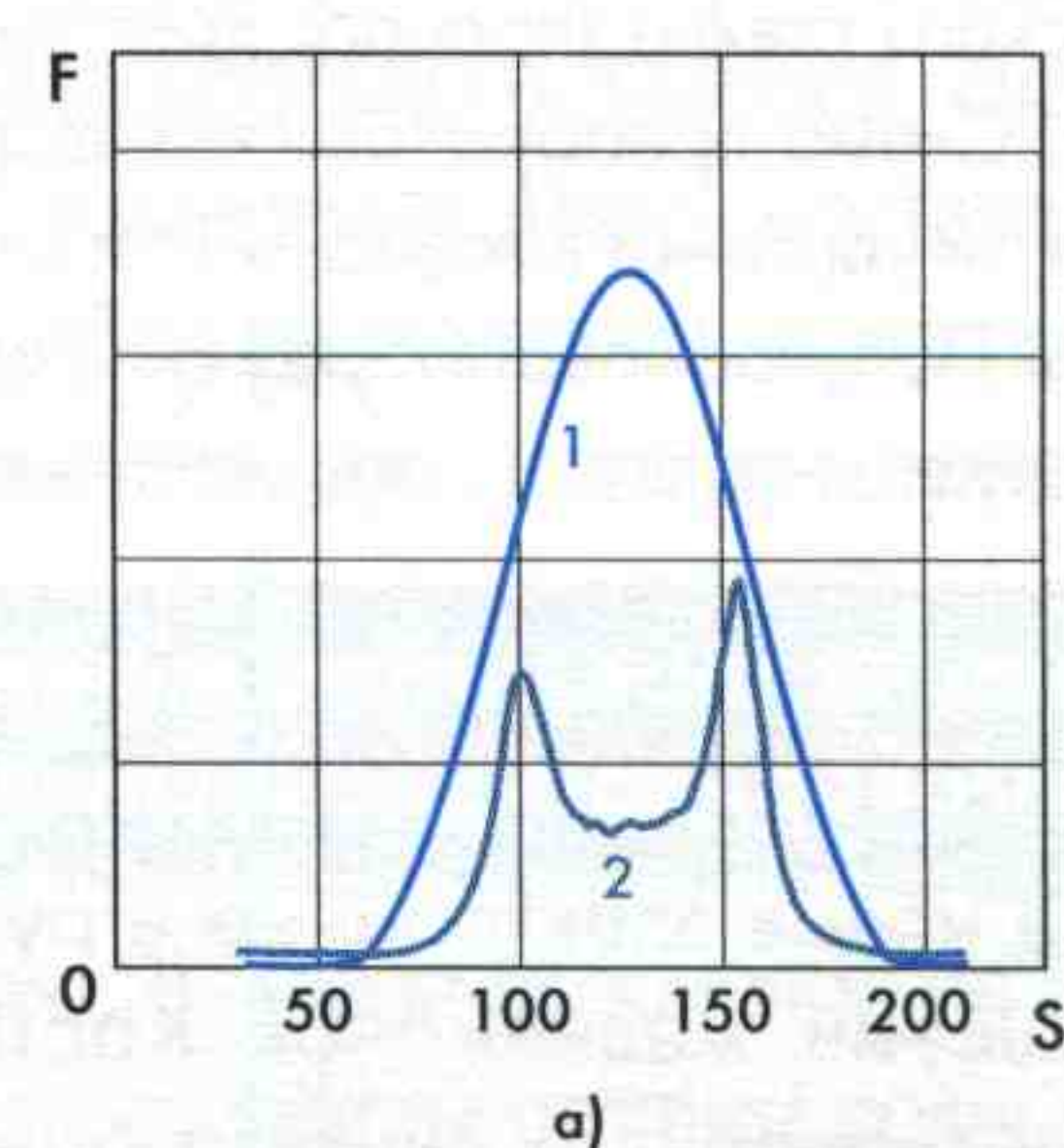
аналоговым цепям параметрических уходов и потерь отпадает необходимость в частой калибровке устройства. Как следствие, эксплуатационная надежность диагностических платформ возрастает. Опираясь на цифровое диаграммообразование, можно эффективно динамически фокусировать излучение датчика по глубине исследуемого объекта, меняя весовые коэффициенты при фазировании в зависимости от номера отсчета АЦП или порядкового номера группы. При этом не нужно, как это делалось раньше, отключать часть излу-

чателей, что приводило к потере энергии [1]. Появляется возможность чрезвычайно гибко управлять угловыми размерами, формой, направлением распространения, интенсивностью (в режиме зондирования) и разрешением (в режиме приема) УЗ-луча.

