

НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВИДЕОСИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ

© 2012 г. В. В. Березин*, доктор техн. наук; Ш. С. Фахми**, доктор техн. наук;
А. К. Цыцулин**, доктор техн. наук.

* ФГУП НИИ Прикладных проблем, Санкт-Петербург

** ОАО “Научно-исследовательский институт телевидения”, Санкт-Петербург

E-mail: atsytulin@mail.ru

Предложена методика начального этапа проектирования видеосистем, включающая структурный и параметрический синтез объединенных на одном кристалле устройств фотоприема и кодирования. Обоснован подход к синтезу видеосистем на кристалле, использующий показатель эффективности, учитывающий взаимосвязь сложности и скорости передачи. Предложен метод распределения площади кристалла между фотоприемником и вычислителем. Рассмотрена концепция параллельного ввода видеоинформации из фотоприемника в вычислитель.

Ключевые слова: проектирование видеосистем на кристалле, взаимообмен сложности и скорости передачи, распределение площади кристалла.

Коды OCIS 100.2000, 150.4065, 150.6044

Поступила в редакцию 18.06.2012

Введение

Тенденция развития видеоинформационных систем получила дополнительный импульс благодаря освоению новых технологий и современных систем автоматического проектирования (САПР) на их основе, в первую очередь, технологии “система на кристалле” с проектными нормами 90 нм и менее [1].

Создание сложных видеоинформационных систем и внедрение новых методов кодирования сопровождается значительными изменениями в методах проектирования, изменениями требований к квалификации проектировщика. При этом важнейшей проблемой системных исследований становится совершенствование маршрута проектирования с целью достижения оптимальных параметров систем обработки видеоинформации. В роли системного критерия оптимальности видеоинформационных систем должна выступать совокупность (взвешенная сумма) информационных показателей (точности, скорости передачи, сложности), позволяющая на ранних стадиях проектирования решить проблему формирования требований к проектируемой системе в целом [2]. Для решения данной проблемы учитываются три принципиальные особенности видеосистем на кристалле (ВСнК):

а) кроме скорости передачи и точности в ВСнК необходимо учитывать сложность обработки (число операций, необходимых для кодирования изображений);

б) проектирование ВСнК – неразрывный процесс, не допускающий декомпозиции системы на подсистемы, в ходе которого фотоприемник и вычислитель оптимизируются совместно;

в) при создании быстродействующих ВСнК следует опираться на модель с множественным потоком данных и включать в принятый маршрут проектирования определение степени параллелизма передачи сигналов от массива фотоприемных элементов к кодеру-вычислителю.

Системный уровень проектирования

Проектирование видеосистем на кристалле предполагает единство вопросов фотоэлектрического преобразования, микроэлектроники и аппаратно-программного обеспечения и имеет свою специфику, выражающуюся в создании специализированных САПР [3]. Упрощенная типовая последовательность процедур при проектировании сверхбольших интегральных схем (СБИС) класса “система на кристалле” (СнК) включает следующие этапы [1]: разработка архитектуры системы, функциональ-

ное, логическое и топологическое проектирование.

Очевидно, что при нисходящем проектировании в большинстве предшествующих процедур приходится задаваться ориентировочными данными, истинные значения которых становятся известными только после выполнения последующих процедур. Это обуславливает итерационный характер процесса проектирования с возвратами от последующих этапов к предыдущим, что существенно увеличивает затраты на проектирование [2]. Поэтому усилия разработчиков системных вопросов создания САПР направлены на поиск методов сокращения числа итераций в цикле проектирования СБИС. Такой поиск привел к положительным результатам в следующих двух направлениях [1].

Во-первых, это технологии так называемого “физического” проектирования, в которых уже на ранних этапах проектирования (архитектурном и регистровом) стараются учесть физические параметры задержки, рассеиваемые мощности и др. Во-вторых, это разумное сочетание элементов нисходящего и восходящего проектирования, при котором на ранних этапах проектирования функции ориентировочно распределяются между блоками, что позволяет проектировать эти блоки независимо друг от друга. И если принятые ранее значения параметров блоков оказываются достигнутыми, то дополнительные итерации не требуются.

