

МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА

Сердюк Г.В.*, Шелковников Б.Н.**, Шелковников А.Б.***,
*<gserdyuk@ridgetop-group.com>

** Институт телекоммуникационных систем НТУУ <КПИ>, Индустриальный пер.2, 03056 Киев, Украина
<shelk@ukr.net>,
***<shelka@ukr.ent>

Аннотация. В настоящем докладе рассмотрены методы моделирования радиочастотных цепей и систем, а так же различные уровни построения моделей, используемых в процессе разработки. Приведены способы объединения моделей различных уровней в одну среду и обоснована структура среды многоуровневого моделирования. Описана новая реализация среды, позволяющая использовать модели нескольких смежных уровней в одном процессе анализа. Материал проиллюстрирован практическим примером расчета.

1. Введение

За последние три десятилетия разработаны различные методы и средства расчета радиочастотных и СВЧ систем и цепей. Тем не менее, успех в развитии методов моделирования сопровождался увеличением сложности решаемых задач. Большая размерность задач и разделенность процесса проектирования между несколькими людьми (и даже подразделениями) привело к необходимости создания сред моделирования, пригодных для управления сложностью представления, когда для различных этапов проектирования части устройства представляются на разных уровнях абстракции [1].

Традиционное нисходящее проектирование, предполагающее последовательное уточнение проекта, часто приводит к формулированию необоснованных требований к частям проекта. Отсутствие обратной связи “наверх” не позволяет выявлять проблемные части проекта на ранних стадиях. Тенденция к усложнению систем приводят к требованию объединения нисходящего проектирования и восходящей верификацией в рамках единой инфраструктуры проектирования, способной включить в себя все ключевые процессы, такие как анализ системной архитектуры, анализ радиочастотной подсистемы, разработка радиочастотной и цифровой части [1].

Различные функциональные блоки связанных трансиверов могут быть реализованы частично в аналоговой области и частично – в цифровой, объем которой постоянно растет. Цифровая обработка подразумевает большую гибкость по сравнению с аналоговыми блоками, и может, по крайней мере отчасти, компенсировать некоторые искажения сигнала, вызванные аналоговой частью приемника. Наличие цифровых и аналоговых частей ведет к дилемме реализации – часто одни и те же части можно реализовать в аналоговом или цифровом виде. Для предсказания эффективности сложных алгоритмов цифровой обработки необходимо совместное моделирование цифровых и аналоговых частей трансивера [2].

Третья проблема, с которой сталкиваются разработчики – проблема размера системы. Обычно сложность системы такова, что не позволяет

рассчитать всю ее на уровне цепи с использованием программы моделирования цепей. Хотя и разрабатываются все более эффективные алгоритмы [3,6], как правило такой анализ невозможен или неприемлем из практических соображений. Таким образом, для моделирования и верификации проекта необходимо применение иерархического подхода, совмещающего модели на уровне цепей с более высокоуровневыми поведенческими моделями.

Далее доклад организован следующим образом. Во втором разделе рассмотрены методы моделирования цепей и систем и описаны различные уровни представления моделей. В третьем разделе рассмотрена структура среды многоуровневого моделирования и в четвертом описана ее реализация. Пятый и шестой разделы содержат иллюстративный пример расчета и заключение.

2. Моделирование и Анализ Систем.

Моделирование и анализ (так же часто используют термин симуляция) широко используется на различных стадиях процесса проектирования.

Различные уровни моделирования беспроводной системы связи приведены на рис. 1. На самом верхнем уровне разработчик интересуется преобразованием сигнала, происходящими на всей пути его следования. Последовательная детализация блоков, позволяет уточнять поведенческие модели, учитывая отдельные неидеальности [2,4,5]. Но, все же, традиционно на уровне системного моделирования модели идеализированы и симуляция более исследует алгоритмический аспект проекта, нежели влияние неидеальностей.