Реализация датчиков на базе цифровых решеток обеспечила одновременный многолучевой прием сигналов во всем рабочем секторе и тем самым позволила сократить время формирования УЗ-изображения. При этом сигнал передатчика может быть расфокусирован, "засвечивая" широкий телесный угол, а реализация сверхрелеево-разрешающей способности по направлениям прихода сигналов, их доплеровской частоте и времени задержки способствует достижению требуемой детализации изображения. Сегодня известен достаточно обширный арсенал методов обеспечения сверхрелеево-разрешения [2-4], позволяющих в зависимости от отношения сигнал/шум проводить отдельную селекцию до десяти "точечных" фантомов в пределах главного лепестка приемной диаграммы направленности УЗ-датчика. На рис. 1 представлены полученные автором результаты сверхрелеево-разрешения двух сигналов [4], соответствующие раз-

личным соотношениям начальных фаз радиоимпульсов.

В целом же благодаря высокому, недостижимому с помощью аналоговой техники динамическому диапазону цифровые методы формирования луча обеспечивают близкие к предельным значениям точность оценивания параметров сигналов, их осевое, поперечное и контрастное разрешение с улучшенной дифференциаци-



**Рис. 1. Результаты сверхрелеево-разрешения по времени задержки двух радиоимпульсов при:**

**а) разности их начальных фаз 90°, б) синфазной ситуации приема**

1 - традиционная обработка сигнала;  
2 - процедура сверхрелеево-разрешения



ей тканей по яркостному признаку. Кроме того, применение технологии цифрового диаграммообразования позволяет максимально унифицировать узлы и блоки аппаратуры, упростить процесс реконфигурации и модификации УЗ-систем, сводящийся зачастую лишь к

традиционных средствах цифровой обработки сигналов фазированных решеток излучателей. Основная особенность современных систем цифрового диаграммообразования – применение АЦП в каждом приемном канале с оцифровкой сигнала, как правило, на несущей

