

**ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ ПРИ
ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВСТРОЕННЫХ СИСТЕМ****А. Н. Лукичев (Санкт-Петербург)**

Встроенные системы (ВсС) представляют собой вычислительные системы, непосредственно взаимодействующие с объектами управления с помощью датчиков и исполнительных устройств. Принципиальным отличием ВсС от других классов вычислительных систем является то, что их функционирование подразумевает необходимость взаимодействия с физическими процессами (мониторинг текущего состояния и выдача управляющих воздействий). Это требует учета законов и свойств физического мира, в особенности таких, как время и параллелизм процессов.

Гетерогенность ВсС, т. е. присутствие в них разнородных компонентов, обуславливает различие подходов к моделированию отдельных компонентов. Для обозначения системы правил, в рамках которой проводится моделирование, в настоящее время широко используется термин «модель вычислений» [3, 4, 5, 6]. Одной из таких моделей вычислений является модель с дискретными событиями (discrete-event, DE) [1, 3, 6]. Эта модель хорошо подходит для описания цифровой логики (лежит в основе многих языков описания аппаратуры, например, Verilog, System C, VHDL) [6], сетевого взаимодействия [3], систем с очередями, любых систем, в которых вычисления активизируются по спонтанно возникающим событиям с относительно малой интенсивностью [6].

Одной из ключевых особенностей ВсС является учет времени протекания внешних и внутренних процессов. Своевременность реакции на события окружающей среды является едва ли не самой важной характеристикой большинства ВсС (систем реального времени). Вычисление, учет временных характеристик и обеспечение их в пределах установленных для системы требований представляет собой актуальную задачу проектирования.

Н. П. Постниковым [1] на основе модели с дискретными событиями (DE) была предложена объектно-событийная модель вычислений (ОСМВ), предназначенная для моделирования распределенных ВсС. ОСМВ представляет собой ряд ограничений на правила взаимодействия вычислительных компонентов в рамках модели DE, позволяющих добиться отсутствия взаимных блокировок и предсказуемости временных характеристик системы. Кроме того, ОСМВ позволяет прояснить и облегчить задачу структурно-функциональной декомпозиции проектируемой системы, а также дает критерии реализации проекта на выбранной вычислительной платформе [1, 3].

В то же время ОСМВ находится еще в процессе своего становления, и ее аппарат недостаточно развит [1, 3]. Некоторые вопросы остались за рамками первых работ по этой теме [1, 2, 3], в том числе вопросы расчета временных характеристик сложного вычислительного процесса в нетривиальных случаях (смешанная программно-аппаратная реализация, алгоритмы с внутренним состоянием). Прделанная работа позволяет осуществить автоматизированную проверку корректности сложного вычислительного процесса при моделировании системы средствами САПР с позиций времени, а также осуществить расчет его временных характеристик.

Моделирование систем с дискретными событиями в рамках объектно-событийной модели вычислений

Основными компонентами вычислительного процесса в ОСМВ являются так называемые функциональные блоки. *Функциональный блок* (ФБ) представляет собой самостоятельный элемент, реализующий четко заданное (в смысле внешних требований к нему) поведение. Более формальное определение ФБ можно найти в [1, 3]. Любой

ФБ имеет хотя бы один синхронный вход и хотя бы один выход. Вход называется *синхронным*, если сигнал, подаваемый на него, активизирует работу блока и может быть непосредственной причиной появления события на его выходе. В противном случае вход называется *асинхронным*. Например, если в качестве ФБ рассматривается блок аналого-цифрового преобразования, то асинхронным его входом может являться аналоговый канал, а синхронным – управляющий регистр (порт), по записи команды в который АЦП запускает преобразование и через некоторое время выдает его результат.

Функциональные блоки взаимодействуют при помощи сигналов, при этом на вход любого ФБ может быть подан сигнал только с одного источника. Сигнал представляет собой последовательность событий, строго упорядоченную по их временным меткам. *Событие*, в свою очередь, представляет собой пару $e = \{t, v\}$, в которой t есть временная метка, а v – элемент данных, представляющий собой значение сигнала в момент t .

Помимо функциональных свойств (алгоритмов преобразования сигналов), любой ФБ отражает еще и временные свойства представляемой им подсистемы. Временные свойства задаются следующими величинами:

- *Минимальное время обработки событий по синхронным входам.* Вектор $\Gamma = \|\gamma_j\|$, где γ_j – параметр входа с номером j , задает эти величины для всех синхронных входов ФБ.
- *Минимальный интервал генерации выходных событий.* Вектор $\Omega = \|\omega_i\|$, задающий либо характеризующий данную величину по всем выходам ФБ.