Напротив, на уровне цепи предметом

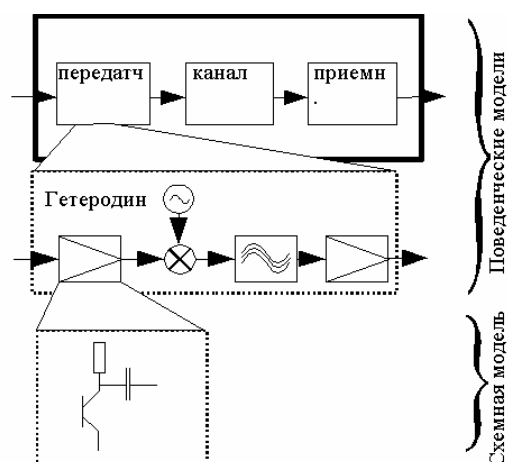


Рис 1. Многоуровневое моделирование системы связи
Fig. 1. Multilevel Link Simulation

исследования являются разнообразными неидеальности поведения подсистем и компонентов, которые физически представляют реализацию проекта. Этот вид оценки требует использования детальных моделей для временной и частотной области. На этом уровне более не применимы простые подходы, отсутствует однонаправленность распространения сигнала, общепринятая на системном уровне. Моделирование на уровне цепей обычно состоит в составлении уравнений цепи, основанных на компонентных уравнениях и уравнениях сохранения Кирхгофа. Для решения таких уравнений применяются программы анализа во временной области (варианты СПАИС) [7] или программы гармонического баланса [8,9,10]. Это мощные методы, но они увеличивают время анализа системы на порядок.

Рассмотрим основные методы анализа систем.

При прямом подходе сигнал дискретизируется и система рассчитывается в каждой временной точке последовательно. Частота дискретизации должна быть достаточно высока, чтобы описать колебания несущей. Однако, поскольку скорость передачи данных составляет малую долю от несущей, для того, чтобы промоделировать прохождение одного бита несущей требуется большое количество отсчетов, что явно неэффективно. Одним из решений есть значительное понижение несущей для целей моделирования [11].

Можно вообще исключить несущую из рассмотрения. Этот метод известен как метод обработки видеосигнала или метод комплексной огибающей [11]. Суть его состоит в том, что сигнал представляется в виде комплексной огибающей, а блоки трансивера выполняют соответствующие преобразования. Такой подход отражает только принципиальные характеристики блоков системы связи. Для учета неидеальностей блоков и компонентов необходимо использовать более точные модели, которые непосредственно связаны с схемным уровнем.

Подходов, позволяющих учитывать неидеальности аналоговых частей приемопередатчиков, существует несколько.

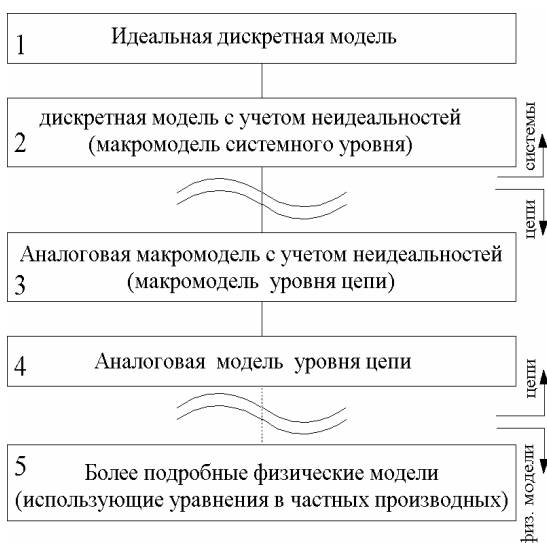


Рис.2. Иерархия моделей.
Fig. 2. Models Hierarchy

Первый состоит в использовании аналоговых симуляторов уровня цепей совместно с системными симуляторами [5]. Аналоговые симуляторы дают наибольшую точность при моделировании аналоговой части. В этом случае (см рис 3) каждая часть анализируется своей специфичной программой моделирования, обеспечивающей оптимальную скорость расчета с точки зрения требуемой точности. Анализ системного уровня происходит во временной области, что соответствует расчету переходного процесса для программы аналогового моделирования. При объединении двух симуляторов необходимо синхронизировать моменты времени, т.к. системный симулятор использует дискретное время, тогда как аналоговый – непрерывное. Это составляет одну из проблем построения систем ко-симуляции, наряду со значительным временем анализа.