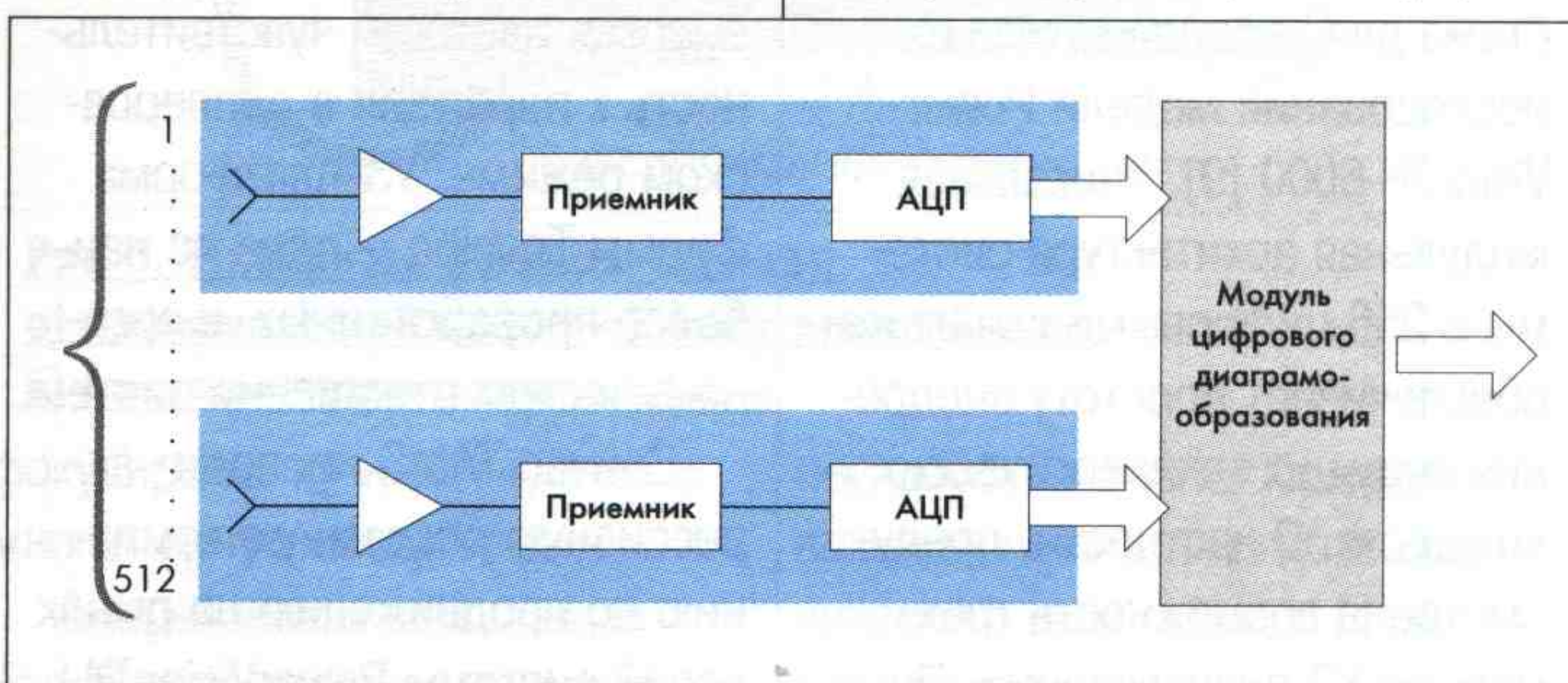


Рис. 2. Блок-схема системы цифрового диаграммообразования

замене программного обеспечения, а также адекватно цифровыми методами моделировать процессы, протекающие в тканях организма при прохождении УЗ-сигнала. И наконец, благодаря запоминанию и хранению практически в течение неограниченного времени больших информационных массивов, возможна их многократная модификация в процессе визуализации с помощью разнообразных программных фильтров, улучшающих как восприятие УЗ-изображения, так и детализацию тонких анатомических структур.

Следует отметить, что техника цифрового диаграммообразования по сути отличается от методов, используемых в

частоте (рис.2). При этом исключаются операции преобразования частоты, детектирования сигналов с выделением огибающей и, тем самым, уменьшаются энергетические потери, повышается чувствительность приемной системы и упрощается конструкция установки. Тактовые импульсы разводятся от генератора так, чтобы АЦП приемных каналов срабатывали одновременно. Затем данные, описывающие в виде отсчетов АЦП или их частичных сумм мгновенное распределение УЗ-поля на раскрыве датчика, сбрасываются в буферное ЗУ. Дальнейшее формирование диаграммы направленности приемного луча осуществляется программным способом с

### Представляем автора статьи

**Слюсар Вадим Иванович.** Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Начальник научно-исследовательского отдела Центрального научно-исследовательского института вооружения и военной техники Вооруженных сил Украины. Область научных интересов – цифровая обработка сигналов, цифровые антенные решетки в радиолокации, связи, гидроакустике и ультразвуковой технике.  
Контактный телефон (044) 570-5860. E-mail: swadin@777.com.ua

помощью процессоров обработки сигнала (DSP), выполняющих синфазное суммирование значений напряжений всех сигналов для заданных угловых направлений. При цифровом формировании зондирующего луча – наоборот, синтезированные с помощью процессора сигнала цифровые значения напряжений зондирующего импульса поступают на ЦАП, с выхода которых снимаются усиленные и отфильтрованные аналоговые сигналы. Эти сигналы поступают на соответствующие УЗ-излучатели. Такой принцип цифрового диаграммообразования – достаточно общий. В конкретных устройствах он может быть изменен в соответствии с возможностями элементной базы, а также опытом и теоретической подготовкой разработчиков.

Среди производителей, успешно решающих проблемы цифрового диаграммообразования в современных УЗ-системах, прежде всего нужно отметить фирму Analog Devices – одного из крупнейших поставщиков сигнальных процессоров, АЦП и ЦАП. Пакет УЗ-сигналов

в типичной УЗ-платформе фирмы генерирует электромеханический преобразователь передающей схемы, контактирующей с телом пациента (рис.3) [5]. Частота несущей в зависимости от модели датчика равна 1–13 МГц. В каждом приемном канале системы предусмотрен усилитель с цифровой временной регулировкой усиления (TGC) типа AD600/602/603, компенсирующий потери энергии эхосигналов, приходящих с глубины тела. В своих системах фирма чаще всего использует десятиразрядные АЦП типа AD9040A с частотой дискретизации 40 МГц. Сигналы, снимаемые с выхода АЦП, суммируются и обрабатываются сигнальным процессором (как правило, схемы типа ADSP-2181, ADSP-2171 или ADSP-21062). В систему могут также входить доплеровский канал для измерения скорости кровотока и канал визуализации УЗ-изображения. Таким образом, в системах Analog Devices новейшие технологии реализуются на достаточно распространенной и отнюдь не экзотической элементной базе. Разработка 12-разрядных