Целесообразность внедрения ВСнК в практику приборостроения во многом связана с допустимостью объединения на одном кристалле фотоприемного массива и процессора обработки изображений из-за опасности перегрева кристалла, весьма опасного в силу роста темновых сигналов фотоприемного массива. При этом, чем сложнее обработка в вычислительной подсистеме, тем больше опасность перегрева ВСнК. Поэтому особое внимание при структурном и параметрическом синтезе ВСнК уделяется вычислительной сложности, например, сжатию изображения. Вычислительная сложность большинства стандартных алгоритмов сжатия по-прежнему высока. В то же время разрешение и частота кадров фотоприемных матриц продолжают расти, и время обработки становится “узким местом” у высокоскоростных видеоинформационных систем. В типовых решениях изображение сначала регистрируется, затем сохраняется и лишь только потом сжимается. Хранение значений от-

четов изображения с большим динамическим диапазоном и высоким разрешением приводит к очень жестким требованиям к устройству памяти. Например, типичные приборы с зарядовой связью имеют одинаковые по площади кристалла фотоприемные секции и секции хранения, что является весьма нерациональным. КМОП технология видеосистем на кристалле дает возможность изменения такой парадигмы проектирования путем параллельной и распределенной обработки видеоинформации, в том числе при сжатии. Эта идея была одновременно осознана отечественными и зарубежными специалистами. Американскими исследователями для вещательных систем предложено фазу фотоприема дополнить сжатием на этапе захвата изображения до начала фазы хранения [4]. Этот подход смещает парадигму проектирования видеосистем на кристалле от обычной: фотоприем→хранение→сжатие, на вновь предлагаемую: фотоприем→сжатие→хранение.

Потенциальные преимущества новой парадигмы проектирования: уменьшение площади кристалла кремния, необходимого для организации хранения цифрового массива пикселей, уменьшение требований к устройству памяти, интеграция в кристалл кодера источника и потенциально кодера канала. Отечественными специалистами подобные подходы предложены в прикладных телевизионно-компьютерных решениях, например для стабилизации изображений [5, 6]. Несмотря на различие в областях применения можно констатировать что:

1. Концепция параллельного накопления, давно известная в телевидении, сочетается в КМОП ВСнК с концепцией параллельной обработки (давно известной в вычислительной технике) с использованием относительно новой идеи – параллельных каналов считывания.

2. Принцип последовательной передачи пикселей (телевизионной развертки) модифицируется в последовательную передачу либо спектральных составляющих, вычисляемых пофрагментно для всего кадра изображения, либо результатов классификации изображений (распознавание образов).

Таким образом, уменьшение проектных норм и увеличение сложности ВСнК предъявляет новые требования к методологии проектирования, и все более возрастает необходимость в концептуальном совершенствовании маршрута проектирования на начальном (до системного) уровне (рис. 1) [7, 8].

