

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ — ИНФОРМАТИКА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Сегодня нет более актуальной и созидательной задачи, чем создание и развитие новых информационных технологий, обеспечивающих многократное ускорение процесса ИНФОРМАТИЗАЦИИ общества. Наиболее важной научно-технической проблемой в этой области является реализация систем приема, обработки и передачи сверхбольших потоков информации в реальном масштабе времени. Цифровая обработка сигналов — ИНФОРМАТИКА реального времени — это краеугольный камень решения указанных задач на современном этапе.

Состояние и перспективы развития информационных технологий на дороге XXI века характеризуются становлением и широким практическим использованием техники цифровой обработки сигналов — одной из самых динамичных и быстро развивающихся технологий в мире телекоммуникаций и информатизации общества. Цифровая обработка сигналов (ЦОС) — это ИНФОРМАТИКА реального времени, призванная решать задачи приема, обработки, сокращения избыточности и передачи информации в реальном времени.

Методы и техника ЦОС вызывают повышенный интерес ученых и специалистов, работающих в различных областях, таких как связь и системы управления, радиотехника и электроника, акустика и сейсмология, радиовещание и телевидение, измерительная техника и приборостроение. Ежегодно во всем мире проводятся десятки международных научно-технических конференций и семинаров, посвященных решению актуальных проблем ЦОС. Издаются многочисленные книги и журналы, освещающие последние достижения в области теории и практики обработки цифровых сигналов. Постоянно растет число предприятий, организаций и научных Центров, использующих в своих разработках методы и технологии ЦОС.

В чем причина столь бурного «всепроникающего» развития и внедрения техники ЦОС? Что является предметной областью теории обработки цифровых сигналов как самостоятельного научного направления и какие проблемы она решает? В каком взаимоотношении находятся цифровая обработка сигналов, информатика и компьютерные технологии? Ответы на эти вопросы дает ретроспективный анализ состояния, эволюции и тенденций развития рассматриваемого научно-технического направления.

Эволюция теории и техники ЦОС: начало пути

Вся история развития теории и техники ЦОС, как и информатики в целом, напрямую связана с достижениями в области дискретной схемотехники и компьютерных технологий. Дискретизация непрерывной информации во времени и квантование по уровню являются основой ее эффективного кодирования, преобразования, передачи и архивации. Особое значение в замене проблем обработки непрерывной информации более простыми задачами преобразований ее дискретных значений сыграли работы выдающихся ученых в 30—50-х годах XX века [1—5]. С появлением в 40-х годах первых ЭВМ стало реальным возникновение нового фундаментального научного направления вычислительной математики, одним из разделов которой можно считать машинные алгоритмы цифровой обработки данных.



Зубарев Юрий Борисович,
*директор НИИР,
заслуженный деятель
науки РФ,
член-корр. РАН,
д.т.н., профессор.
Тел. (7-095) 261-3694
Факс (7-095) 261-0090
E-mail: niircom@ccs.ru*

Однако ограниченные вычислительные ресурсы используемых в те годы ЭВМ не позволяли проводить

обработку данных в реальном времени [6]. Речь могла идти лишь о моделировании реальных процессов.

Положение начало радикально изменяться с появлением в 60-х годах класса малых ЭВМ, ориентированных преимущественно на решение задач управления и обработки данных в реальном времени. Потенциальная возможность обработки, преобразования и передачи аналоговых по природе сигналов цифровыми методами с помощью малых ЭВМ привлекла внимание специалистов, работающих во многих областях, и прежде всего, в области связи, гидроакустики и обработки речевых сигналов. С этого времени формулируется круг проблем и задач теории ЦОС как самостоятельного научного направления, которому предстоит в дальнейшем свой многоэтапный путь становления и развития.

Этап 1. Цифровая фильтрация и спектральный анализ

На данном этапе развития (1965—1975 гг.) основной предметной областью теории ЦОС были цифровая фильтрация и спектральный анализ (рис. 1), причем оба направления рассматривались с общей позиции частотных представлений. Общей основой развивающихся направлений был синтез цифровых фильтров частотной селекции. Базовые положения теории ЦОС закладывались и апробировались фактически на теории дискретных систем и теории цепей с использованием известного к тому времени набора машинных алгоритмов и, прежде всего, алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ).

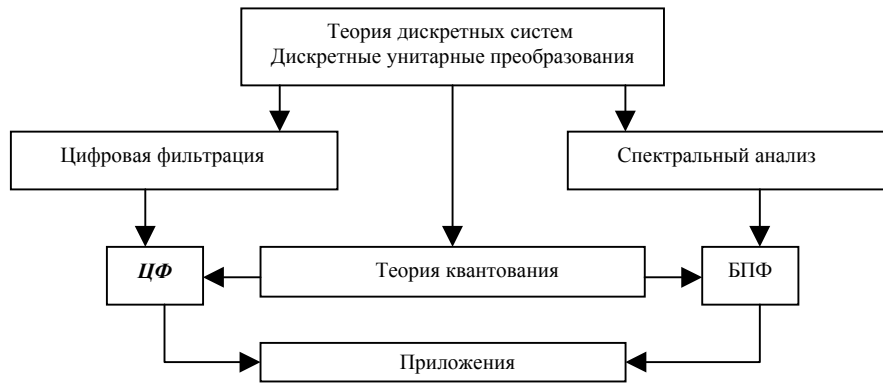


Рис. 1

К числу основных проблем, получивших эффективное решение в эти годы, относятся: машинная аппроксимация функции передачи цифровых фильтров (ЦФ) в классе фильтров с конечной (КИХ-фильтров) и бесконечной (БИХ-фильтров) импульсной характеристикой, разработка алгоритмов высокоскоростной свертки и малозумящих структур БИХ-фильтров, построение цифровых спектроанализаторов на основе использования полосовых фильтров и алгоритма БПФ.

Первый крупный вклад в теорию ЦОС внесли американские ученые Б. Голд и Ч. Рэйдер. Их монография [7] стала первой настольной книгой специалистов по ЦОС. Фундаментальной работой, подводящей итоги первого этапа становления теории ЦОС как нового научного направления, безусловно, является книга Л. Рабинера, Б. Голда [8]. Несколько позже появляется одно из первых учебное пособие по ЦОС авторов: А. Оппенгейма и Р. Шафера [9]. Большая часть других известных работ была, как правило, связана с цифровой фильтрацией [10—12] или с применением методов ЦОС в ряде приложений [13, 14]. Заметный вклад внесли отечественные ученые [15—22].

Возможности технической реализации цифровых фильтров и спектроанализаторов в этот период можно охарактеризовать как этап машинного моделирования в реальном времени с применением малых ЭВМ или специализированных устройств, построенных на ИС средней степени интеграции. Первые цифровые устройства с позиции сегодняшних представлений обладали низкой эффективностью и имели крайне ограниченное применение, связанное, как правило, с военными технологиями. Однако прогнозируемые успехи в области микроэлектроники и цифровой схемотехники вселяли надежду на скорое радикальное изменение подобного состояния дел.

Этап 2. Многоскоростная фильтрация и адаптивная обработка сигналов

В начале 70-х годов появляются первые однокристальные микропроцессоры (МП) — «провозвестники» новой волны компьютерной революции. Начинается новый этап становления техники ЦОС и компьютерных технологий. Открываются новые возможности и возникают новые проблемы. Теория ЦОС входит в очередной этап своего развития, который условно можно ограничить периодом с 1975 по 1985 г. Именно в этот период формируются четыре основных взаимосвязанных направления современной теории ЦОС (рис.2).

Первое направление — цифровая частотная селекция сигналов, закрепляет и систематизирует достижения в области проектирования цифровых полосовых фильтров и их наборов. Наиболее оригинальные работы в этом направлении были связаны с развитием теории многоскоростной обработки сигналов на основе эффектов прореживания по времени и по частоте [23—28].

Второе направление — быстрые алгоритмы обработки сигналов, ориентировано на построение высокоскоростных алгоритмов ЦОС путем исключения «избыточности» операций преобразования и замены трудоемких операций умножения операциями сложения и сдвига (многочисленные модификации алгоритма

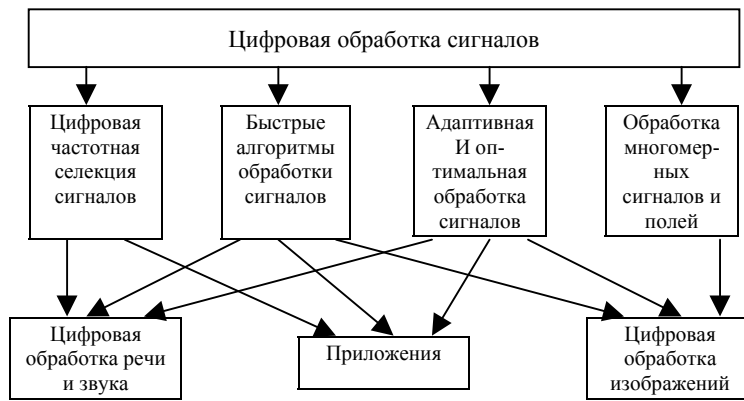


Рис. 2

БПФ и методы теоретико-числовых преобразований) [29—31].

