

## ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ НА ВСТРАИВАЕМЫХ ПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ

© 2010 г. С. И. Федоренко, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,  
механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: sergeyfed@mail.ru

Проведен анализ существующих методов проектирования встраиваемых процессорных систем и соответствующей аппаратной базы для них с точки зрения построения систем, включающих в себя обработку изображений. Сделаны выводы о возможных конфигурациях такого рода систем и необходимой для этого элементной базы. Далее указаны основные принципы построения систем обработки изображений и принципы оптимизации существующих алгоритмов для двух выбранных методов проектирования с использованием конфигурируемых систем на кристалле и процессоров цифровой обработки сигналов.

**Ключевые слова:** обработка изображений, встраиваемые процессорные системы, конфигурируемые процессорные ядра, оптимизация алгоритмов.

Коды OCIS: 150.1135, 150.4065

Поступила в редакцию 25.05.2010

### Введение

В последние несколько десятилетий стремительно развивается микроэлектронная промышленность, что позволяет создавать все более сложные алгоритмы обработки информации и управления в компактном исполнении. Это дает возможность постоянно повышать уровень сложности реализуемых задач, например, в приложениях компьютерного зрения как в одной из самых востребованных областей на современном этапе развития цифровых компьютерных технологий.

Компьютерное зрение требуется на производстве, при управлении роботами, при автоматизации процессов, при наблюдении со спутников, в военных и медицинских приложениях и многих других областях. Поскольку существует постоянная тенденция к миниатюризации создаваемых систем, одним из важных приложений компьютерного зрения является обработка изображений “на борту” в автономных мобильных роботах, для создания которых применяются встраиваемые процессорные системы.

Основной областью применения встраиваемых систем долгое время были задачи космического и военного назначения. В современном мире

встраиваемые системы можно найти в самых различных областях – от той же военной техники до различных бытовых устройств. Основной особенностью в проектировании встраиваемых систем является изначальное построение программно-аппаратного комплекса под заранее известный набор фиксированных задач. При этом сам процесс проектирования встраиваемой системы состоит в построении спецификаций ее аппаратных и программных компонентов, пригодных для производства реальных устройств и выполняющих требуемые функции с учетом заданных ограничений, таких как быстродействие, энергопотребление, размер и стоимость.

В первом разделе данной работы обозначаются важнейшие проблемы проектирования встраиваемых процессорных систем и существующие пути их решения, рассматриваются современные тенденции процесса проектирования встраиваемых процессорных систем (ВсС), дается описание систем на кристалле.

Во втором разделе проводится обзор возможностей современной элементной базы с точки зрения построения ВсС, включающих в себя обработку изображений. В настоящее время для построения встраиваемых систем с обработкой изображений применяют два подхода: с ис-

пользованием процессоров цифровой обработки сигналов и с использованием современных программируемых пользователем вентильных матриц (ППВМ), создаваемых на базе сверхбольших интегральных схем (СБИС).

В третьем разделе указываются основные моменты, важные для выбора метода проектирования ВсС, и перечисляются возможные конфигурации для построения современных систем обработки изображений.

Четвертый раздел посвящен принципам оптимизации алгоритмов обработки изображений и основным требованиям, предъявляемым к ним для применения в разрабатываемых ВсС на базе двух выбранных конфигураций.

В заключение обсуждаются возможные пути создания новых и адаптации существующих систем обработки изображений.

## 1. Обзор методов проектирования встраиваемых систем

Для эффективного проектирования встраиваемых процессорных систем независимо от стартового состояния работ (проводится совершенно новая разработка “с нуля” или связанная с переносом разработанных ранее алгоритмов для обычных персональных компьютеров на платформу ВсС для их дальнейшей оптимизации) сначала необходимо получить представление о существующих методах проектирования ВсС и возможностях современной элементной базы.

Специалисты проектирования ВсС отмечают возникновение системного кризиса в 1990-е годы в проектировании встраиваемых систем, заключающегося в следующих выявленных проблемах [1, 2]:

- Повышение уровня “строительных кирпичей” при отсутствии комплексной оптимизации и верификации привело к эффекту насыщения в достижимой сложности и качестве конечного продукта.