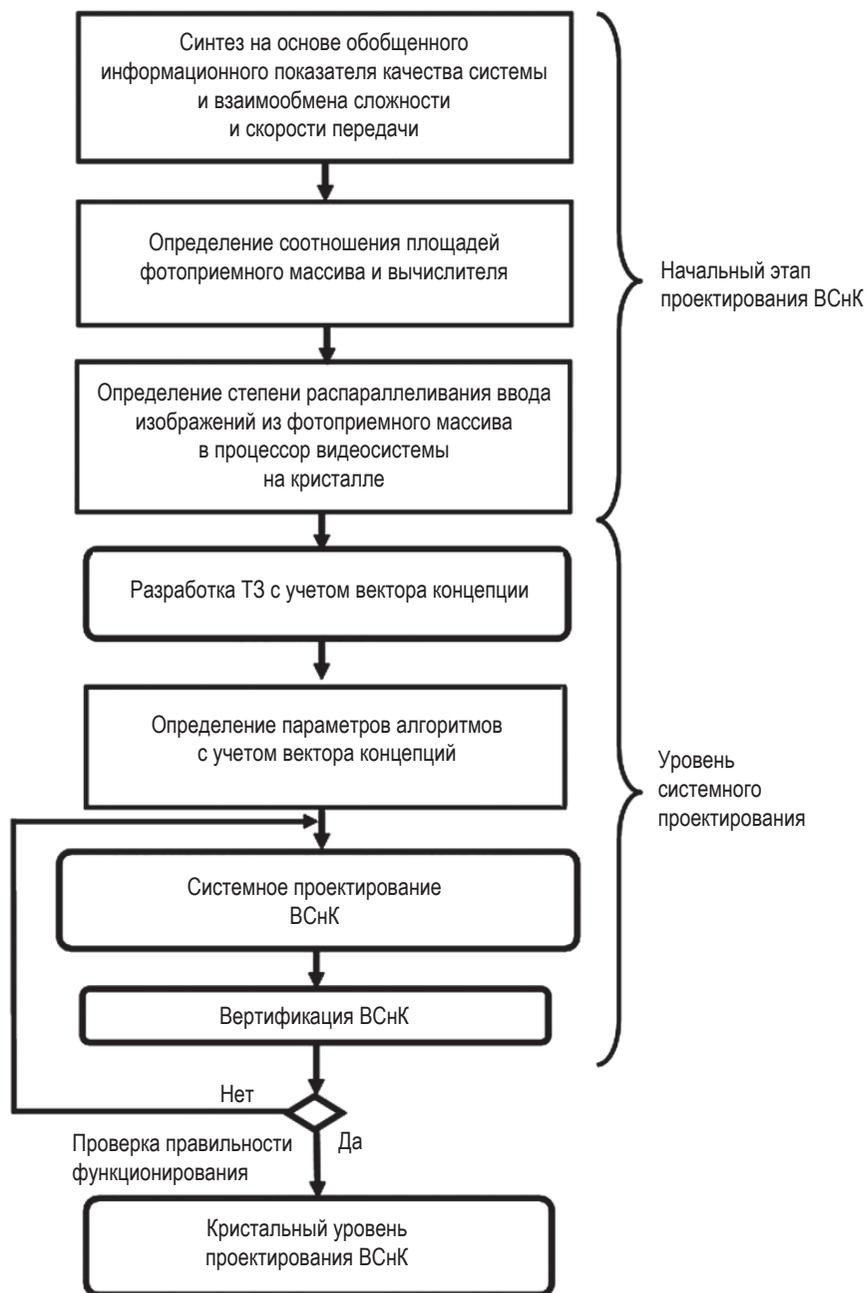


Рис. 1. Начальный этап проектирования видеосистем на кристалле.

Начальный этап создания ВСнК включает следующие проектные процедуры:

а) *Синтез на основе обобщенного показателя эффективности.* Для обеспечения общего информационного подхода к решению задачи оптимизации системы необходимо все частные показатели качества привести к единому виду, имеющему размерность информации (бит). В частности, учет снижения отношения сигнал/помеха следует характеризовать потерей полезной информации ΔI , вычисляемой как логарифм отношения фактической ошиб-

ки к минимально возможной, лимитируемой фотонным шумом. Следуя методике векторного синтеза системы связи [8], целесообразно сформировать обобщенный показатель эффективности P , включающий “вектор концепции системы” $\{c_i\}$ и совокупность $\{P_i\}$ частных информационных показателей качества системы связи – потери полезной информации ΔI , скорости передачи R , сложности W_k кодера и сложности W_d декодера. Так как все частные информационные показатели качества системы связи связаны с ошибкой передачи ϵ , назнача-

емой проектировщиком исходя из требуемого качества видеoinформации (определяемого компромиссом между потерей полезной информации и передачей шумовой информации [9]), то ниже они будут обозначаться как $P_i(\varepsilon)$

$$P = c_0 \Delta I(\varepsilon) + c_1 R(\varepsilon) + c_2 W_k(\varepsilon) + c_3 W_d(\varepsilon) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где c_1 , c_2 и c_3 – весовые коэффициенты, составляющие вектор концепции системы.

Для систем телевизионного вещания характерна ситуация, когда затраты сложности на один кодер пренебрежимо малы по сравнению с совокупными затратами сложности на миллионы декодеров в телевизорах. Для бортовых систем характерна обратная ситуация: цена космического аппарата с учетом его вывода на орбиту много больше цены наземного декодера. Для выявления основных свойств обобщенного показателя качества рассмотрим его частный случай при $c_3 = 0$, характерный для бортовых видеoinформационных систем, акцентирующий внимание на сложности кодера, включаемого в состав ВСнК

$$P = c_0 \Delta I(\varepsilon) + c_1 R(\varepsilon) + c_2 W_k(\varepsilon) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Обобщенный показатель эффективности кодирования (1) и (2) позволяет объективно сравнивать произвольные кодеры, отличающиеся по всем параметрам – ошибке передачи, скорости передачи и сложности, если зафиксировать выборку испытательных сигналов.