Третье направление — адаптивная и оптимальная обработка сигналов, охватывает широкий спектр методов решения задач оптимальной фильтрации (фильтры Винера, Калмана и др.) и обработки сигналов в условиях априорной неопределенности о характере исследуемого динамического процесса [32—39].

Четвертое направление — обработка многомерных сигналов и полей, является естественным развитием обработки одномерных сигналов на случай многомерных цифровых систем [40].

Указанные направления взаимосвязаны друг с другом, и эта взаимосвязь базируется как на общей математической основе, «питающей» все четыре направления, так и на прямом использовании основных положений и методов одних направлений в других. К наиболее фундаментальным работам, подводящим некоторые итоги очередного этапа развития теории ЦОС в период с 1975 по 1985 г., следует отнести монографию Ж. Лима, А. Оппенгейма [41], а также справочник по ЦОС под редакцией К. Чэна [42].

В 70-е годы успешно начали развиваться системы цифровой обработки изображений и звуковой информации — самостоятельные области науки и техники.

Цифровые методы обработки изображений намного превосходят аналоговые по гибкости и эффективности. При линейной обработке изображений широко применяются различные двумерные унитарные преобразования: Фурье, косинусные, синусное, наклонное, Адамара, Хаара, сингулярное и другие, позволяющие в той или иной степени сократить объем информации. Метод преобразования непрерывных сигналов в набор некоррелированных коэффициентов был разработан Хотеллингом [43], Кархуненом [44] и Лоэвом [45] и получил название преобразования Кархунена-Лоэва, широко используемого при оценке эффективности линейных преобразований. Цифровая обработка изображений применяется для их реставрации и улучшения, выделения признаков деталей изображений, обнаружения и распознавания образов, цифрового внутри- и межкадрового кодирования [46—49].

Цифровые методы обработки звуковой информации широко используются как для обработки и кодирования речи, так и для эффективного преобразования широкополосных сигналов звука. Эти методы основываются на фундаментальных исследованиях, изложенных в [50 и 51]. Используемые в настоящее время вокодеры позволяют сократить объем речевой информации в десятки и сотни раз. Кодировочные устройства широкополосных сигналов звука менее эффективны, но обеспечивают качество воспроизводимого звука, неотличимое от оригинала.



Витязев Владимир Викторович,

д.т.н., профессор

Рязанской государственной

радиотехнической академии.

Работает в области цифровой

частотно-временной и адаптивной

обработки сигналов с 1973 года.

Член общества IEEE

Signal Processing Society

Тел.: (095) 925-8436-,

(0912)72-4559

Этап 3. Оптимальное проектирование на сигнальных процессорах

В первой половине 80-х годов сначала фирма NEC (Япония), затем фирма Texas Instruments (США) объявили

о промышленном выпуске первых сигнальных процессоров mPD7720 и TMS32010 и тем самым ознаменовали открытие новой эры в технике ЦОС — эры СБИС обработки сигналов. Новый класс микропроцессорных систем фактически представлял собой семейство однокристалльных микроЭВМ, ориентированных внутренней архитектурой на высокоэффективную программно-аппаратную реализацию классических алгоритмов ЦОС. За относительно короткий промежуток времени — 15 лет, цифровые процессоры обработки сигналов (ЦПОС) прошли несколько этапов развития [52—56]. В конкурентную борьбу на рынке перспективных электронных технологий вступили такие фирмы, как Motorola, Analog Devices, AT&T, SGS Thomson (США) и др. В результате интенсивных разработок в значительной степени выросли вычислительная производительность и внутренние ресурсы однокристалльных ЦПОС, появились мощные программные и аппаратные средства поддержки микропроцессорных систем ЦОС. Уменьшение стоимости и расширение функциональных возможностей СБИС обработки сигналов способствовали широкому практическому использованию методов ЦОС в различных сферах научной и производственной деятельности человека.

Новый этап развития теории ЦОС (с середины 80-х годов) — интенсивное внедрение методов обработки цифровых сигналов с применением однокристалльных ЦПОС и многопроцессорных систем, построенных на их основе [57—61]. Теория ЦОС, поступательно двигаясь во всех указанных выше направлениях, все в большей степени развивается в направлении практического использования в конкретных областях с учетом ограничений, накладываемых внутренними ресурсами применяемых сигнальных процессоров. Традиционно базовыми областями применения техники ЦОС остаются: цифровая обработка речи, звука, изображений (сжатие, синтез, распознавание, идентификация, закрытие), а также статистическая ЦОС в радиотехнике, связи и управлении (спектральное оценивание, адаптивная фильтрация, цифровая приемопередача). Но именно в этот период методы и техника ЦОС из сферы, как правило, военных технологий, переходят в сферу интенсивных коммерческих разработок.

Острая конкурентная борьба на рынке новых информационных и компьютерных технологий способствовала прорыву в области методологии и техники проектирования систем ЦОС, обеспечивающему значительное сокращение сроков разработок. Формулируется общая концепция оптимального автоматизированного проектирования систем ЦОС. Создаются мощные программные средства поддержки автоматизированного проектирования, начиная с этапа моделирования системы и заканчивая схемотехнической реализацией на сигнальных процессорах и СБИС обработки сигналов. К их числу относятся такие интегрированные оболочки, как MATLAB фирмы The MathWorks, Inc., Hypersignal фирмы Hyperception, Inc., пакеты по синтезу цифровых фильтров QEDesign фирмы Momentum Data Systems (США), DIFID и PICLOR фирмы «Радис, Лтд» (Россия) и др. Разработка многопроцессорных систем ЦОС, ориентированных на обработку потоков информации в темпе их поступления, потребовала создания специализированных программных средств управления — операционных систем реального времени (ОСРВ), оптимизированных для систем ЦОС. Получили известность и широкое использование ОСРВ SPOX фирмы Spectrom Microsystems, Inc. (США) и Virtuoso фирмы Eonic Systems, Inc. (Бельгия).

Этап 4. Однокристалльные многопроцессорные системы и оптимальное проектирование на ПЛИС

Современный этап развития методов и техники обработки сигналов во второй половине 90-х годов определяется как новыми уникальными возможностями однокристалльных многопроцессорных ЦПОС (семейство TMS320C80), так и применением архитектурно перепрограммируемых СБИС ЦОС на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Имея до 1 млн логических вентилях на кристалле и работая на внутренней тактовой частоте до нескольких сотен мегагерц, ПЛИС обработки сигналов прочно занимают свою нишу между специализированными заказными СБИС и универсальными ЦПОС, интенсивно расширяя сферу применения перепрограммируемых СБИС ЦОС и вытесняя с рынка высоких технологий сигнальные процессоры.

Проектируемые на ПЛИС системы сочетают в себе сверхвысокую производительность заказных СБИС и высокую гибкость ЦПОС на уровне архитектурной адаптации к заданному классу алгоритмов, а также возможность размещения на одном кристалле ПЛИС всей структуры системы, включая нестандартную периферию. В тех случаях, когда проектируемая система должна быть ориентирована на решение сложных, разветвленных алгоритмов обработки в реальном времени на различных скоростях потоков входных данных, наивысшая эффективность достигается при совместном использовании ПЛИС и сигнальных процессоров.

Новая концепция построения системы ЦОС базируется на широком использовании потенциальных возможностей ПЛИС и методике оптимального проектирования, гарантирующей достижимость заданных показателей качества при минимальных аппаратных затратах. При этом акцент, по-прежнему, смещается в сторону прикладных систем, разработка и промышленное внедрение которых идут нарастающими темпами. Вместе с тем и вопросы общей теории ЦОС не теряют своей значимости. К числу наиболее актуальных задач теории и техники ЦОС относятся:

- систематизация методов и алгоритмов обработки цифровых сигналов по различным направлениям и создание пакетов прикладных программ по автоматизированному проектированию систем ЦОС;
- разработка методики и пакетов прикладных программ оптимального проектирования систем ЦОС на сигнальных процессорах и ПЛИС;
- развитие новых концепций по основным направлениям теории ЦОС — многоскоростная обработка, быстрые алгоритмы, адаптивная обработка, спектральное оценивание, частотно-временная обработка,

вейвлетовские и фрактальные преобразования, нелинейная фильтрация, обработка многомерных сигналов и др.