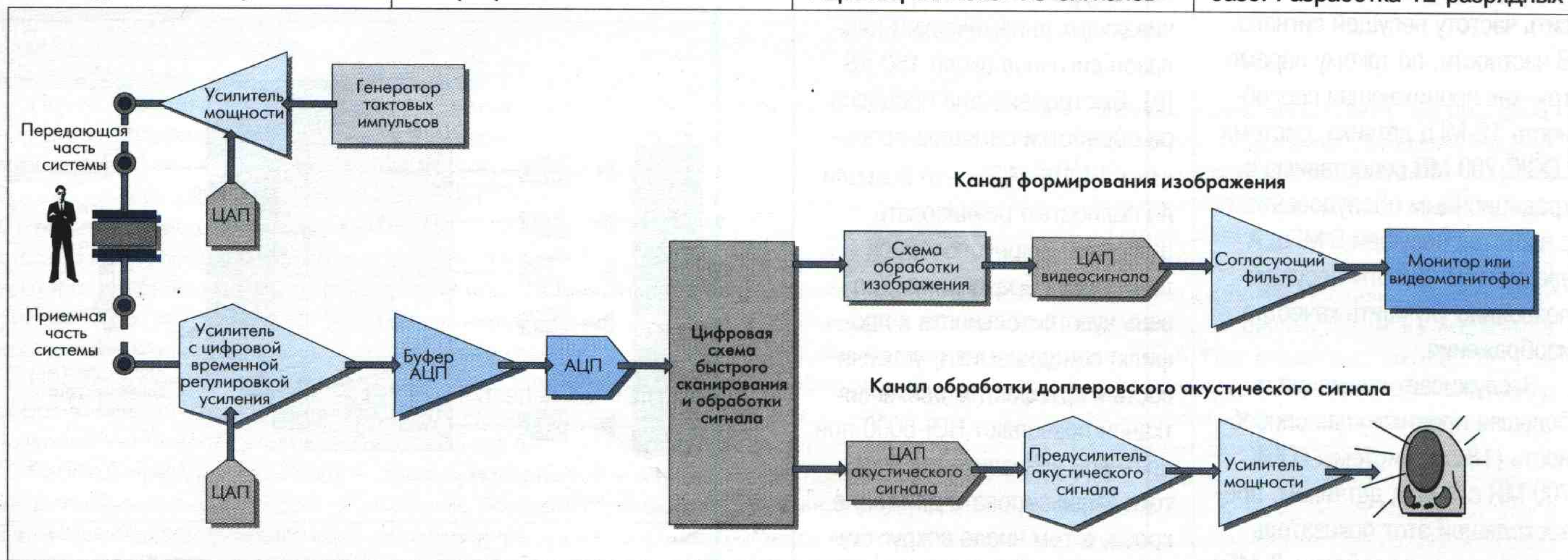


Рис. 3. Канал обработки сигналов в типичной цифровой диаграммообразующей системе фирмы Analog Devices (максимальное число каналов – 256)



АЦП с максимальной частотой дискретизации 105 МГц (AD 9432) и 250-МГц сигнальных процессоров типа TigerSHARC служит предпосылкой для дальнейшего упрочнения позиций фирмы на рынке перспективного УЗ-оборудования.

Пример приборов, удачно сочетающих максимальный набор технологических новаций, – семейство диагностического оборудования фирмы General Electric, в которое входят цифровые платформы LOGIC 400 MD, LOGIC 500 MD LOGIC 700 MR [6]. Эти устройства, несколько отличаясь друг от друга характеристиками и назначением, имеют одну и ту же фундаментальную архитектуру: цифровой формирователь луча с линией задержки цифровых сигналов и устройством их суммирования, а также схема цифровой обработки акустических сигналов. Систему LOGIC 700 MR, выполненную на базе решетки с 1024x4 излучателями, с полным правом можно считать лидером на рынке. Датчики системы изготовлены по перспективной технологии активных матричных кристаллов, что позволяет эффективно динамически фокусировать луч в двух плоскостях. За счет применения новых материалов и методов сборки сканеров фирме удалось повысить их чувствительность, расширить линейный динамический диапазон акустических преобразователей, повысить частоту несущей сигнала. В частности, по такому параметру, как проникающая способность 12-МГц датчика, система LOGIC 700 MR сопоставима с традиционным оборудованием с частотой несущей 5 МГц. А увеличение частоты несущей позволило улучшить качество изображения.