Искомый минимум P при вариации назначаемой ошибки передачи ε может быть найден аналитически, если известны статистические свойства источника и зависимости сложности и скорости передачи от назначаемой ошибки. Известно [10], что обобщенный показатель качества допускает множество решений. Это разнообразие решений в первую очередь связано с взаимообменом скорости передачи и сложности кодера [11].

б) *Учет взаимообмена скорости передачи и сложности кодирования.* Минимальная сложность, следующая из существования конструктивного итерационного метода [12] построения кода, связана с передачей лишь тех спектральных компонентов, отношение сигнал/шум в которых превышает порог. Такая зависимость аналогична зависимости энтальпии от спектрального отношения сигнал/шум. Это позволяет формализовать интуитивные представления о взаимосвязи скорости пе-

редачи, сложности и ошибки передачи. По аналогии с энтальпией с задержкой можно ввести понятие об энтальпии при ограничении сложности [8].

Опираясь на экспериментальные исследования по взаимообмену скорости передачи и сложности кодирования [8, 12] можно считать, что, так же, как и в формуле вероятности ошибки для дискретного канала с аддитивным белым гауссовским шумом и с неограниченной полосой частот, требуемое предельное количество информации R и сложность W оказывают одинаковое влияние на ошибку передачи. Такое положение при любом способе вычисления энтальпии можно записать аналитически в виде, объединяющем энтальпию с ограничением сложности H_ε^w и сложности W кодирования в виде функционала, восходящего к гармоническому среднему [8]

$$H_\varepsilon = H_\varepsilon^w W / (H_\varepsilon^w + W). \quad (3)$$

Этот предел достигается лишь при условии использования разложения Карунена–Люэва и стремлении к бесконечности доступной сложности W описания базисных функций и операций вычисления соответствующих скалярных произведений.

Начальный этап проектирования кодера источника на основе выражений (2) и (3) иллюстрируется рис. 2, где показана взаимосвязь трех важнейших величин: ошибки передачи, скорости передачи и сложности (ε – R – W). Из него видно, что при одной и той же ошибке передачи ε_1 переход от способа кодирования Z_1 к способу кодирования Z_2 ценой перехода от сложности W_1 к большей сложности W_2 обеспечивает лучшее приближение к энтальпии

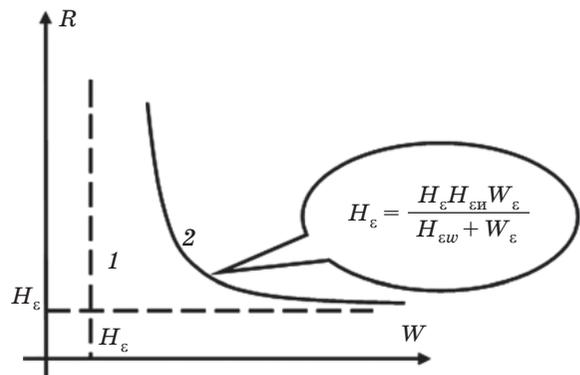


Рис. 2. Взаимообмен скорости передачи и сложности кодера. 1 – запретная область, 2 – область реализуемых кодов.

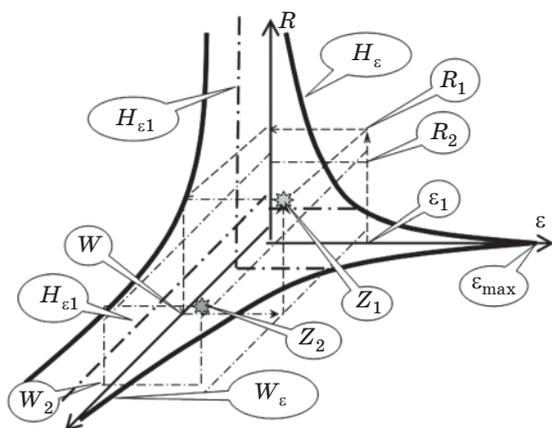


Рис. 3. Взаимосвязь ошибки кодирования, скорости передачи и сложности кодера.