Предмет и задачи ЦОС

Анализируя развитие теории ЦОС как самостоятельного научного направления, можно выделить круг вопросов и характерные черты, отличающие ее от других областей знаний. Предмет исследований теории ЦОС полностью связан с самим **процессом обработки** цифровых сигналов в конкретной вычислительной среде и, как правило, не зависит от цели преобразования, которая определяется областью применения. Для разработчика системы или устройства ЦОС, реализующего заданный математический оператор преобразования, неважно как будут использоваться результаты преобразования, задача заключается прежде всего в минимизации вычислительных и аппаратных затрат. При этом дополнительно могут учитываться отведенные ресурсы памяти программ и данных, а также допустимая погрешность вычислений. Результаты одного и того же класса алгоритмов преобразования, например линейной свертки, в одном случае обеспечивают воспроизведение желаемой частотной характеристики, в другом — согласованную фильтрацию, в третьем — адаптивную коррекцию или эхо-компенсацию и т.п.

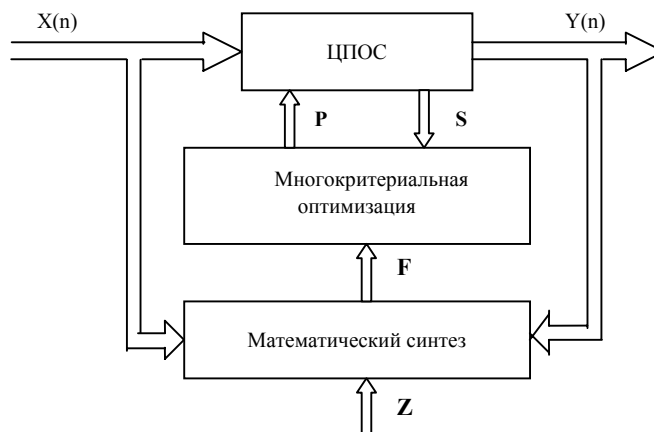


Рис. 3

С позиции самых общих представлений проектирование системы ЦОС включает два этапа (рис. 3). На первом этапе — этапе математического синтеза, строится оператор преобразования F с использованием всей доступной информации о входном $X(n)$, выходном $Y(n)$ сигналах и цели преобразования Z .

При этом не учитываются условия реализации оператора F , наиболее полно отвечающего заданной цели преобразования. На втором этапе — этапе многокритериальной оптимизации структуры цифровой системы, производится синтез оператора преобразования P с учетом ограничений S , накладываемых условиями реализуемости желаемого оператора F . Если класс операторов F синтезируется с использованием методов и математических моделей общей теории сигналов и систем, то **теория и методы ЦОС** должны показать, как достигнуть этой цели при общих минимальных затратах на реализацию оптимального алгоритма обработки P в конкретной вычислительной среде: моделирование на ЭВМ, проектирование многопроцессорных систем, однокристальное исполнение на ЦПОС и ПЛИС. Предполагается, что с целью минимизации затрат на реализацию, как правило, может задаваться допустимая погрешность воспроизведения желаемого оператора F . Именно с этих позиций в [28] нашла обоснование и развитие методика оптимального проектирования цифровых полосовых фильтров и их наборов.

На основании анализа развития теории и техники ЦОС можно сделать следующие выводы:

- цифровая обработка сигналов — ИНФОРМАТИКА реального времени — это научное направление, связанное с разработкой и оптимизацией алгоритмов преобразования цифровых сигналов с учетом особенностей среды их реализации;
- эволюция теории и техники ЦОС — это развитие и взаимное сближение математических методов обработки информации и компьютерных технологий на базе новых технических решений, использующих малые ЭВМ, микропроцессоры, ЦПОС и ПЛИС.

Весь комплекс задач, которые необходимо решать на пути разработки систем и устройств ЦОС, можно свести к следующим проблемам [28]:

представление аналогового сигнала в цифровой форме — в существующих технических системах и устройствах общепринятой чаще всего является аналоговая форма представления информации и по этой причине применение методов и средств ЦОС предполагает необходимость аналого-цифрового и цифроаналогового преобразований;

выбор класса цифровых цепей и преобразований, обеспечивающих воспроизведение заданного математического оператора F с априорно требуемой точностью — синтез оператора преобразования F проводится, как правило, в одном из двух классов цифровых цепей (с конечной или бесконечной импульсными характеристиками). Каждый класс имеет свои достоинства и недостатки с позиции потенциальных возможностей эффективной реализации оператора F ;

аппроксимация математического оператора F в заданном классе цифровых цепей — характеристики реально воспроизводимого оператора P могут существенно отличаться от желаемых и задача аппроксимации заключается в расчете оптимальных параметров цифровой цепи, минимизирующих в соответствии с некоторым критерием отклонения характеристик воспроизводимого оператора P от желаемого F ;

синтез структуры оператора P и оптимизация ее параметров — воспроизведение желаемых характеристик оператора F с заданной точностью является основной целью синтеза структуры оператора P и последующего расчета параметров цифровой цепи, которые могут быть реализованы различными путями, характеризуемыми разными затратами при практической реализации: объемом вычислений в единицу времени, емкостью памяти программ и данных, и своими потерями, связанными с собственными шумами и неточным представлением коэффициентов; по этой причине на этапе структурного синтеза ставится задача поиска такой формы построения цифровой цепи (оператора P), которая обеспечила бы достижение поставленной цели при наименьших затратах и потерях; такая задача структурного синтеза не всегда поддается простой математической формализации, но может быть успешно решена с применением моделирования и современных средств САПР;

анализ влияния собственных шумов и неточного представления коэффициентов оператора преобразования P на точность воспроизведения желаемых характеристик — эта проблема включает в себя такие вопросы, как анализ устойчивости, причин возникновения переполнений и предельных циклов, выбор масштабирующих множителей и разрядности представления данных и коэффициентов;

синтез малошумящих и низкочувствительных к неточному представлению коэффициентов структур оператора преобразования P — в зависимости от структуры цифровой цепи и выбора ее параметров влияние собственных шумов и неточного представления коэффициентов на конечный результат обработки может быть различным; поэтому не менее важной проблемой синтеза структуры оператора преобразования P , возникающей вслед за поиском высокоскоростных алгоритмов обработки, является проблема построения малошумящих и низкочувствительных структур цифровой цепи;

выбор схемотехнического решения: класса сигнальных процессоров, семейства процессорных модулей и создания эффективного программного обеспечения.

Этап схемотехнического проектирования наполняется «аппаратным» содержанием в тех случаях, когда не удается решить поставленную задачу в рамках однопроцессорной реализации или когда приходится прибегать к ПЛИС-технологии.

ЦОС на современном этапе

Состояние и тенденции развития теории и техники ЦОС стали предметом обсуждений и дискуссий, состоявшихся на 1-й Международной научно-технической конференции «**Цифровая обработка сигналов и ее применение — DSPA'98**» (30 июня — 3 июля, 1998 г., Москва), собравшей участников из 15 стран мира. С инициативой организации конференции выступили: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, НИИ Радио, Отделение информатики, вычислительной техники и автоматизации РАН, Общество связи IEEE и Российская секция IEEE при поддержке Государственного комитета РФ по связи и информатизации и ряда ведущих отечественных НИИ, промышленных предприятий и университетов.

Работа конференции проходила в семи секциях по следующим направлениям:

- теория сигналов и систем (руководитель — д.т.н., проф. **Ю.С. Шинаков**);
- цифровая фильтрация и статистическая обработка сигналов (д.т.н., проф. **А.А. Ланнэ**);
- цифровая обработка сигналов в системах телекоммуникаций (д.т.н., проф. **Ю.Н. Прохоров**);
- цифровая обработка сигналов в радиолокации и гидроакустике (д.т.н., проф. **Ю.Г. Сосулин**);
- цифровая обработка изображений (д.т.н. **В.П. Дворкович**);
- цифровая обработка измерительной информации (д.т.н, проф. **П.А. Арутюнов**);
- новые микропроцессорные и инструментальные средства ЦОС: проектирование систем обработки сигналов (д.т.н., проф. **В.В. Витязев**).

Одновременно работала подсекция «Цифровое радиовещание» (д.т.н., проф. **С.Л. Мишенков**).