Заслуживает внимания и большая проникающая способность (18 см) системы LOGIC 700 MR с 7-МГц датчиком, превосходящей этот показатель для обычных устройств с 3-МГц датчиком. При частоте дискре-

тизации  $f_d = 40$  МГц разрешающая способность системы равна 70 мкм. В ближайшие планы фирмы входит переход к излучателю с частотой несущей 20 МГц. Появление такой системы, по-видимому, будет хорошо встречено УЗ-диагностами, что позволит General Electric еще больше оторваться от конкурентов. Остается надеяться, что это не приведет к пропорциональному повышению стоимости оборудования (до сих пор цена на системы фирмы была далеко не средней: установка LOGIC 700 MR стоит 300 тыс. долл.). Впрочем, учитывая постоянное снижение стоимости комплектующих цифровых схем и появление большого числа конкурентов, можно предположить, что разброс цен на цифровое УЗ-оборудование будет постепенно нивелироваться, а абсолютная их величина для быстро устаревающих образцов – падать.

Достаточно большой опыт разработки диагностического оборудования с цифровым диаграммообразованием имеет также компания ATL Ultrasound (США) [7], выпускающая приборы с высокой четкостью изображения семейства HDI (High Definition Image). К ним относятся HDI-1000, HDI-3000 (стоимость минимального комплекта 99 тыс. долл.) и новая система HDI-5000. В последней предусмотрено 512 широкополосных цифровых каналов, обеспечивающих динамический диапазон сигналов около 150 дБ [8]. Быстродействие процессора обработки сигналов превышает  $14 \cdot 10^3$  MIPS, что позволило полностью реализовать цифровое широкополосное диаграммообразование. Уровень чувствительности к профилю гемодинамики, устойчивость к артефактам движения тканей позволяют HDI-5000 при цветовой визуализации кровотока зафиксировать движение крови, в том числе вокруг сгустка или через него даже в самой маленькой вене.

К числу традиционных поставщиков УЗ-платформ с цифровым диаграммообразованием луча в середине 1998 года присоединилась и компания Toshiba. На ее американском филиале – Toshiba America Medical Systems (TAMS) создана усовершенствованная УЗ-система для кардиологических исследований модели PowerVision™ 6000 [9]. Уникальная модульная архитектура системы с 256 цифровыми каналами обеспечивает простоту внедрения будущих технологических новшеств. В частности, предусмотрена возможность трехмерной УЗ-визуализации. Поскольку цифровое формирование луча с дискретизацией аналоговых сигналов осуществляется на более ранней стадии, чем в традиционных УЗ-устройствах, в системе PowerVision™ 6000 достигнуто предельно возможное отношение сигнал/шум при почти 10-кратном улучшении точности визуализации. Пространственное разрешение системы – примерно 500 мкм по всей глубине зондирования.

Среди оригинальных решений, заложенных в PowerVision™ 6000, следует отметить одновременное формирование четырех УЗ-лучей при приеме, что позволяет увеличить скорость обновления изображения и плотность линий в два раза, а также ослабить влияние артефактов. Другая особенность си-

стемы – наличие так называемого “цифрового оптимизатора изображения” (DIO), автоматически нейтрализующего программным способом изменение интенсивности эхосигналов. При этом визуализация эхосигналов оптимизирована по всей глубине и сохранена высокая цветовая чувствительность к перфузии в доплеровском режиме. УЗ-платформа фирмы Toshiba – одна из наиболее проработанных в эргономическом отношении систем.

Сейчас TAMS проводит агрессивную рекламную кампанию по продвижению на рынок новой системы PowerVision™ 7000 с 512 приемными каналами. При взвешенной ценовой политике ее появление может составить серьезную конкуренцию лидирующим пока в этом классе системам General Electric и ATL Ultrasound.

Усовершенствованная система обработки доплеровского сигнала реализована в новом УЗ-оборудовании модели EUB-8000 компании Hitachi, которое можно рассматривать как гибкий программируемый УЗ-компьютер (рис. 4) [10]. Сигналы 128-элементного датчика одновременно оцифровываются 128 АЦП, по выходам которых формируются четверки пространственных каналов. С их помощью осуществляется прецизионная селекция каналов кровотока и визуализация эхограмм. Система обеспечивает динамическую