энтропии: $R_2 < R_1$. Уменьшение назначаемой ошибки ведет к увеличению эpsilon-энтропии и сдвигу границы реализуемых кодов на рис. 2 вправо и вверх, на рис. 3 влево и вверх.

Важной иллюстрацией взаимобмена сложности кодера источника и приближения к эpsilon-энтропии является метод создания библиотек базисов для кодирования сигналов с большой априорной неопределенностью. Для достижения максимального сжатия кодер существенно усложняется введением множества устройств хранения информации о различных совокупностях базисных функций и устройства выбора из них наиболее эффективных. Эта же тенденция существенного увеличения сложности для относительно небольшого увеличения сжатия видеoinформации наблюдается и при переходе от стандарта MPEG-2 к стандарту MPEG-4. Вместе с тем сложность различных кодеров при сопоставимых коэффициентах сжатия может существенно отличаться. Например, при кодировании динамических сюжетов использование адаптивного трехмерного дискретного косинусного преобразования (ДКП-3D) позволяет на несколько порядков сократить сложность кодера источника по сравнению с кодером MPEG-4 [13]. Это обусловлено, во-первых, тем, что ДКП является асимптотически оптимальным (при больших размерах фрагментов) разложением стационарного сигнала с экспоненциальной автокорреляционной функцией, хорошо аппроксимирующей реальные изображения. Во-вторых, эти два вида кодеров оптимальны для различных характеристик изменения сюжета во времени: MPEG-4 ориентирован на слежение за объек-

тами, а ДКП-3D выделяет любые изменения в сюжете.

Выбор того или иного способа кодирования непрерывного источника означает выбор конкретного соотношения коэффициентов c_1 и c_2 в обобщенном показателе эффективности (1), а выбор назначаемой ошибки означает выбор отношения коэффициента c_0 при потере полезной информации к коэффициентам c_1 и c_2 . Учет взаимобмена скорости передачи информации и сложности кодера, формализуемый формулой (3), позволяет найти минимум в критерии (1), который достигается при оптимальных значениях скорости и сложности: $\epsilon_0 = \epsilon_{\min} c_0 / [c_0 - (c_1^{1/2} + c_2^{1/2})^2]$.

в) Процедура распределения площади кристалла видеосистем между фотоприемником и вычислителем. Задача распределения площади кристалла между фотоприемной и вычислительной подсистемами имеет место и при создании измерительных систем и при создании систем передачи изображений. Оптимизация распределения площади кристалла между фотоприемной частью кодера источника и собственно цифровым кодером может быть осуществлена по максимуму функционала, включающего взвешенную сумму полезной информации и взятой с обратным знаком переданной кодовой информации с учетом обменного соотношения (3).

В данной подзадаче вектор концепции видеосистемы на кристалле включает не только совокупность весовых коэффициентов $\{c_0, c_1\}$ при варьируемых значениях скорости создания информации и скорости ее передачи, но и не варьируемые ограничения:

- общей площади кристалла S , распределяемой между площадью S_{ϕ} фотоприемной секции и площадью S_w вычислительной секции;
- площади s_t вентиля вычислительной подсистемы, определяемой нормой точности изготовления СВИС
- требуемого (назначаемого) динамического диапазона изменения сигнала пиксела, равного отношению максимального числа электронов Q в пикселе к минимально различимому числу электронов q ; динамический диапазон обычно определяют не только как отношение этих чисел, но и как двоичный логарифм этого отношения, имеющий смысл числа разрядов АЦП, $m = \log_2 Q/q$. Значение динамического диапазона, требуемого от видеосистемы на кристалле, зависит от ее назначения и возможного диапазона изменений освещенности: в массовых

приборах он требует разрядности $m = 8-12$, в специальных приложениях он требует разрядности $m = 12-18$.

Можно показать [6], что для самой распространенной модели случайного процесса – марковского процесса, характеризуемого экспоненциальной автокорреляционной функцией, оптимальная площадь фотоприемной секции будет равна

$$S_{\phi} = S/[1 + m(m - \mu)/2^m] \times \{1 - [c_0/c_1 + (2^m c_0 c_1 - 1)/m(m - \mu)]\},$$

где $\mu = 1/2 \log r$, r – радиус корреляции изображений.