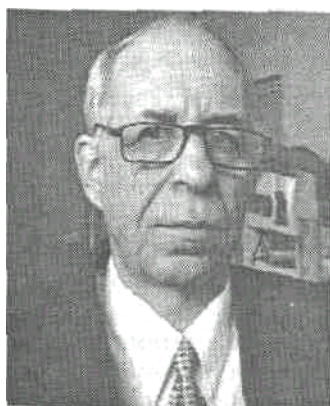
Было сделано 173 научных доклада, в том числе 37 докладов — представителями зарубежных стран. В фойе конференц-зала проходила презентация современных ЦОС-технологий в рамках компактно организованной выставки продукции ведущих отечественных фирм («**Инструментальные системы**», «**МикроЛАБ**», «**АВТЭКС**» и др.), представивших собственные разработки. Продукцию известных зарубежных компаний: «**Texas Instruments**», «**Xilinx**», «**Analog Devices**», «**Altera**», «**MathWorks**» и др., анонсировали их официальные дистрибьюторы в России и странах СНГ (фирмы «**СКАН**», «**АРГУССОФТ**», «**АВТЭКС**», «**ЭФО**», «**СофтЛАЙН**»). К открытию конференции помимо рабочей программы и каталога выставки был выпущен Сборник докладов в семи томах на русском и английском языках. С обзором материалов конференции можно ознакомиться в [62—64].

Участники каждой из секций выявили тенденции развития и акцентировали свое внимание на путях решения проблем ЦОС собственных направлений. Вместе с тем, анализ состояния и тенденций развития теории и техники ЦОС показывает, что в их основе лежат, по крайней мере, три взаимосвязанных подхода к эффективному решению фундаментальных проблем обработки сигналов. Это концепции многоскоростной, адаптивной и оптимальной обработки сигналов.

Концепция многоскоростной обработки, в том числе многомерных сигналов, в самом общем случае предполагает, что анализ и преобразование сложных процессов, содержащих как «быстрые» (короткие), так и медленные («протяженные») составляющие, должны вестись на разных скоростях (частотах дискретизации). Необходимо их предварительное разделение с одновременным понижением частоты дискретизации «медленных» составляющих и последующей их обработкой на более низкой частоте, что позволит сохранить общую размерность массивов обрабатываемых данных, несмотря на «расщепление» входного потока по нескольким параллельным каналам.

Концепция адаптивной обработки сигналов основана на том, что структура и параметры устройства ЦОС должны подстраиваться под априорно неизвестную структуру исследуемого процесса с тем, чтобы достичь наивысшей эффективности решения поставленной задачи.

Концепция оптимальной обработки предполагает постановку, формализацию и решение задачи оптимального синтеза структуры системы или устройства ЦОС в соответствии с заданной совокупностью показателей качества и областью ограничений. На стыке этих концепций и рождаются новые технические решения как традиционных, так и нетрадиционных задач обработки сигналов.



Дворкович Виктор Павлович,

*д.т.н.; академик МАИ,
работает в области обработки изображений
и измерительной информации.*

*Тел/ф. (095) 2673484
E-mail: niircom@ccs.ru*

Одним из ярких примеров использования эффективного сочетания указанных концепций является построение цифровой системы анализа-синтеза одномерных и многомерных сигналов по общей структуре, представленной на рис. 4.

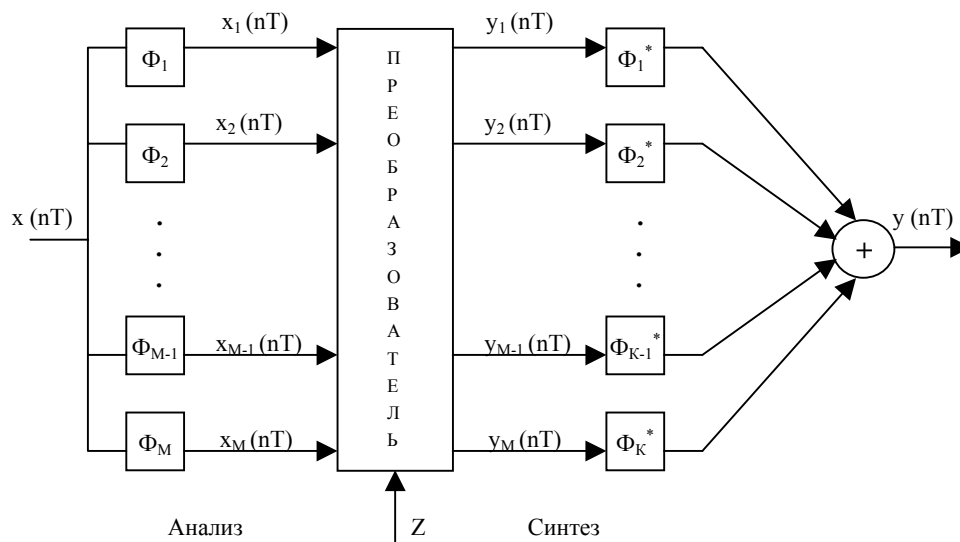


Рис.4

В состав системы входят: M полосовых фильтров $\Phi_i, i = \overline{1, M}$ анализатора входного процесса $x(nT)$; преобразователь канальных сигналов $x(nT), i = \overline{1, M}$ и K полосовых фильтров $\Phi_j^*, j = \overline{1, K}$ синтезатора выходного процесса $y(nT)$. Преобразователь канальных сигналов в зависимости от конкретной цели Z применения системы может выделять и подавлять отдельные компоненты $x(nT), i = \overline{1, M}$ входного процесса

$x(nT)$, понижать и повышать их частоту дискретизации, производить адаптивную обработку по каждому из каналов, оценивать параметры компонент с целью распознавания или сжатия информации о процессе $x(nT)$, «перемешивать» каналы и переставлять сегменты компонент для его шифрации и выполнять другие операции по всей совокупности частотных компонент.

В большинстве рассмотренных случаев полосовые фильтры Φ_i , $i=1, M$ строятся как фильтры-дециматоры, понижающие в M раз частоту дискретизации канальных сигналов $x_i(nT)$, $i = 1, M$, а полосовые фильтры Φ_j^* , $j=1, K$ - как фильтры-интерполяторы, повышающие в M раз частоту дискретизации преобразованных компонент. Применение двухступенчатой обработки позволяет не только снизить в M раз требования по скорости ввода и преобразования каждой из компонент $x_i(nT)$, $i=1, M$, но и значительно уменьшить порядок последующих операторов преобразования. Решение сложной многопараметрической задачи обобщенной фильтрации входного процесса $x(nT)$ сводится к решению M относительно простых задач преобразования отдельных компонент $x_i(lMT)$, $l = 0, 1, 2, \dots$, и межканальной обработки. Дополнительный выигрыш может дать переход к трехступенчатой обработке, предполагающей, что на этапе канальных преобразований отдельных компонент $x_i(lMT)$ будет использована отдельная подсистема анализа-синтеза сигналов с промежуточным понижением частоты дискретизации. Этот процесс многоступенчатого понижения и повышения частоты дискретизации внутри каждого отдельного канала может быть продолжен по аналогичной схеме [28].

Однотипность частотных характеристик набора полосовых фильтров-дециматоров Φ_i , $i=1, M$ и фильтров-интерполяторов Φ_j^* , $j=1, K$ является одним из условий эффективной реализации устройства частотной преселекции сигналов, но с позиции построения оптимальной структуры всей системы анализа-синтеза сигналов не дает наилучшего решения. В общем случае должны предъявляться различные требования к параметрам частотной избирательности отдельных канальных фильтров, а вторичное преобразование вестись на скоростях, наиболее полно отвечающих критерию оптимизации системы. Набор фильтров частотной преселекции должен «адаптироваться» к спектральной структуре преобразуемого процесса.

Оптимизация системы анализа-синтеза сигналов рассматривается как многокритериальная задача, учитывающая не только достижимость заданной совокупности показателей качества, но и все внутренние ресурсы используемой для реализации вычислительной среды. При этом прямая задача оптимального проектирования предполагает поиск наилучшего решения в условиях ограниченных и априорно заданных ресурсах вычислительной среды, а обратная задача преследует целью минимизацию общих аппаратных или вычислительных затрат для достижения поставленной цели проектирования.

Представленная выше структура многоскоростной системы анализа-синтеза сигналов обеспечивает:

- предварительный анализ сигнала путем разделения по отдельным частотным каналам;
- понижение частоты дискретизации и пропорциональное уменьшение требований к скорости обработки по каждому из каналов;
- режекцию узкополосных помех и «мешающих» компонент;
- уменьшение избыточности обработки за счет исключения из последующего преобразования неинформативных каналов;
- уменьшение влияния собственных шумов и неточного представления коэффициентов операторов преобразования;
- возможность простой и эффективной многопроцессорной реализации.