- Раздельное проектирование программных и аппаратных компонент вызвало трудности оценки надежности и тестирования таких систем.

- Рынок встраиваемых систем требует постоянного усложнения систем за все более короткие сроки.

В свете решения этих проблем получили активное развитие работы по созданию новых методик проектирования ВсС. Одним из результатов таких работ является применение подхода, основанного на виртуальном прототипировании, заключающемся в программной симуляции

модели разрабатываемого электронного устройства. При этом модель может включать один или более процессоров, шины, периферийные устройства и даже модели механических подсистем, являющихся частью общей проектируемой системы. Виртуальный прототип позволяет выполнить тот же код, что и реальное устройство, точно воспроизводя его поведение в реальном времени.

Вторая из указанных выше проблем привела к появлению нового направления в проектировании систем, получившего название “*Hardware-Software Codesign*”, заключающегося в параллельном проектировании аппаратной и программной частей проекта. Ранее применялся устаревший подход разработки ВсС, в котором разработка аппаратной части всегда предшествовала разработке программной части системы. Очевидно, что разработку программной и аппаратной частей желательно совместить во времени и сразу же решать проблемы их взаимного влияния.

Наиболее известными методиками данного направления являются:

- Платформенно-ориентированное системное проектирование, позволяющее снизить стоимость разработки и самих систем за счет повторного использования разработанных компонент систем и применением программных платформ – абстрактного уровня взаимодействия программы с аппаратурой. Этот подход имеет преимущества в гибкости и скорости разработки систем по этой методике, однако по истечении определенного периода времени необходимо вносить изменения в выбранную платформу для ее адаптации к современной элементной базе и новым требованиям рынка.

- Использование интегральных схем с высокой степенью интеграции – систем на кристалле (SoC – *System-on-a-Chip*), на которых размещается большое количество разнородных элементов, таких как процессор, память, периферийные блоки, тестовые схемы, схемы сопряжения с объектом и др. Данный подход имеет наивысшую тенденцию успешного развития, однако, в нем наблюдается сильный аппаратный уклон – сказывается изначальная ориентированность на аппаратные реализации. В последнее время именно эта методика бурно развивается благодаря меньшим затратам на разработку и сопровождение.

Одним из способов использования SoC было создание заказных интегральных схем (ИС) с большим числом элементов и со сложной внут-

ренной структурой, предназначенных для решения конкретных задач. Такие схемы, относящиеся к классу ASIC (*application-specific integrated circuit*), получили широкое распространение во всем мире, поскольку это было единственным приемлемым решением при создании сложных изделий микроэлектроники [3]. Однако заказные ИС доступны только для конечного продукта при условии его большого тиража и длительного срока активного использования. Также необходимо учитывать невозможность проведения любых изменений после начала выпуска ИС, что особенно актуально для быстро эволюционирующих сегментов рынка – телекоммуникаций, сетевых и мультимедийных приложений и пр. Очевидно, что в данном случае более предпочтительны программируемые, конфигурируемые решения, которые могут быть изменены как на стадии разработки, так и в полевых условиях.

Значительная часть таких конфигурируемых проектов в начале 2000-х годов разрабатывалась в виде печатной платы как комбинация микросхем программируемой и жесткой логики, аналоговых блоков, микроконтроллеров, массивов памяти и фиксированных периферийных узлов. Однако, несмотря на возможность быстрого создания разнообразных, быстро меняющихся проектов, они не могли реально конкурировать с интегральной микросхемой системного уровня интеграции (SLI – *System Level Integration*). Последние сочетают в себе преимущества традиционных заказных изделий класса ASIC, микросхем программируемой логики и интегрирующих широкий диапазон системных ресурсов для большей функциональности. Изделия нового поколения, выполняемые по идеологии SLI, стали называть “система на кристалле”. Интеграция всех основных системных узлов на одной системно-ориентированной микросхеме обеспечивает снижение потребляемой мощности, повышение производительности, уменьшение цены конечного изделия в целом, повышение надежности из-за существенного уменьшения количества паяных соединений. Указанные преимущества важны в следующих областях: системы телекоммуникаций и связи, информационные сети, цифровое телевидение, радионавигация, мультимедийные приложения и бытовая электроника.