Полученная зависимость оптимального соотношения площадей фотоприемной и вычислительной подсистем в рамках одной ВСнК показывает, что распределение площади целиком определяется вектором концепции ВСнК. При этом требуемая разрядность АЦП и радиус корреляции сигнала изображения влияет на распределение площади значительно слабее, чем отношение весовых коэффициентов c_0 и c_1 при количестве и качестве переданной видеoinформации.

Концепция параллельного ввода изображений в процессор ВСнК

В современных цифровых фотоаппаратах время переноса изображения из фотоприемной матрицы во флэш-ЗУ не является критическим и концепция единственного потока данных сохраняется. Но в видеосистемах реального времени, в частности в бортовых системах, работающих в условиях большой нестабильности положения визирной оси и существенного ограничения на мощность передатчика, требуется проведение большого количества вычислений по коррекции и сжатию изображений за весьма малые промежутки времени.

Системный подход требует отказа от старой концепции единственного потока данных между фотоприемником и вычислителем и переходу к новой концепции распараллеливания потоков видеoinформации не только внутри вычислителя, но и на его входе (рис. 4). Многие специалисты в области создания матричных фотоприемников выдвигали сомнение в целесообразности объединения на одном кристалле фотоприемного массива и процессора обработки изображений из-за опасности перегрева кристалла. Одним из путей преодоления

этой опасности является снижение рабочих частот считывания и обработки изображения. Это может быть достигнуто при существенном распараллеливании не только вычислений, но и ввода видеoinформации в процессор. Идея, развиваемая российскими [6] и американскими исследователями [4], нуждается в широкой пропаганде и внедрении в системы прикладной видеoinформатики.

Множественные потоки данных широко применяются в вычислительной технике и используются при построении моделей, структурных схем и алгоритмов кодирования изображений. Подход к распараллеливанию ввода видеoinформации в вычислительную подсистему ВСнК должен основываться на максимизации количества и качества видеoinформации, концептуально близком рассмотренному в процедуре в) распределению площади ВСнК между фотоприемником и вычислителем. Отличие состоит в том, что оптимизация структуры ВСнК нацелена на увеличение быстродействия (не учитываемое в рамках функционала (1)) и должна осуществляться с учетом какого-либо согласования структуры вычислителя с варьируемым числом каналов связи фотоприемного массива с вычислителем. Например, если будет организован множественный поток данных из фотоприемного массива так, что параллельно считываются n соседних пикселей (например, при 8 – типичном значении



Рис. 4. Функциональная схема распараллеливания считывания и вычислений в видеосистеме на кристалле с кодированием источника.

для формирования фрагментов при дискретном косинусном преобразовании изображений), то такой вид параллельности считывания должен быть ориентирован на структуру вычислителя с одним процессором без буферного ЗУ, но работающего при той же скорости, что и вычислитель при единственном потоке видеоинформации. Если будет организован множественный поток данных так, что параллельно считываются N разнесенных пикселей (например, равном отношении числа пикселей в строке к числу пикселей в кодируемом фрагменте), то такой вид параллельности считывания должен быть ориентирован на структуру вычислителя с N процессорами, снабженными буферными ЗУ, но работающими со скоростью в N раз меньшей.

Следует различать возможные цели распараллеливания считывания:

- борьба с шумами считывания путем снижения частоты считывания. При этом количество каналов считывания (количество АЦП в ВСнК) может достигать числа столбцов в фотоприемной матрице и даже числа пикселей в ней [14]. Вместе с тем такие фотоприемные матрицы содержат лишь цифровые мультиплексоры и сопрягаются с внешним кодером источника через умеренное число каналов связи. Типовое значение числа каналов 10, что при 10–12 разрядном коде становится предельным значением для реализации системы в виде набора СВИС;

- борьба за повышение кадровой частоты ВСнК. При этом количество каналов считывания меньше, чем при требовании снижения шумов считывания, но может достигать числа столбцов в фотоприемной матрице. Целесообразность использования множественных потоков данных в ВСнК может быть проиллюстрирована на примере специальных ВСнК для стабилизации изображений [7, 5].