Видеоинформационные системы — пример эффективной реализации цифровой обработки сигналов

Необходимость перехода к системам цифровой обработки и доставки потребителям видео и звука связана не только с требованиями повышения качества воспроизводимой информации и замены изношенных технических средств связи и вещания, но и с экономической целесообразностью более эффективного использования полос аналогового спектра, удовлетворения возросших запросов на частотные присвоения, требованиями увеличения числа одновременно транслируемых телевизионных программ в каждом населенном пункте и т.д.

Широкое применение такого рода цифровых систем позволит интегрировать сети и системы связи России в общемировую систему цифровых телекоммуникаций, включая создание:

- систем и сетей многопрограммного телевидения с передачей нескольких программ в одном стандартном телевизионном канале;
- систем и сетей телевидения высокой четкости при сохранении действующих частотных планов;
- компьютерных сервисных ТВ-сетей, включая интерактивные системы;
- высокоэффективных систем видеотелефонной и видеоконференц-связи;
- высокоэффективных охранных систем;
- транспортных видеоинформационных систем и систем безопасности движения;
- новых систем защиты видеоинформации от несанкционированного доступа и др.

Новые технологии ЦОС, возникшие на стыке электросвязи и компьютерной техники, становятся основой современных локальных и глобальных коммуникационных систем. В этих обстоятельствах установка на

развертывание цифровых систем передачи видеоинформации как статических, так и динамических изображений различного разрешения, представляется наиболее целесообразной. Решение этих проблем, по сути, может устранить наше отставание в развитии информационных технологий.

В качестве подтверждения эффективности проведения указанных работ можно привести решение Конгресса США, установившего полный переход на стандарт цифрового телевизионного вещания ATSC до 1 января 2006 года и определившего возможность пополнения казны на 23 млрд долл. за счет продажи с аукциона высвобождаемых частотных каналов.

Высокая рентабельность и коммерческая эффективность внедрения цифровых способов передачи изображений и звука с сокращением избыточности информации определяется как резким увеличением эквивалентной пропускной способности систем связи, так и возможностью архивации (в частности, видеозаписи) больших массивов обработанных данных.

Системы кодирования информации. Все системы цифрового телевидения (ЦТВ) используют алгоритмы обработки изображений и звука, предусмотренные стандартом MPEG-2, состоящим из трех основных частей — системной, видео и звуковой [65].

Видеочасть стандарта описывает кодированный битовый поток для высококачественного цифрового видео. Стандарт позволяет обеспечить обмен битовыми потоками между различными приложениями, поддерживает как постоянную, так и переменную скорость передачи, произвольный доступ, переключение каналов, масштабируемое декодирование, редактирование битового потока, а также такие специальные функции, как быстрое воспроизведение, быстрое обратное воспроизведение, обратное воспроизведение с нормальной скоростью, медленное движение, паузу и неподвижные изображения.

Стандарт MPEG-2 является совместимым расширением MPEG-1, он поддерживает чересстрочный формат видео и ряд развитых средств, в том числе средства для поддержки ТВЧ. Стандарт определяется в терминах расширяемых профилей, каждый из которых, являясь частным случаем стандарта, поддерживает черты, необходимые важным классам приложений.

Иерархические масштабируемые профили могут поддерживать такие приложения, как совместимое наземное многопрограммное ТВ/ТВЧ, пакетные сетевые видеосистемы, обратную совместимость с другими существующими стандартами и другие приложения, использующие многоуровневое кодирование.

Звуковая часть стандарта MPEG-2 определяет низкоскоростное кодирование многоканального звука. MPEG-2 поддерживает до 5 полных широкополосных каналов плюс дополнительный низкочастотный канал и/или до семи многоязычных комментаторских каналов.

Системная часть стандарта MPEG-2 описывает форматы пакетирования и мультиплексирования служебной, звуковой, видео и дополнительной информации, определяет режимы комбинирования одного или более потоков данных в один или множество потоков, пригодных для хранения или передачи.

Системное кодирование в соответствии с синтаксическими и семантическими правилами, налагаемыми данным стандартом, обеспечивает необходимую и достаточную информацию, чтобы синхронизировать декодирование без переполнения или недозагрузки буферов декодера при различных условиях приема или восстановления потоков.

В MPEG-2 имеется пять профилей, каждый из которых может подразделяться на четыре уровня. Каждый из этих профилей и уровней определяет предельные значения основных параметров битового потока.

Совершенствование алгоритмов обработки изображений связано с:

- ♦ созданием системы эффективного распознавания смены сюжета и связанного с ним разбиения последовательности изображений на опорные и кодируемые с одно- и двусторонним предсказанием кадров;
- ♦ разработкой высокоэффективных методов обработки в рамках стандарта MPEG, основанных на учете структуры рельефа изображений;
- ♦ применением быстрых и эффективных алгоритмов анализа и компенсации движения в динамических цветных изображениях;
- ♦ использованием новых методов классификации яркостных и цветовых структур в динамических изображениях;
- ♦ использованием единых принципов сжатия изображений различного разрешения;
- ♦ созданием новых принципов реализации систем метрологического обеспечения каналов цифровой передачи видеоинформации.

Так, на базе анализа структуры рельефа изображений созданы новые алгоритмы изменения матрицы квантования компонент ДКП, что позволило примерно в 1,5 раза увеличить сжатие 1-кадров при неизменном качестве их воспроизведения [66, 67].

Анализ и компенсация движения — основа эффективного сокращения избыточности динамических изображений. Недостатком стандартного метода анализа движения является необходимость использования

значительной вычислительной мощности. Так, например, из требуемой вычислительной мощности порядка 20 млрд операций /с при обработке телевизионных изображений стандартного разрешения примерно 3/4 операций требуется для реализации системы анализа и компенсации движения. Известные способы ускоренного анализа обладают рядом существенных недостатков, не позволяющих их использовать. Разработаны новые высокоэффективные алгоритмы, позволяющие достичь наибольшего ускорения вычислений [68, 69]. Ускорение достигается в основном за счет выбора в анализируемой детали лишь небольшого числа пикселей, наилучшим образом передающих изменение ее рельефа, и анализе движения этой детали только с использованием ее характерных пикселей.

При использовании этого алгоритма в сочетании с эффектом корреляции векторов движения соседних макроблоков достигается уменьшение вычислительной мощности поиска векторов движения почти на два порядка по сравнению со стандартным методом.

Большинство известных фирм занимается проблемами реализации видеотелефонной и видеоконференц-связи как на уровне создания соответствующих аппаратных средств, так и их программного обеспечения.

Недостатки сегодняшней программной технологии сжатия на ПЭВМ не позволяют создать системы видеотелефона и видеоконференц-связи, на которые можно было бы положиться. Некоторые из таких коммерческих систем, доступные на рынке, обеспечивают несколько более высокое качество, но достаточно дороги, требуют использования широкополосных каналов связи, сложны при монтаже, наладке и в условиях эксплуатации. Величина потока данных, отводимая для передачи видео и аудиоинформации в узкополосных линиях, обычно составляет от 30 до 512 кбит/с.

Для использования каналов с низкой пропускной способностью должны быть реализованы алгоритмы кодирования, обеспечивающие большую степень сжатия при приемлемом качестве. Это требует значительных вычислительных ресурсов и накладывает довольно жесткие ограничения на работу кодеров. Достаточная степень сжатия достигается при использовании одновременно внутри- и межкадрового кодирования деталей изображения.

Для таких приложений целесообразно использовать системы сжатия видеоинформации, определяемые стандартами ITU-T H.261 и H.263 [70]. Возможные их приложения включают, например, видеотелефонную связь или видеоконференции в реальном времени. Стандарты обеспечивают реализацию как кодирования отдельных кадров в стиле JPEG, так и использование компенсации движения для устранения временной корреляции между кадрами.

Методика аудиокодирования не включается в рамки этих стандартов, но подразумевается использование других рекомендаций ITU-T G.729 (8 кбит/с), G.723.1 (5,3/6,3 кбит/с) и др. [71].

На базе созданных алгоритмов обработки динамических изображений были разработаны и реализованы системы программной видеотелефонной и видеоконференц-связи [72]. В этих системах для видеоизображения с пространственным разрешением CIF или QCIF сжатие, кодирование, передача, прием и декодирование видео и аудиосигналов осуществляется центральным процессором персонального компьютера в реальном масштабе времени. С процессором Pentium 200 МГц частота смены кадров в дуплексной аудио и видеотелефонной связи составляет 5—10 кадров/с, а компенсации движения обеспечивает высокое качество изображения при кодировании по стандартам H.261/H.263.