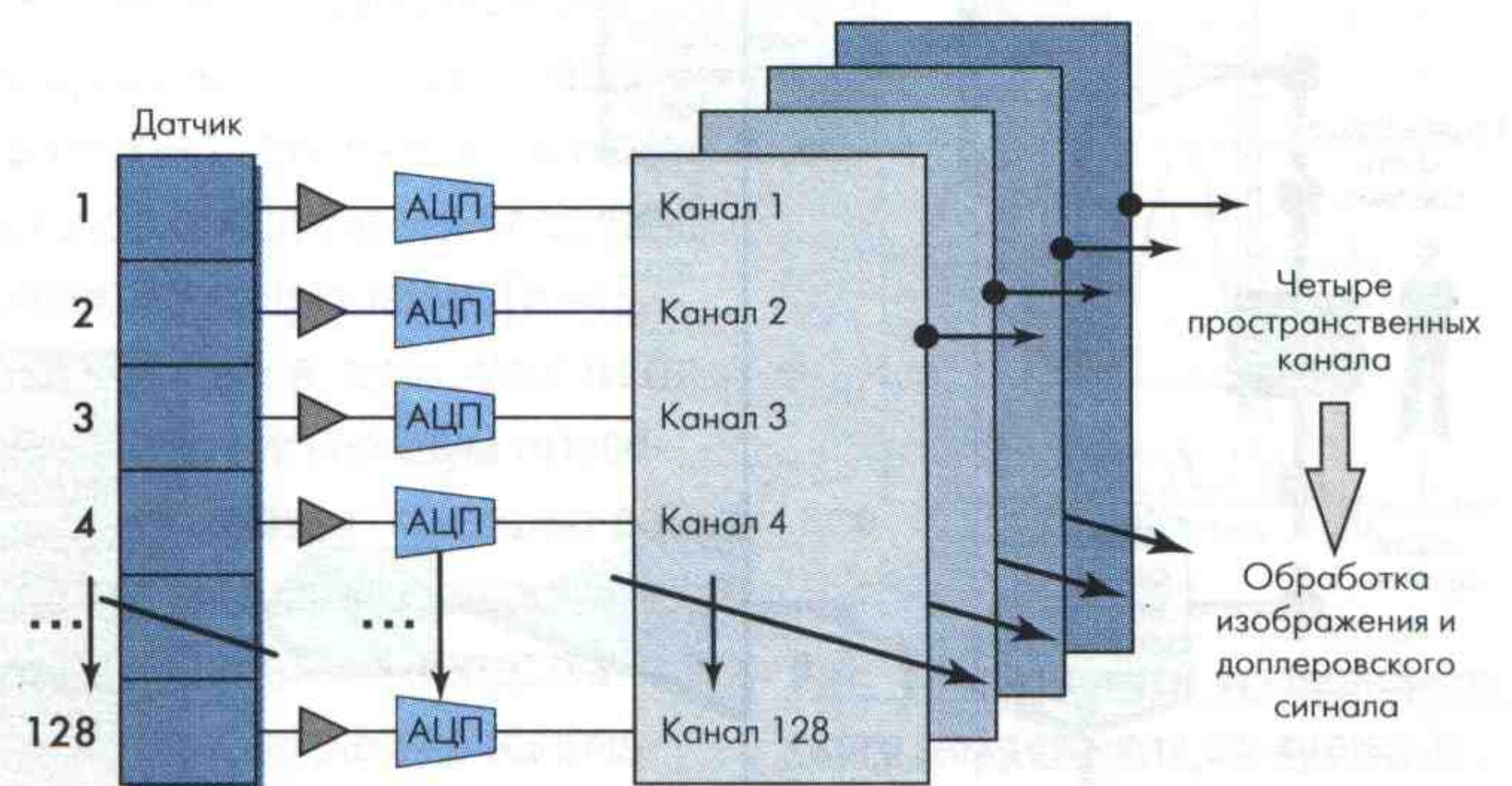
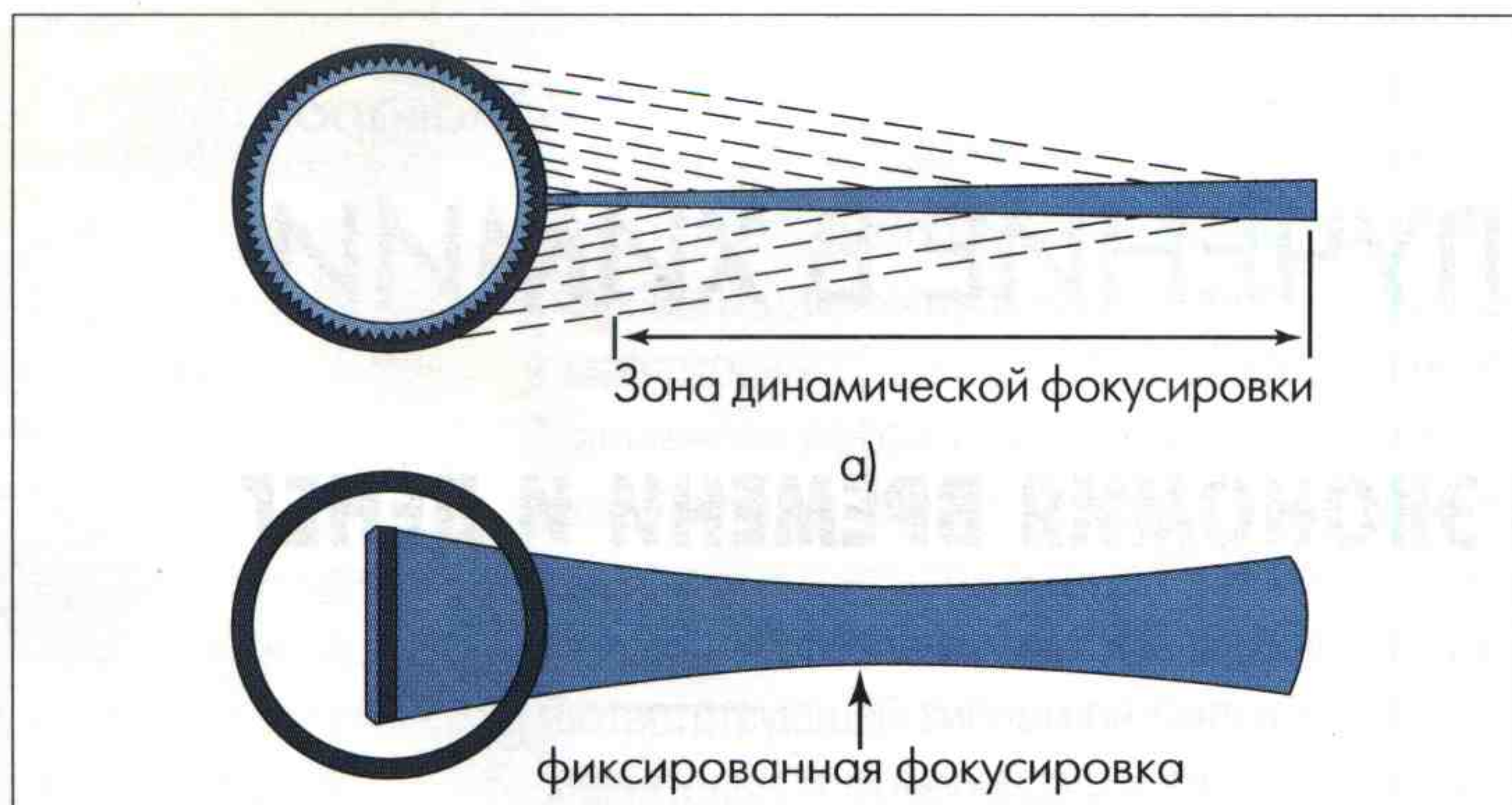