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Немудров В.Г., Мартин Г. Системы на кристалле. Проблемы проектирования и развития. М.: Техносфера, 2004. 216 с.
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 488 с.
3. Аблогин В.В., Адамов Д.Ю., Зимогляд В.А., Кокин С.А., Макаров С.В., Перминов В.Н., Стешенко В.Б. САПР АВОКАД для проектирования КМОП фотоприемников и аналого-цифровых интегральных схем // Вопросы радиоэлектроники. Серия “Техника телевидения”. 2010. № 2. С. 83–92.

Видеосистемы на кристалле позволяют также реализовать известный в компьютерной технике принцип множественного потока данных. В частности, для скоростной стабилизации изображений формируются дополнительные фотоприемные массивы для измерения смещения изображения с частотой, существенно превышающей частоту считывания кадров основного фотоприемного массива [5].

Заключение

Рассмотренные в статье вопросы приобретают большую значимость и формируются, объединяясь вокруг стержневой идеи системного подхода, в новую процедуру начального этапа оптимального проектирования видеосистем на кристалле, включающего, во-первых, введенную триаду: критерий эффективности видеосистем на кристалле; понятие эpsilon-энтропии с ограничением сложности и функционал, связывающий скорость передачи и сложность; во-вторых, оптимальное распределение площади кристалла между фотоприемной и вычислительной подсистемами с учетом формализованной взаимосвязи скорости передачи и сложности кодера и принцип распараллеливания ввода изображения из фотоприемного массива в кодер-вычислитель.

Данная модификация маршрута проектирования видеосистем на кристалле позволяет рационально объединить эвристические приемы, обобщающие опыт, интуицию и здравый смысл, с математическими методами моделирования, анализа и синтеза. Эти методы ориентированы на формализацию вектора концепции системы, который помогает в принятии решений на начальном этапе проектирования. В результате модифицированный маршрут проектирования должен повышать выход годных изделий и сократить сроки проектирования.

4. *Reichel J., Ziliani F.* Method of selecting among N “spatial video codes” the optimum codes for a same input signal. International Application Number: PCT/IB2003/005852. Priority Data: 17.12.2002.
 5. *Цыцулин А.К., Фахми Ш.С., Манцетов А.А., Малашин О.Д., Зубакин И.А.* Стабилизация изображений на основе измерения их смещения при совместном использовании матричного и двух линейных фотоприемников // *Оптический журнал*. 2012. Т. 79. № 11. С. 67–75.
 6. *Фахми Ш.С.* Модели, методы и алгоритмы кодирования изображений в системах на кристалле. Автореф. докт. дис. СПб.: СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2011. 50 с.
 7. *Цыцулин А.К., Фахми Ш.С.* Видеосистемы на кристалле: новые архитектурные решения в задачах обработки видеoinформации // *Датчики и системы*. 2011. № 4. С. 58–62.
 8. *Зубакин И.А., Цыцулин А.К., Фахми Ш.С.* Начальный этап проектирования кодера источника непрерывного сигнала // *Вопросы радиоэлектроники. Серия “Техника телевидения”*. 2010. № 2. С. 17–32.
 9. *Хромов Л.И., Цыцулин А.К.* Основания космической видеoinформатики // *Вопросы радиоэлектроники. Серия “Техника телевидения”*. 2011. № 2. С. 6–31.
 10. *Гуткин Л.С.* Оптимизация радиоэлектронных устройств. М.: Сов. радио, 1975. 366 с.
 11. *Ричардсон Я.* Видеокодирование. H.264 в MPEG-4 – стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005. 368 с.
 12. *Цыцулин А.К., Фахми Ш.С.* Программа для ЭВМ “Итерационный спектральный кодер изображений” // Свидетельство № 2011614671. Зарегистрировано в гос. реестре изобретений РФ 10.06.2011, RU ОБПТ № 3 (76) ч. II, с. 474, 2011 г.
 13. *Умбиталиев А.А., Цыцулин А.К., Шипилов Н.Н., Ибатуллин С.М., Ибатулин В. Ф., Фахми Ш. С.* Способ кодирования и декодирования видеoinформации на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования // Патент РФ № 2375838. 2009.
 14. *Березин В.В., Умбиталиев А.А., Фахми Ш.С., Цыцулин А.К., Шипилов Н.Н.* Твердотельная революция в телевидении. М.: Радио и связь, 2006. 312 с.
-