Однако следует указать, что задача создания алгоритма и соответствующего аппаратного комплекса, удовлетворяющего как требованиям по коэффициенту сжатия, так и требованиям к качеству восстановленного (после сжатия) изображения и пригодного для широкого внедрения, еще окончательно не решена.

Большое внимание научной общественности и фирм — производителей систем цифровой обработки изображений уделяется проблемам создания альтернативных систем сжатия видеоинформации [49, 74-78]:

- векторного кодирования;
- вейвлет (Wavelet) преобразования;
- фрактального кодирования;
- комбинированных систем, потенциально обеспечивающих высокие коэффициенты сжатия.

При вейвлет преобразовании изображение разбивается на некоторые последовательности нескольких изображений меньшего размера, содержащих существенно меньший объем визуальной информации, что позволяет считать этот метод весьма перспективным.

При фрактальном кодировании, являющемся одним из наиболее эффективных методов по степени упаковки, изображение разбивается на некоторые блоки, называемые доменами. Затем в стандартной реализации способа производится поиск подобия каждому домену областей этого же изображения, обычно большего размера. Найденные подобные области, называемые ранговыми, определяют алгоритм их преобразования для воспроизведения доменов. Поиск ранговых областей в стандартной реализации способа осуществляется методом перебора всех возможных вариантов, что и определяет значительное время кодирования.

На начальном этапе проведения исследований удалось в десятки раз сократить время фрактального кодирования изображений, однако до реализации систем кодирования, работающих в реальном масштабе

времени, требуется проведение дальнейших работ. Достигнутые результаты уже сейчас могут найти применение для архивации и воспроизведения изображений, учитывая их быстрое итерационное восстановление.

Системы передачи информации. Для систем распределения многопрограммного цифрового ТВ вещания в Европе разработана система DVB, которая охватывает спутниковые, кабельные, наземные средства передачи телевидения. В стандарте реализован принцип использования при различных способах передачи одинаковых методов кодирования сигналов, мультиплексирования, системы коррекции ошибок на первом этапе передачи, что обеспечивает максимальную совместимость разных систем.

При этом выполняются следующие основные требования для всех систем:

- использование для кодирования источника семейства стандартов MPEG для сигналов видео, аудио и дополнительных данных;
- во всех системах должен использоваться общий мультиплексор передаваемого потока данных MPEG-2;
- все системы должны использовать общую систему коррекции ошибок;
- модуляция и кодирование канала, а также любые необходимые дополнительные системы коррекции ошибок должны выбираться в зависимости от особенностей системы.

Стандарт DVB-S [79] определяет кадровую структуру, кодирование и модуляцию, используемые в системах спутникового вещания в диапазоне 11/12 ГГц. В этом стандарте определена система канального кодирования и модуляции для спутникового цифрового многопрограммного ТВ/ТВЧ, которая может применяться как для первичного, так и для вторичного распределения и обеспечивающая сервис «Видео на дом», коллективный прием и подачу сигналов на головные станции кабельного телевидения.

Стандарт DVB-C [80] определяет кадровую структуру, кодирование и модуляцию, используемые в кабельных сетях.

Стандарт DVB-T [81] определяет кадровую структуру, кодирование и модуляцию для цифрового наземного ТВ-вещания.

Созданная в США система наземного ТВ-вещания ATSC [82] предназначена как для обеспечения передачи сигналов телевидения высокой четкости, так и сигналов многопрограммного телевидения. В стандарте подробно расписаны варианты используемого цифрового потока MPEG-2, алгоритмы его канального кодирования и модуляции. В этой системе при эфирном вещании используется 8-уровневая амплитудная модуляция одной несущей с частично подавленной боковой полосой (8-VSB).

Международными стандартами охвачены также такие системы распределения телевизионных программ, как MMDS, LMDS, MVDS [83]. В первой из них стандарт практически аналогичен стандарту DVB-T, а во второй и третьей — DVB-S.

Видеоконференц-связь и видеотелефония относятся к числу приложений, для которых вопросы передачи по сети являются чрезвычайно существенными. В настоящее время активно развиваются сетевые инфраструктуры, сетевое оборудование и протоколы для качественной передачи мультимедийного графика реального времени (с минимизированными задержками). Мультимедийный график предъявляет более жесткие требования к пропускной способности сети, чем график данных, так как сетевые задержки при передаче пакетов должны быть малы. В связи с этим развиваются как протоколы реального времени в IP-сетях, такие как RTP и RTCP, так и протоколы более низкого транспортного и канального уровней, способные обеспечить гарантированную полосу пропускания (QoS) для мультимедийного приложения [84]. В числе наиболее перспективных технологий, которые могут стать основой для WAN-сетей с пакетной передачей графика реального времени, можно отметить режим асинхронной передачи (ATM), для которого были приняты международные рекомендации МСЭ-T [85], а также разновидности Frame Relay с резервированием полосы пропускания. К сожалению, высокая стоимость решений на основе ATM едва ли позволит внедрить эту технологию повсеместно на уровне конечного пользователя, и проблема «последней мили», касающаяся в основном доставки графика до конечного пользователя по Интернет, может получить свое разрешение в обозримом будущем с применением технологий ADSL или HDSL, кабельных модемов или средств беспроводного доступа [84, 85].

Проблемы метрологии. Еще одной проблемой во внедрении цифровых систем обработки и передачи изображений различного разрешения является отсутствие в России измерительной аппаратуры, необходимой, в частности, для настройки и поддержания технических характеристик телевизионных передающих станций, аппаратно-студийных комплексов, наземных и спутниковых линий связи, кабельных систем приема и распределения программ в состоянии, обеспечивающем их качественное функционирование.

С внедрением цифровых систем потребность в использовании измерительной аппаратуры будет возрастать, так как внедрение перспективных цифровых систем передачи требует создания принципиально новых способов и средств контроля и измерений. При этом необходимо, чтобы эти средства были совместимы и с традиционными аналоговыми системами.

Начало в разработке принципиально новых приборов на базе использования персональных компьютеров было положено при создании видеоанализатора компьютерного ВК-1, обеспечивающего как генерацию стандартных измерительных сигналов, испытательных статических и динамических изображений, так и анализ их искажений, осциллографический, спектральный и векторный анализ сигналов и их составляющих [86].

Результатом создания принципиально новых средств контроля и измерений будет:

- реализация патентно-чистых способов измерений на базе использования специально разработанных оптимальных измерительных сигналов и процедур их обработки, позволяющих резко повысить точности и быстродействие измерений;
- существенное увеличение функциональных возможностей создаваемых измерительных средств (включая оценку погрешностей измерений, многоуровневый допусковый контроль, оценку качества канала передачи, документирование результатов измерений и контроля), а также полностью цифровую реализацию, что в совокупности позволит обеспечить метрологию внедряемых в мире новейших цифровых систем;
- снижение практически на порядок цены указанных приборов, что достигается их реализацией на базе общедоступных персональных компьютеров, дополнительно комплектуемых соответствующими блоками (платами) ввода и вывода измерительной информации и соответствующими программными продуктами.

* * *

Дальнейшее развитие отечественной науки и современных технологий немыслимо без широкого применения методов и техники обработки информации в реальном времени. Однако успешное внедрение техники ЦОС требует глубоких фундаментальных и прикладных исследований широкого класса математических методов анализа, обработки, синтеза и распознавания сигналов, в том числе многомерных, и в первую очередь в области обработки речи, звука и изображений. Необходимо объединение усилий ведущих российских Центров ЦОС, плодотворно работающих в этих направлениях, путем разработки и реализации единой всероссийской научно-технической программы **«Цифровая обработка сигналов — ИНФОРМАТИКА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ»**.

Цель программы — объединение научного потенциала российских ученых на пути формирования отечественной школы специалистов по ЦОС — одной из передовых информационных технологий XXI века.

Достижение поставленной цели предполагает:

- проведение фундаментальных исследований в области теории, методов и алгоритмов ЦОС, направленных на эффективное решение задач анализа, синтеза, классификации, распознавания, сжатия и закрытия информации в реальном времени;
- организацию и ежегодное проведение в России Международной научно-технической конференции **«Цифровая обработка сигналов и её применение — DSPA»**, призванной содействовать прямому общению широкой научной общественности из разных стран мира, выявлению общих тенденций и направлений развития методов и техники ЦОС;
- издание российского научно-технического журнала **«Цифровая обработка сигналов»**, ориентированного как на ученых и специалистов в области ЦОС, так и на широкую аудиторию отечественных разработчиков, инженеров, преподавателей вузов, аспирантов и студентов.