Рис.4. Система цифрового формирования луча модели EUB-8000 фирмы Hitachi





**Рис. 5. Угловое разрешение системы:**  
**а) с динамической цифровой фокусировкой луча,**  
**б) с механическим сканированием**

фокусировку луча по глубине и многомерную аподизацию.

Американская корпорация EndoSonics предлагает уникальное устройство внутрисосудистого УЗ-зондирования типа ORACLE® с 64-элементной кольцевой цифровой решеткой излучателей Visions® Five-64 [11]. EndoSonics удалось разработать самый миниатюрный в мире УЗ-датчик. Центральная частота датчика – 20 МГц, диапазон – 15 – 25 МГц. В устройстве в отличие от зонда с механическим сканированием отсутствует вал привода. Чрезвычайно гибкий катетер легко попадает в узкие извилистые коронарные артерии. По качеству изображения зонд намного превосходит устройства с механическим сканированием луча. Его применение исключает риск появления артериальных судорог вследствие вращательной вибрации зонда и неоднород-

ную деформацию изображения, возникающую при изгибах механического вала привода (в мягких извилистых сосудах искажение изображения может привести к 20%-ной погрешности измерения) [12]. В отличие от механических систем с датчиками с фиксированным апертурным фокусом, технология цифровой динамической фокусировки в процессе диаграммообразования позволяет оперативно регулировать угловое разрешение, оптимизируя его для каждой клинической ситуации (рис. 5).

Среди новейших УЗ-платформ следует отметить трехмерный сканер модели VOLUSON 530D (SA-530D) [13, 14] южнокорейской фирмы Medison, предназначенный для получения объемного изображения исследуемого объекта. Сканер выполняет полностью цифровое диаграммообразование с аподизацией УЗ-луча при прие-

ме и передаче. Частота дискретизации в каждом из 128 приемных каналов – 27,5 МГц. Специальная 128-разрядная шина с быстродействием 160 Мбит/с поддерживает непрерывную динамическую фокусировку луча. Отличительная особенность системы – возможность одновременного подключения до четырех зондов. Это позволяет использовать различные методы формирования трехмерного изображения. Датчики представляют собой линейные, искривленные или кольцевидные решетки излучателей.