Система на кристалле может включать как цифровые, так и аналоговые блоки. Основным цифровым блоком обычно является процессор, выполняющий программную обработку цифровых данных. Специализированные блоки обра-

ботки обеспечивают аппаратное выполнение функций, специфических для данной системы. Это могут быть, например, блоки цифровой обработки сигналов, аналоговые схемы, преобразователи потоков данных и другие устройства. Различные типы модулей памяти (статическое и динамическое ОЗУ, масочное ПЗУ, программируемое и перепрограммируемое ПЗУ, флэш-память и др.) могут входить в состав SoC или подключаться к ней как внешние блоки. Таймеры, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, широтно-импульсные модуляторы и другие цифровые устройства могут интегрироваться в состав SoC в качестве периферийных устройств. Интерфейс с внешними устройствами обеспечивается с помощью параллельных и последовательных портов, различных шинных и коммуникационных контроллеров и других интерфейсных блоков, в том числе аналоговых (усилителей, преобразователей). Состав блоков, интегрируемых в конкретной SoC, изменяется в зависимости от ее функционального назначения. Организация связей между блоками системы также может быть различной – возможно использование различных стандартизованных шин или специализированных локальных интерфейсов.

Итак, система на кристалле содержит как минимум три блока: процессор, память и логику, что исключает применение многочисленных отдельных ИС и реализацию интерфейсов связи между ними. Причем однокристалльное конфигурируемое или программируемое решение, очевидно, является здесь более предпочтительным, так как допускает оперативное изменение своей внутренней аппаратной структуры и конечного предназначения как на этапе производства, так и в полевых условиях. Такие ИС относятся к группе изделий SLI и получили другое название – конфигурируемые системы на кристалле (CSoC – *Configurable System-on-a-Chip*). Эти системы являются интегральными устройствами, объединяющими встроенный процессор, программируемую логику, память и прочие вспомогательные ресурсы и блоки на одном-единственном кристалле. При этом все эти блоки соединяются между собой внутри кристалла с помощью оптимизированного интерфейса. Необходимо отметить ключевую особенность CSoC – выполнение процессора в виде отдельного технологически законченного аппаратного узла, размещенного не в массиве программируемой логики, что позволяет получить производительность, сравнимую с ASIC.

## 2. Современная элементная база систем обработки изображений

В настоящее время для построения встраиваемых систем с обработкой изображений можно применять два подхода: с использованием процессоров цифровой обработки сигналов и на базе современных ППВМ. Рассмотрим далее каждый подход в отдельности.

### 2.1. Процессоры цифровой обработки сигналов

Процессоры цифровой обработки цифровых сигналов (ПЦОС) используются для обработки оцифрованных аналоговых сигналов в режиме реального времени. Сначала они создавались для выполнения простых операций цифровой обработки: цифровых фильтров, быстрого преобразования Фурье, косинусного преобразования и др., которые оперировали с целыми 16-битными числами. В настоящее время ПЦОС является базовым элементом в построении систем беспроводных коммуникаций, систем обработки аудио- и видеосигналов. Наиболее часто используемая операция, исполняемая ПЦОС, математически может быть представлена выражением

$$c \cdot x = \sum_{k=0}^{N-1} c_k x_k,$$

представляющим собой скалярное произведение векторов  $c$  и  $x$  длины  $N$ . Выполнение такой операции зависит от времени проведения операции умножения и от эффективности доступа к памяти для выборки элементов обоих массивов. Первые ПЦОС имели аппаратный умножитель, выполнявший операцию умножения за один такт, имелись также бит-реверсивные и циркулярные схемы адресации, позволявшие обращаться к элементам массивов без необходимости операции коррекции указателей. Для этого вводилась комбинированная операция сложения и умножения вида " $S := S + ab$ ", которая позволяла проводить внутренний цикл суммирования всего за один такт. Устройство, выполняющее эту операцию, получило название МАС (*Multiplier-Adder Combination*). Отметим применимость данного устройства для оптимизации большинства матричных операций. Можно выделить следующие важные черты ПЦОС:

- подсистема памяти имеет гарвардскую архитектуру,

- медленная работа с внешней памятью,
- конфигурируемая быстрая дорогая кэш-память,
- исполнительные устройства функционируют параллельно,
- автоинкрементная, декрементная и циркулярная адресации в командах доступа к памяти,
- наличие небольшого конвейера,
- поддержка МАС с аккумуляторами (40, 64 и 80 бит),
- прогнозируемость выполнения программ в реальном времени,
- поддержка формата с фиксированной плавающей точкой и практически полное отсутствие поддержки чисел с плавающей точкой.

Однако основной сложностью во внедрении ПЦОС в настоящее время является отсутствие эффективных компиляторов, что связано главным образом с их ориентированностью на решение определенных задач. С точки зрения программирования ПЦОС представляют собой довольно сложные архитектуры, которые для получения соответствующего быстродействия должны тщательно программироваться.

Далее рассмотрим второй подход построения ВСС с обработкой изображений с применением современных микросхем ППВМ.

### 2.2. Микросхемы ППВМ

Очередным шагом в развитии технологий создания CSoC стало применение реконфигурируемой системы на кристалле на базе программируемых пользователем вентильных матриц – микросхем ППВМ (*FPGA – field-programmable gate array*) большой емкости, имеющих сотни тысяч эквивалентных логических вентилей и больше, относящихся к классу СБИС.

В роли процессора в системах CSoC могут выступать аппаратные или синтезируемые (конфигурируемые) процессорные ядра, основным преимуществом которых является высокая производительность, однако их применение ограничено, а стоимость – более высокая. Конфигурируемые ядра обладают значительной гибкостью, низкой стоимостью, небольшим объемом используемых ресурсов и возможностью применения в самых распространенных и доступных семействах ППВМ, что позволяет успешно применять их в различных проектах. Все современные мощные ППВМ уже содержат готовые к использованию микропроцессорные ядра, которых может быть несколько в одном кристалле, что позволяет строить мультипро-



цессорные системы внутри одной ППВМ. Причем с точки зрения коллектива разработчиков, речь идет о разработке обычной процессорной системы и ее программировании на языке Си.

Главное преимущество аппаратных микропроцессорных ядер – в возможности функционирования с высокими тактовыми частотами. Следствием этого является более высокая производительность по сравнению с конфигурируемыми ядрами. К недостаткам аппаратных ядер можно отнести ограниченное число кристаллов, в которых они применяются, и их высокую стоимость.

Повышение сложности проектируемых СБИС и жесткие требования к срокам их проектирования привели к появлению идеологии использования готовых блоков для построения SoC. Блоки, предназначенные для использования в разнообразных проектах, стали называть IP (*Intellectual Property*) блоками [4]. Они имеют две основные формы представления: в виде топологических фрагментов, которые могут быть непосредственно созданы в физической структуре кристалла (аппаратно реализованные блоки) и в виде моделей на языке описания аппаратуры, которые средствами систем автоматизированного проектирования могут быть преобразованы в топологические фрагменты для использования на кристалле (синтезируемые блоки) [5]. Таким образом, разработчик может либо непосредственно “вмонтировать” в структуру проектируемой СБИС топологически готовый IP-блок, либо использовать имеющуюся модель IP-блока и выполнить его схемотехническое и топологическое проектирование в составе реализуемой SoC.

В процессе проектирования SoC разработчик имеет возможность выбора следующих решений: самостоятельная разработка необходимых IP-блоков, покупка IP-блоков у ведущих разработчиков и производителей микросхем, поиск и применение IP-блоков, предоставляемых в открытом доступе (например, [www.opensource.com](http://www.opensource.com)). Каждый из этих вариантов имеет свои достоинства и недостатки. Самостоятельная разработка всех IP-блоков может привести к увеличению сроков проектирования и задержке выпуска конечного изделия. А их покупка сопряжена с определенными финансовыми затратами, повышающими стоимость разработки. Применение IP-блоков, имеющих в свободном доступе, возможно только после их тщательной верификации, что требует обычно значительных временных затрат.