В ОСМВ присутствует понятие целевого узла, связанное с реализацией компонента проектируемой системы в конкретном элементном базисе. *Целевой узел* представляет собой законченный в функциональном плане элемент вычислительной платформы, способный реализовать поведение, задаваемое конкретным ФБ [1]. Примерами могут служить микроконтроллер, контроллер ПДП, класс стандартной библиотеки программной платформы, виртуальная машина и т. д. ОСМВ задает несколько критериев, в соответствии с которыми разработчик оценивает возможность и оптимальность варианта реализации части своей системы на той или иной платформе.

ОСМВ содержит предположение, благодаря которому возможно доказательство многих полезных свойств моделей, вследствие чего любой ФБ не способен генерировать события на своих выходах чаще, чем он способен воспринимать события по своим синхронным входам:

$$\begin{cases} \min_{i=1,N} \{\omega_i\} \geq \min_{j=1,M} \{\gamma_j\}, \\ \max_{i=1,N} \{\omega_i\} \geq \max_{j=1,M} \{\gamma_j\}, \end{cases} \quad (1)$$

где N – количество выходов, а M есть количество синхронных входов ФБ.

Временной масштаб функционального блока характеризует порядок временных отрезков между событиями на его входах и выходах. Чем больше временной масштаб, тем быстрее ФБ обрабатывает входные события, и, соответственно, тем более быстро изменяющиеся входные сигналы он способен воспринимать. Очевидно, что временной масштаб определяют величины Γ и Ω (обратно пропорционально, так что меньший порядок величин соответствует большему временному масштабу) [1], причем соответственно он зависит от минимального из этих параметров. Однако, в соответствии с (1), минимум параметров принадлежит вектору Γ . Следовательно, временной масштаб ФБ представляет собой значение

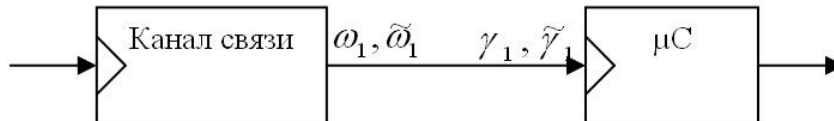
$$f_{isc} = \frac{1}{\min\{\gamma_j\}}, j = \overline{1, M}, \quad (2)$$

где M – число синхронных входов ФБ, а γ_j – параметр входа с номером j . При проектировании системы предлагается осуществлять структурно-функциональную декомпозицию ФБ именно по их временным масштабам, выделяя отдельные сильно связанные домены ФБ и локализуя их в процессе реализации в одном целевом узле.

Временной масштаб окружающей среды определен как минимальный интервал между событиями, которые в ней генерируются. При этом под окружающей средой понимается либо объект управления ВвС (если вся ВвС рассматривается как один ФБ), либо окружающие ФБ другие компоненты системы, взаимодействующие с ним. В соответствии с этим предположение (1) можно представить как утверждение, что любой ФБ не увеличивает временной масштаб окружающей среды.

Временные характеристики композиции ФБ

При объединении функциональных блоков в некоторую сеть (композицию) возникает вопрос проверки корректности соединений с точки зрения временных характеристик. В отсутствие конкретной вычислительной платформы с заданными временными ограничениями ЦУ атрибуты Γ и Ω функциональных блоков играют роль разрабатываемых требований и могут изменяться. Однако при попытке реализации, когда часть ФБ отображена на конкретные ЦУ, их атрибуты уже играют роль ограничений. Например, если в качестве целевого узла выступает микропроцессор с заданной производительностью, то реализованный на нем ФБ будет не способен воспринимать события по входам быстрее, чем позволяет производительность микропроцессора.



Пример композиции двух ФБ

На рисунке ФБ «Канал связи» может генерировать события с интервалом ω_1 , тогда как ФБ « μC », реализованный на конкретном микроконтроллере, способен воспринимать их с интервалом не меньше γ_1 . Если $\omega_1 < \gamma_1$, то потенциально в системе могут возникнуть сбои, а композиция считается *некорректной*. При этом значения ω_1 и γ_1 определяются соответствующими целевыми узлами и являются ограничениями. Следует отличать эти *потенциальные* значения от *действительных значений атрибутов* $\tilde{\omega}_1$ и $\tilde{\gamma}_1$, которые вычисляются, исходя из требований прикладной задачи [1], а не платформы, на которой ее решение реализовано.

Последние часто могут быть вычислены путем анализа графа, образуемого композицией. В ходе проведенных исследований [7] была предложена процедура, позволяющая для любой композиции ФБ, в которой временно удалены обратные связи:

1) вычислить действительные значения атрибутов входов и выходов всех ФБ, входящих в нее, таким образом автоматически определить временные характеристики композиции как единого ФБ;

2) в случае реализации всех или части входящих в нее ФБ на конкретных ЦУ, т. е. при наличии ограничений на атрибуты, проверить корректность выполнения этих ограничений.