Повышение частоты дискретизации АЦП и сокращение длительности зондирующего импульса в УЗ-системах неизбежно приведет к росту разрешающей способности по глубине зондирования. При переходе к  $f_d$  (1 ГГц (соответствующие восьмиразрядные АЦП уже имеются [15, 16]), а также с увеличением частоты несущей и производительности процессоров, очевидно, удастся получить разрешающую способность, равную 7-10 мкм и менее, что уже соответствует клеточному уровню. Это открывает перспективу реализации УЗ-микроскопа, не вызывающего разрушения исследуемых клеток и не требующего препарации живых объектов. Применение подобных микроскопов для наблюдения за биологическими куль-

турами и штаммами микроорганизмов уже в ближайшем десятилетии может стать свершившимся фактом, тогда как возможность исследования крупных организмов с их помощью пока представляется довольно фантастичной из-за достаточно больших энергетических потерь.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Осипов Л. В. Физика и техника ультразвуковых диагностических систем. Ч. I - VI. – Медицинская визуализация, 1997. N 1, с. 6 - 14; N 2, с. 18 - 37; N 3, с. 38 - 46; N 4, с. 42 - 53; N 5, с. 28 - 33; 1998, N 1, с. 28 - 33; N 2, с. 41 - 55.
- www.atnf.csiro.au/1kT/WS/wsggray/
- Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
- Слюсар В. И. Автокорреляционные методы формирования скользящих окон в задачах импульсной дальнометрии. – Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника, 1998, N 9, с. 61 - 68.
- www.analog.com/products/signal\_chains/ultra\_di/ultra\_di.html
- www.ge.com/medical/ultrasound/
- www.atl.com/
- www.atl.com/r1715gi-2.htm
- www.toshiba.com
- www.ecoscan.com/systems/EUB8000.htm
- www.endosonic.com
- Bruce J. Kimura, MD et al.: Can Intravascular Ultrasound Yield Accurate Measures of Vascular Anatomy? Documentation of the Critical Importance of Uniform Rotational Velocity. – Abstract presented at the American College of Cardiology. – Scientific Sessions, March 13-17, 1994
- www.medison.co.kr/Product/v5-30d.htm
- www.3dsono.org/3dsono/voluson.htm
- www.spt.com/datasheets/datasht1.html
- www.maxim-ic.com/

## ИСКУССТВЕННОЕ КОЛЕНО

Совместная разработка американской и российской ядерных лабораторий

По кооперативному соглашению на проведение НИОКР (CRADA) Министерство энергетики США планирует ассигновать 1,4 млн. долл. на проект создания перспективного электронного коленного протеза. Протез будет разработан совместными усилиями специалистов двух лабораторий ядерного вооружения, долгое время находившихся в разных лагерях, – Сандийской национальной лабораторией США и российским предприятием «Челябинск-70» в Снежинске. В ходе реализации проекта должны быть созданы муфты, способные реагировать на опухание и сокращение ампутированной конечности в течение дня, средства, предотвращающие падение, если человек споткнется, а также система микропроцессорного управления, обеспечивающая естественную походку. Российскими учеными будет создана титановая обшивка протеза, сандийскими – рабочие детали и электронная система управления искусственного колена. Требования к протезу вырабатывает фирма Ohio Willow Wood, которая проведет и окончательные лабораторные и клинические испытания изделия. Один из вариантов искусственного колена высотой примерно 11 см весит около 600 г. Его размер в верхнем основании 7,5х6,3 см, в нижнем – 5х5 см.

Проект коленного протеза – второй этап совместной работы двух лабораторий. На первом был создан протез ноги, экспериментальные образцы которого переданы лицам с ампутированной ногой, пожелавшими их испытать. По отзыву российского гражданина, искусственная нога позволяет ему ходить целый день, не испытывая дискомфорта, тогда как раньше он мог носить протез не более двух-трех часов.

Работа, предусматривающая анализ материалов и механических напряжений, механические и надежность испытания, создание микропроцессорных средств управления, хорошо вписывается в научные интересы обеих лабораторий. К тому же отмечается, что в Снежинске сформировался крупнейший в мире исследовательский центр по созданию протезов нижних конечностей. Поскольку средства протезирования в основном выпускают малые предприятия, не имеющие достаточных средств на проведение испытаний, и такой проект окажет им существенную помощь.

www.sandia.gov/media/NewsRel/NR1999/knee.htm