Основные компании-производители ППВМ поставляют на рынок полный набор продуктов для разработки встраиваемых микропроцессорных систем любой сложности с центральным конфигурируемым процессором вместе со средствами хранения информации. Недостатками этого подхода является сильная аппаратная направленность получаемого проекта ВcС и слишком медленная скорость моделирования.

Перечислим основные преимущества применения ППВМ, важные для создания ВcС обработки изображений:

- большой удельный вес ресурсов, пригодных для цифровой обработки сигналов,

- возможность реконфигурирования при необходимости делает микросхемы ППВМ большой емкости привлекательными для достижения программируемого системного уровня интеграции [6],

- операции умножения независимых операндов выполнены в виде аппаратных модулей (например, *Xilinx Spartan-3* может иметь до 126 таких модулей, способных работать на тактовой частоте 250–300 МГц),

- поддержка на аппаратном уровне операций МАС позволяет обеспечить высокую производительность систем (например, *Xilinx Virtex5* имеет 1056 таких блоков, работающих на частоте 550 МГц [7]),

- поддержка распараллеленных алгоритмов – ППВМ способны параллельно выполнять десятки и даже сотни операций, что является проблемой для большинства ПЦОС.

Среди недостатков применения ППВМ в системах обработки изображений необходимо отметить следующие:

- сложность оптимального программирования из-за вынужденного использования языков описания аппаратуры HDL (*hardware description language*),

- довольно низкая частота синтезируемых ядер, приводящая к недостаточному быстродействию алгоритмов обработки изображений, выполняемых непосредственно на этих ядрах,

- конечная цена на эти микросхемы все же остается достаточно высокой и не может конкурировать с ценами на такие же изделия, выполненные как ASIC, что зачастую ограничивает применение ППВМ большой емкости для реализации проектов массового назначения,

- длительный цикл разработки. Применение микросхем ППВМ большой емкости позволяет значительно сократить время цикла разработки

проекта, однако проекты на микросхемах ППВМ емкостью уже от ста тысяч эквивалентных вентиля требуют для своей разработки значительных временных затрат.

В настоящий момент методика интеграции в составе одной ППВМ всех системных функций, включая процессорные, пока не получила широкого распространения. В большинстве проектов ППВМ используются совместно с микропроцессорами и микроконтроллерами, выполняя различные функции специальной обработки данных. Однако ведущие производители ППВМ активно предлагают разработчикам синтезируемые процессорные IP-блоки, обеспечивающие достаточно высокие характеристики при использовании ограниченных ресурсов кристалла.

### 2.3. Выводы

В заключение подведем итоги проведенного обзора.

Основным способом создания SoC является использование заказных ИС класса ASIC или однокристальных CSoc, причем последние предпочтительнее благодаря высокой интеграции в них различных компонент ВcС, а также большей гибкости за счет возможности реконфигурации.

Современные микросхемы ППВМ наилучшим образом подходят для создания реконфигурируемой аппаратной платформы для обеспечения гибкой реакции на изменяющиеся требования. Эти устройства способны существенно повысить эффективность ВcС с большим удельным весом уникальных схемотехнических решений и высокой производительностью. Также для систем реального времени несомненным преимуществом является самостоятельность создаваемых в ППВМ подсистем благодаря появлению выделенных аппаратных ресурсов, не требующих вмешательства со стороны центрального процессора.

Применение ППВМ при проектировании влечет за собой сложный процесс разработки проекта и высокую стоимость конечного решения. Большим преимуществом является реконфигурируемость платформы, что позволяет даже небольшой проектной фирме иметь 1–2 платформы и строить на их базе большое количество решений.

В настоящее время синтезируемые ядра ППВМ имеют недостаточное быстродействие для алгоритмов обработки изображений, выпол-

няемых непосредственно на этих ядрах. Поэтому для построения современных систем обработки изображений применяются аппаратные ядра в составе ППВМ, а также специализированные ПЦОС с более высоким быстродействием.