Реализация настоящей программы — это решение ряда важнейших научно-технических и организационных проблем.

В области **фундаментальных исследований** — это систематизация и дальнейшее развитие методов и алгоритмов линейной и нелинейной фильтрации, методов многоскоростной и адаптивной обработки сигналов, методов частотно-временной и пространственной обработки многомерных сигналов, теории быстрых алгоритмов ЦОС и методов высокоэффективного построения многопроцессорных систем обработки сигналов, алгоритмов и программ оптимального автоматизированного проектирования систем ЦОС.

В области **новых технологий** — это создание принципиально новых способов и технических средств построения современных систем телекоммуникаций, включая проводную и беспроводную связь, радиовещание, телевидение, сети связи и мультимедиа, радиотехнических и информационно-измерительных систем, систем радиолокации, радионавигации и гидроакустики, устройств приборостроения и бытовой радиоэлектроники.

В области организации науки и **подготовки кадров** — это формирование сети научно-исследовательских Центров ЦОС, обладающих необходимым научным и техническим потенциалом для решения как фундаментальных проблем обработки сигналов, так и широкого круга прикладных задач с применением методов и техники ЦОС.

Из изложенного очевидна важность проведения работ по созданию эффективных алгоритмов цифровой обработки и передачи информации различного применения, разработки программного обеспечения соответствующих аппаратных средств, в том числе работающих по технологии мультимедиа, проведения исследований, связанных с реализацией перспективной аппаратуры уплотнения каналов связи,

предназначенной для повышения их пропускной способности.

Решение этих проблем, по сути, может устранить наше отставание в развитии информационных технологий.

Новый импульс в разработках цифровых устройств обработки, передачи и хранения информации связан с радикальным изменением технологических возможностей новейших процессорных систем, создаваемых фирмами ряда стран, специализирующимися в области совершенствования аппаратных и программных компьютерных средств. Использование новейших высокопроизводительных сигнальных процессорных систем с производительностью в несколько миллиардов операций в секунду обеспечивает реализацию самых сложных и математикоемких алгоритмов сжатия информации, что невозможно было осуществить ранее.

Теперь речь может идти о переформулировании задач, возникающих при стыковке алгоритмических и аппаратных средств сжатия: если раньше основная трудность состояла в необходимости упрощения алгоритмов, чтобы реализовать их ограниченными по быстродействию средствами, то теперь возникает задача усовершенствования алгоритмов с тем, чтобы они могли в полной мере использовать представившиеся технологические возможности.

С появлением таких технологических возможностей сводится на нет основное преимущество зарубежных разработчиков в области сжатия информации — наличие действующих образцов, которые ввиду использования БИС с неизменяемой программой не могут быть основой для усовершенствования аппаратных реализаций.

Отечественные и зарубежные разработчики • оказываются при наличии быстродействующих сигнальных процессоров в равных стартовых условиях при создании высокоэффективных комплексов сжатия различных видов информации. Создание условий по проведению НИР и ОКР и разработка таких комплексов позволит получить ряд патентов, реализация которых послужит основой успешной конкуренции с ведущими зарубежными фирмами, работающими в данной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nyquist H. Phys., Rev. 32, 110, 1928.
2. Котельников В.А. О пропускной способности эфира и проволоки в радиосвязи. — М.: Изд.во Всесоюзного Энергетического Комитета, МГУ, 1933.
3. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. — М.: Госэнергоиздат, 1956.
4. Железнов Н.А. Принцип дискретизации стохастических сигналов с неограниченным спектром и некоторые результаты теории импульсной передачи сообщений//Радиотехника и электроника. — 1958. — Вып. 1.
5. Игнатьев Н.К. Оптимальная дискретизация двумерных сообщений., Изв. Вузов СССР, Радиотехника, 36, 1957.
6. Витязев В.В. Цифровая обработка сигналов; ретроспектива и современное состояние//Электросвязь. — 1997. — №6.
7. Голд Б., Рэйдер Ч. Цифровая обработка сигналов / Под ред. М. Трахтмана. — М.: Сов. радио, 1973. — 367 с.
8. Рабинер Л., Голд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М.: Мир, 1978. — 848 с.
9. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов. — М.: Связь, 1979. — 416 с.
10. Введение в цифровую фильтрацию / Под ред. Р. Вогнера, А. Константинодиса. — М.: Мир, 1976. — 216 с.
11. Антоныч А. Цифровые фильтры: анализ и проектирование. — М.: Радио и связь, 1983. — 320 с.
12. Цифровые фильтры и их применение/В. Каппелини, А.Дж. Константинодис, П. Эмилини. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 360 с.
13. Применение цифровой обработки сигналов/Под ред. Э. Оппенгейма. — М.: Мир, 1980. — 552 с.
14. Рабинер Л., Шафер Р. Цифровая обработка речевых сигналов. — М.: Радио и связь, 1981. — 496 с.
15. Коршунов Ю.М., Бобиков А.И. Цифровые сглаживающие и преобразующие системы. — М.: Энергия, 1969. — 128 с.
16. Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации. — М.: Сов. радио, 1974. — 432 с.
17. Лихарев В.А. Цифровые методы и устройства в радиолокации. — М.: Сов. радио, 1973.
18. Верешкин А.Е., Катковник В.Я. Линейные цифровые фильтры и методы их реализации. — М.: Сов. радио, 1973.
19. Гольденберг Л.М., Левчук Ю.П., Поляк М.Н. Цифровые фильтры. — М.: Связь, 1974. — 160 с.
20. Трахтман А.М., Трахтман В.А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах. — М.: Сов. радио, 1975. — 208 с.
21. Мизин И.А., Матвеев А.А. Цифровые фильтры (анализ, синтез, реализация с использованием ЭВМ). — М.: Связь, 1979. - 240 с.
22. Цифровые фильтры в электросвязи и радиотехнике / Под ред. Л.М. Гольденберга. — М.: Радио и связь, 1982. — 224 с.
23. Крошье Р., Рабинер Л. Интерполяция и децимация цифровых сигналов; методический обзор// ТИИЭР. — 1981. — Т.69. - № 3.
24. Crochiere R.E., Rabiner L.R. Multirate digital signal processing. — Englewood, NJ: Prentice-Hall, — 1983. — 411 p.
25. Bellanger M. Traitement numerique du signal: theorie et pratique. Paris: Mason, 1984. - 432 p.
26. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов: Справочник. — М.: Радио и связь, 1985. — 312 с.
27. Вайдьянатхан П.П. Цифровые фильтры, блоки фильтров и полифазные цепи с многочастотной дискретизацией: методический обзор // ТИИЭР. — 1990. — Т. 78. — № 3.
28. Витязев В.В. Цифровая частотная селекция сигналов. — М.: Радио и связь, 1993. — 240 с.
29. Макклелан Дж. Г., Рейдер Ч.М. Применение теории чисел в цифровой обработке сигналов. — М.: Радио и связь, 1983. — 264 с.
30. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления свертки. — М.: Радио и связь, 1985. — 248 с.
31. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. — М.: Мир, 1989. — 448 с.
32. Цыпкин Я.З. Основы теории обучающихся систем. — М.: Наука, 1970. — 252 с.
33. Стратонович Р.Л. Принципы адаптивного приема. — М.: Сов. радио, 1973. — 144 с.
34. Шахгильдян В.В., Лохвицкий М.С. Методы адаптивного приема сигналов. — М.: Связь, 1974. — 159 с.
35. Goodman G.C., Sin K.S. Adaptive filtering, prediction and control. Englewood Cliffs. Prentice-Hall, 1984. — 552.
36. Уидроу В., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. — М.: Радио и связь, 1989. — 440 с.
37. Адаптивные фильтры / Под ред. К.Ф.Н. Коузена и П.М. Гранта. — М.: Мир, 1988. — 392 с.