Обратная связь, присутствовавшая до выполнения процедуры в композиции, может быть после ее выполнения восстановлена, так как не влияет, в соответствии с (1), на корректность композиции [7].

Предложенная процедура может быть использована, только если для каждого ФБ в композиции задан способ вычисления вектора $\tilde{\Omega}$ по заданному значению $\tilde{\Gamma}$. Как показали исследования [1, 3], для многих классов задач это возможно.

Практическое применение ОСМВ

Моделирование систем в рамках ОСМВ проходит апробацию во всех последних научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках лаборатории микро-процессорной техники СПбГУ ИТМО в течение нескольких лет. Аналитические положения модели положены в основу некоторых разработок ЗАО «ВНИИРА-ОВД».

Практическое имитационное моделирование систем в ОСМВ до сих пор ограничено. Тем не менее в этом направлении был проведен некоторый объем работ. В свободно распространяемый пакет имитационного моделирования Ptolemy II [8] была встроена (в локально установленную копию) поддержка моделирования в ОСМВ, обладающая следующими возможностями:

- задание типов входов вычислительных компонентов системы (синхронный/асинхронный);
- указание векторов Γ и Ω для каждого компонента (ФБ) модели;
- проверка корректности композиции с точки зрения временных ограничений;
- автоматический расчет векторов $\tilde{\Gamma}$ и $\tilde{\Omega}$ (действительных значений атрибутов) каждого ФБ и всей композиции.

Комплекс Ptolemy II обладает достаточно мощными штатными средствами формальной (в текстовой и графической форме) спецификации, анализа моделей, симуляции и протоколирования и визуализации результатов моделирования. В результате получена возможность полноценного имитационного моделирования моделей ОСМВ в совокупности с моделями другого рода (более общими моделями с дискретными событиями, моделями гибридных систем и т. д.) средствами САПР.

Выводы

1. Объектно-событийная модель вычислений представляет собой аналитический аппарат проектирования встроенных систем на основе дискретно-событийного моделирования.
2. Предложенное теоретическое обоснование анализа временных характеристик композиции ФБ [3, 7] позволяет абстрагировать любую композицию, рассматривая ее как один ФБ, открывая тем самым возможность иерархического моделирования.
3. Процедура структурного анализа корректности композиции позволяет автоматически локализовать нарушение требований к системе на этапе спецификации высокоуровневой модели, т. е. на одном из самых ранних этапов проектирования, что положительно отразится на качестве и стоимости проектирования в целом.
4. Опытная реализация имитационного и аналитического моделирования в рамках ОСМВ на базе комплекса Ptolemy II позволит в будущем создать самостоятельную программную среду для дискретно-событийного моделирования встроенных систем.

Литература

1. **Постников Н. П.** Поведенческий и инструментальный аспекты проектирования встроенных вычислительных систем; дисс... канд. техн. наук. СПбГУ ИТМО (ТУ), 2004.
2. **Платунов А. Е., Постников Н. П.** Единое проектное пространство плюс аспектная технология – перспективная парадигма проектирования встраиваемых систем//Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО (ТУ). Вып. 11. Актуальные проблемы анализа и синтеза сложных технических систем. СПб.: СПбГУ ИТМО (ТУ), 2003.
3. **Лукичев А. Н.** Исследование моделей вычислений встроенных вычислительных систем; магистерская дисс. СПбГУ ИТМО, 2005.
4. **Платунов А. Е.** Архитектурные абстракции в технологии сквозного проектирования встроенных вычислительных систем//Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО (ТУ). Вып. 6. СПб.: СПбГУ ИТМО (ТУ), 2003. С. 76–82.
5. **Lee E. A. and Sangiovanni-Vincentelli A.** The Tagged Signal Model – A Preliminary Version of a Denotational Framework for Comparing Models of Computation. Memorandum UCB/ERL M96/33, ERL, University of California, Berkeley, June 4, 1996.
6. **Lavagno Luciano, Sangiovanni-Vincentelli Alberto, Sentovich Ellen.** Models of Computation for Embedded System Design. NATO ASI Proceedings on System Synthesis, П Ciocco, Italy, August, 1998.
7. **Лукичев А. Н., Платунов А. Е.** Композиции в объектно-событийной модели вычислений распределенных встроенных систем. Технический доклад. http://www.vniiraovd.com/~lukichev/publications/compositionality_oemc2007_rus.pdf
8. Проект Ptolemy II, <http://www.ptolemy.eecs.berkeley.edu>