### 3. Принципы проектирования систем обработки изображений

При проектировании систем обработки изображений необходимо учитывать планируемый тираж, стоимость разрабатываемой системы, возможность и необходимость дальнейшего ее расширения, стоимость систем проектирования и их поддержки, а также накопленные знания в разработке аппаратной и программной частей систем.

Существующие системы построения ВcС позволяют проектировать значительно различающиеся по своим возможностям системы от контроллеров с простой логикой вплоть до сложнейших многопроцессорных систем обработки информации в режиме реального времени. Однако для построения систем обработки изображений остается лишь небольшое число возможных конфигураций.

Таковыми системами могут быть системы со специализированными вычислителями на основе ППВМ с возможностью интеграции большого количества различных ядер и алгоритмов цифровой обработки сигналов в одном устройстве. Примерами таких устройств являются микросхемы *Spartan* и *Virtex* компании *Xilinx*, *Stratix* и *Cyclone* компании *Altera*. Недостатком этого подхода является необходимость повторного проектирования с учетом особенностей выбранной ППВМ для существующей системы, разработанной ранее для применения на обычном процессоре. Однако благодаря постоянному развитию возможностей и скорости работы процессорных ядер ППВМ проектировать новые системы на их основе становится все более привлекательным.

Системы с применением современных процессоров ПЦОС, наиболее известными из которых являются TMS320C62xx/C64xx (*Texas Instruments*), SC140 и TigerSHARC (*Analog Devices*), DSP5665x (*Motorola*) и др., также могут использоваться для построения систем обработки изображений. Такие системы дают возможность быстрого перевода существующих алгоритмов обработки изображений с обычных процессоров на современные ПЦОС. В этом случае необходимо только провести дополнительную

оптимизацию существующего программного кода под выбранный процессор, если в этом имеется необходимость.

В настоящее время наиболее популярным методом проектирования ВcС является применение связки “процессор + ППВМ”, где ППВМ используется в роли мощного параллельного вычислителя, выполняющего основной объем несложных операций с большим количеством данных в потоковом режиме. А процессор служит аппаратной основой для реализации сложных алгоритмов верхнего уровня – постобработки, управления, мониторинга, интерфейсных функций и др. В роли процессора может быть любой микроконтроллер, удобный с точки зрения архитектуры, встроенной периферии и инструментов разработки, но не обладающий достаточной производительностью в “поточных” задачах.

Кроме этого, в связке “процессор + ППВМ” возможно применение ППВМ в качестве сопроцессора, ускоряющего работу основного процессора. Соответственно, основное внимание разработчика по доводке характеристик, алгоритмов и функциональности уделяется именно процессору и программам для него, а не ППВМ.

На практике также встречается связка “процессор + ППВМ + ПЦОС”, где ППВМ является мощным параллельным вычислителем для данных в потоковом режиме (такими данными, например, могут являться пикселы всего изображения). ПЦОС предназначен для работы алгоритмов обработки данных, не поддающихся распараллеливанию (например, достаточно сложных алгоритмов анализа изображений), а процессор в связке используется только для управления, мониторинга, интерфейсных функций и др.

Необходимо отметить, что при проектировании ВcС на основе ППВМ у разработчика имеется большая библиотека уже готовых элементов для решения типовых задач цифровой обработки сигналов, которые легко переносятся в реальные микросхемы, представленные на языках описания аппаратуры HDL. При этом весь проект не обязательно создавать на языке HDL, поскольку наиболее часто корректируемые алгоритмы выполняются процессором, реализованным в виде процессорного ядра, который может программироваться на языке Си. Однако, как отмечено выше, пока такие ядра не обеспечивают быстроедействие, необходимого в системах обработки изображений.

#### 4. Принципы оптимизации алгоритмов обработки изображений

В данной статье под оптимизацией понимается процесс адаптации существующего алгоритма обработки изображений под выбранную аппаратную платформу.