38. **Gliordano A.A., Hsu F.M.** Least square estimation with applications to digital signal processing. **New York:** Wiley, 1985. - 412 p.
39. **Treichler J.R., Johnson C.R., Larimore H.G.** Theory and design of adaptive filters. New York: Wiley, 1987. —342 p.
40. Даджио Д., Мерцери Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. — М.: Мир, 1988, — 488 с.
41. **Advanced topics in signal processing / Ed. by J.S. Lim, A.V. Oppenheim.** Englewood Cliffs; Prentice Hall, 1988. — 518p.
42. Signal processing handbook. / Ed. by C.H-Chen. New York: Dekker, 1988. — 818 p.
43. **Hotelling H.** Analysis off a Complex of Statistical Variables into Principal Components., J. Educ. Psych., 24, 1933, — 417-441, 498—520 p.
44. **Karhunen H.** 1947, English translation by Selin I., On Linear Methods in Probability Theory, The Rand Corporation, Doc. T-131, August 1960.
45. **Loeve M.** Fonctions Aleatoires de Seconde Ordre, Hermann, Paris, 1948.
46. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Т.1, Т.2. — М.: Мир, 1982
47. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. — М.; Сов. радио, 1979.
48. **Цифровое кодирование телевизионных изображений / Под ред. И.И. Цукермана.** — М.: Связь, 1981.
49. **Netravali A.N., Haskell B.G.** Digital pictures: Representation and Compression.: Plenum Press, N.Y.,1991.
50. **Фант Г.** Акустическая теория речеобразования. —Пер. с англ. — М.: Наука, 1964. 284 с.
51. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации. — Пер. с нем. — М.: Связь, 1971. — 256 с.
52. **Куньянь Л., Франц Дж.А., Саймар Р.** Цифровые процессоры обработки сигналов // ТИИЭР. — 1987. — № 9.
53. **Витязев В.В.** Цифровые процессоры обработки сигналов. Учеб. пособие. — Рязань: РРТИ, 1989. — 80 с.
54. **Витязев В.В., Соловьев А.Н.** Цифровые процессоры обработки сигналов и их применение в технике связи//Электросвязь-1994.-№ 5
55. **Витязев В.В.** Процессорные модули обработки сигнале» // Мир ПК, — 1995. — № 4.
56. **Витязев В.В.** Микропроцессоры в системах управления: цифровые процессоры обработки сигналов/Учеб, пособие. — Рязань: РГРТА,1996. — 72 с.
57. **Сверхбольшие интегральные схемы и современная обработка сигналов / Под ред. С. Гуна, Х. Уайтхауса, Т.Кайлата.** — М.: Радио и связь, 1989. — 472 с.
58. Цифровой процессор обработки сигналов TMS32010 и его применение / Под ред. А.А. Ланнэ. — Л.: ВАС, 1990. — 296 с.
59. **Витязев В.В.** Оптимальное проектирование многоступенчатых структур цифровых фильтров на процессорах обработки сигналов // Электросвязь. —1992, № 4.
60. **Цифровые процессоры обработки сигналов: Справочник / А.Г. Остапенко, С.И. Лавлинский. А.Б. Сушков и др.** — М.: Радио и связь, 1994. — 264 с.
61. Chassaing R. Digital signal processing with C and the TMS320C30. Chichester: Wiley. — 1993. — 432 p.
62. **1-я Международная Конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применения», 30 июня — 3 июля 1998 г., Доклады Т.1-Т.7, М., МЦНТИ, 1998.**
63. **Витязев В.В.** Новое в цифровой обработке сигналов // Электросвязь. — 1998, № 10.
64. **Невдяев Л.** Теория и практика цифровой обработки сигналов (по материалам международной конференции DSPA'98) // Сети, — 1998. — № 7, 8.
65. **Coding of moving pictures and associated audio.** ISO/IEC 13818-1, 13818-2, 13818-3.
- G.K. Wallace. The JPEG Still Picture Compression Standard, Comm. of the ACM. — V.34. — No. 4, 1991.
66. **Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений / А.В. Дворкович. В.П. Дворкович, Ю.Б. Зубарев и др.** — М.: НАТ, 1997.
67. **Способ кадравого сжатия изображений / А.В. Дворкович, В.П. Дворкович, Г.Н. Мохин, В.В. Нечпаев // Пат. РФ № 2122295 от 20.11.98.**
68. **Методы анализа и компенсации движения в динамических изображениях / Ю.Б. Зубарев, В.П. Дворкович, В.В. Нечпаев, А.Ю. Соколов // Электросвязь, 1998.— № 11.**
69. **Способ анализа векторов движения деталей в динамических изображениях / А.В. Дворкович, В.П. Дворкович, Ю.Б. Зубарев, А.Ю. Соколов // Заявка на Пат. РФ № 98114418 от 7 авг. 1998.**
70. **Video codec for audiovisual services at p x 64 kbits., ITU-T Recommendation H.261, March 1993.**
Video coding for low bitrate communication., ITU-T Draft Recommendation H.263, January 1998.
71. **Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear prediction (CS-ACELP), ITU-T Recommendation G.729, March 1996**
Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 & 6.3 kbit/s., ITU-T Recommendation G.723.1, October 1995
72. **Дворкович А.В., Дворкович В.П., Мохин Г.Н., Соколов А.Ю.** Компьютерный масштабируемый видеокодек для узкополосных каналов связи / Электросвязь, 1999, в печати.
73. Implementation guidelines for the use of MPEG-2 Systems? Video and Audio in satellite, cable and terrestrial broadcasting applications, ETSI, Technical Report ETR 154, September 1997.
74. **Linde Y., Buzo A., Gray R.** An algorithm for Vector Quantizing Designs., IEEE Trans. Commun. COM-28, Jan 1980.
- Equitz **W.H.** Fast Algorithms for Vector Quantization Picture Coding, M.Sc. Thesis, MIT, June 1984.
75. **Sinkler K.** Very Low Bit-Rate Wavelet Video Coding., IEEE Journal on Selected Areas in Comm.,1998 — Vol.16.— No.1
- Tham J. Y., Ranganath S., Kassim A.** Highly Scalable Wavelet-Based Video Codec for Very Low BitRate Environment, IEEE Journal on Selected Areas in Comm., Vol.16, No.1 1998.
76. **Barnsley M., Hurd L.P.** Fractal Image Compression., A.K. Peters Ltd. Wellesley Massachusetts, 1993
- Hafner U., Albert J., Frank S., Unger M. Weighted Finite Automata for Video Compression, IEEE Journal on Selected Areas in Comm., Vol.16, No.1, 1998.
77. **Новинский Н.Б., Нечпаев В.В.** Проблемы фрактального кодирования изображений., в материалах 1-й Международной Конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», 30 июня — 3 июля, 1998, М., МЦНТИ, книга III.
78. **Зубарев Ю.Б., Дворкович В.П.** Основные проблемы цифровой обработки изображений и использования цифрового телевидения в России // Электросвязь. — 1997. — № 8.
79. **Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services., ETSI, European Standard EN 300 421. — VI.1.2, August, 1997.**
80. **Framing structure, channel coding and modulation for cable systems, ETSI, European Standard EN 300 429. — VI.2.1, April, 1998.**
81. **Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, ETSI, European Standard EN 300 744, VI.1.2, August, 1997.**
82. ATSC Standards.
Ghost canceling reference Signal for NTSC., Documents A/49,1993.

- Digital Audio Compression (AC-3), Documents A/52, 1995.
- ATSC Digital Television., Documents A/53, 1995.
- Guide to the of the ATSC Digital Television., Documents A/54, 1995.
- Program Guide for Digital Television., Documents A/55, 1996. Program/ Episode/Version Identification., Documents A/57, 1996.
- Standard for Coding 25/50 Hz Video., Documents A/63, 1997. Transmission measurement and Compliance for Digital Television., Documents A/64, 1997.
- Program and System Information Protocol for Terrestrial Broadcast and Cable., Documents A/65, 1997.
83. **Multipoint** Video Distribution System (MVDS) at 10 GHz and above., ETSI, European Standard EN 300 748, VI.1.2, August, 1997.
- Microwave Multipoint Distribution System (MMDS) below 10 GHz., ETSI, European Standard EN 300 749, VI.1.2, August, 1997.
- Interaction channel for Local Multipoint Distribution Systems (LMDS), ETSI, Draft European Standard EN 301 199, VI.1.1, July, 1998.
- Guidelines for the Implementation and Usage of the DVB Interaction Channel for Local Multipoint Distribution Systems (LMDS), ETSI, Draft Technical Report TR 101 205.
84. **Lee B.-G., Kang M.-H., Lee J.-H.** Broadband Telecommunications Technology., 2nd ed. Artech House, 1996.
85. **Multipoint** extension for broadband audiovisual communication systems and terminals., ITU-T, Recommendation H 310v2, September, 1998.
- Broadband audiovisual communication systems and terminals., ITU-T, Recommendation H.247, September, 1998.
- Adaptation of H 320 visual telephone terminals to B-ISDN environments., ITU-T, Recommendation H 321v2, February, 1998.
86. Дворкович В.П., Дворкович А.В., Макаров Д.Г. Высокоточные измерения параметров и качественных показателей телевизионного канала // Метрология и измерительная техника в связи. — 1998. — № 3.