Для успешного применения ПЦОС в проектируемой системе необходимо оптимизировать процесс вычислений программы на конкретной архитектуре процессора с учетом имеющихся видов параллелизма данной программы для эффективного использования особенностей архитектуры новейших ПЦОС. Также необходимо и эффективно использовать преимущества гарвардской архитектуры – например, распределять переменные по разным пространствам памяти, особенно для фильтрации и матричных операций. При этом следует учитывать особенности генераторов адреса в некоторых ПЦОС, требующих размещения переменных, к которым производится доступ в пределах нескольких тактов, в соседних адресах памяти (например, в стеке локальных переменных процедуры).

В случае использования решений на основе CSoc при оптимизации алгоритмов обработки изображений необходимо учитывать такие параметры, как размер кэш-памяти данных выбранного процессорного ядра, размер внутренней памяти SoC, наличие поддержки блоков MAC в ядре для создания кода с выделением таких блоков. При этом необходимо также минимизировать все обращения к внешней памяти и сделать их прогнозируемыми для создания эффективного кода компилятором, запретить выделение динамической памяти в режиме реального времени при отсутствии своего менеджера памяти. Обязательно следует использовать библиотечные функции и модули, соответствующие выбранному процессорному ядру.

При проведении дополнительной оптимизации выполнения программного кода необходимо использовать возможность максимальной подстройки к процессорному ядру. Для этого проводится анализ наиболее часто востребованных команд с целью генерации новых команд ядра, наилучшим образом подходящих именно к данному выполняемому программному коду. В случае необходимости очередного шага ускорения работы полученного кода требуется оптимизировать процесс вычислений алгоритма для повышения эффективности использования ядер из-за недостаточной оптимизации кода, созданного существующими компиляторами.

## Выводы

Выбор метода проектирования является достаточно сложным и неопределенным шагом процесса создания ВcС, учитывая неразрывную связь методов с выбираемой элементной базой. В настоящий момент можно утверждать, что использование CSoC является перспективным направлением развития проектирования систем, но, однако, не является универсальным средством применения в реальных системах обработки изображений из-за низкого быстродействия дешевых синтезируемых ядер и крайне высоких цен на аппаратные ядра ППВМ, имеющие, однако, более высокое быстродействие.

Поэтому на практике популярным методом построения систем обработки изображений в настоящее время является применение связки “процессор + ППВМ”, где ППВМ используется в роли мощного параллельного вычислителя, выполняющего основной объем несложных операций с большим количеством данных в потоковом режиме. Однако этим методом можно пользоваться только для создания новых систем обработки изображений, так как он практически всегда требует построения принципиально нового алгоритма обработки данных, учитывающего как параллелизм процессов обработки, так и потоковый характер получаемых данных с различных устройств цифровой регистрации изображений.

Для использования существующих алгоритмов обработки изображений необходимо проводить их адаптацию для получения высокого быстродействия даже для ПЦОС, что требует

значительных усилий разработчиков. Однако в настоящий момент этот путь является единственно возможным способом применения существующих алгоритмов при построении современных систем обработки изображений на новых встраиваемых платформах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кравченко В., Радченко Д.* Виртуальное прототипирование для аппаратно-программной верификации СБИС // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес.* 2003. № 7. С. 1–4.
2. *Постников Н.П.* Поведенческий и инструментальный аспекты проектирования встроенных вычислительных систем // *Дис. канд. техн. наук.* СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. 186 с.
3. *Кривченко И.* Системы на кристалле: общее представление и тенденции развития // *Компоненты и технологии.* 2001. № 6. С. 4–14.
4. *Шагури И.* Применение IP-библиотек для проектирования СнК // *Электронные компоненты.* 2009. № 1. С. 22–25.
5. *Лисяк Н.К.* Программные продукты проектирования электронных устройств на базе ПЛИС // *Известия ЮФУ. Технические науки.* 2008. Т. 81. № 4. С. 61–68.
6. *Стешенко В., Руткевич А., Бумагин А., Тулин Ю., Воронков Д., Гречищев Д., Евстигнеева Е., Синельникова М.* Опыт разработки СБИС типа СнК на основе встроенных микропроцессорных ядер // *Компоненты и технологии.* 2008. № 10. С. 67–72.
7. *Зотов В.Ю.* Проектирование встраиваемых микропроцессорных систем на основе ПЛИС фирмы XILINX. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 522 с.