Подход, использующий макро моделирование системного уровня [2,5], позволяет перенести нелинейное поведение отдельных блоков и подсистем на уровень системного проектирования. При этом блоки рассчитываются программами анализа цепей и на этом основании строятся модели, отражающая требуемые неидеальности цепи (нелинейности, паразитные связи, эффекты межсоединений). Для построения таких моделей часто используются языки описания аппаратного обеспечения (часто называемые HDL). Модели обычно выражаются в терминах метода комплексной огибающей, для сохранения высокой скорости системного моделирования. Это позволяет тестировать цифровую часть вместе с аналоговой частью и настроить ее для компенсации искажений сигнала в аналоговом тракте приемника. В отличие от ко-симуляции, поскольку в этом случае аналоговая часть представлена макро моделью, затруднено проводить ее оптимизацию. Третий подход может быть описан как аналоговое поведенческое моделирование. Суть его состоит в построении аналоговой модели, которая может быть рассчитана совместно с уравнениями цепи. Причем эта модель оперирует неизвестными, которые не связаны законами сохранения (как законы Кирхгофа). Такие макро модели близки к предыдущему уровню, но отличаются от системных макро моделей тем, что 1) выполняются на более низком уровне и 2) могут охватывать не весь приемник, как системные макро модели, а только несколько блоков. Этот подход подразумевает использование ко-симуляции для совместного расчета с цифровой частью, как и подход 1, но симуляция аналоговой части выполняется быстрее, из-за пониженной сложности задачи.

Иерархия видов моделей представлена на рис.2.

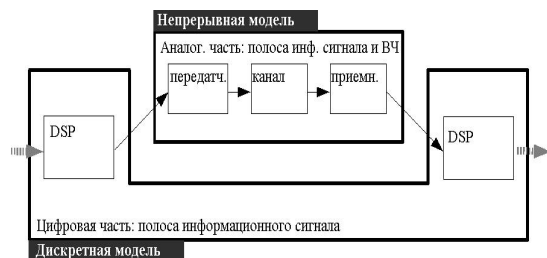


Рис 3. Использование методов моделирования при анализе тракта передачи информации.
Fig.3. Methods Usage on Link Simulation

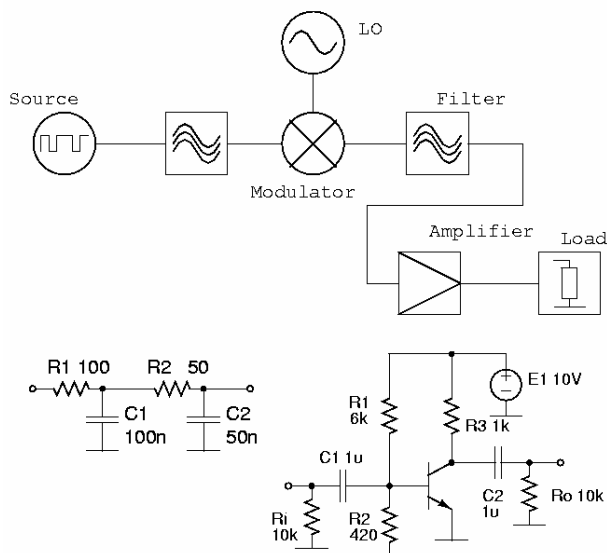


Рис 4. Блок-схема передатчика и принципиальные схемы отдельных узлов
Fig. 4. Transmitter chart and schematics of separate blocks

```
entity MDLTR is generic (k: real);
port (terminal n1,n2,lo: electric);
end;

architecture behav_1 of MDLTR is
constant koef :real:=pow(10,k/20.);
quantity v1 across i1 through n1;
quantity vlo across ilo through lo;
quantity v2 across i2 through n2;
begin
R1: entity res(BEHAVIORAL)
generic map (10000)
port map(n1, ground);
i1 == 0;
ilo == 0;
v1*vlo == v2/koef;
end architecture;
```

Листинг 1. VHDL-AMS код модулятора
Listing 1. Modulator VHDL-AMS code

3. Структура среды моделирования коммуникационных систем

Объединение вышеперечисленных подходов и использование средств, позволяющих просто менять уровни моделирования, дает возможность сделать процесс разработки и верификации проекта непрерывным от постановки задачи на верхнем уровне до схемотехнической реализации ее на нижнем. В общем виде структура системы моделирования должна отражать описанную выше иерархию моделей. При этом использование методов отражено на рис 3.

Передаваемые и принимаемые сигналы в современных системах связи, в конечном счете, являются цифровыми. Внутренняя же часть тракта – радиочастотная – должна анализироваться с использованием аналоговых методов [12]. Тут могут использоваться как методы непосредственного интегрирования уравнений цепи, так и более сложные методы гармонического баланса и пристрелки. Важной чертой является наличие возможностей использовать как уравнения цепи, так и независимые переменные и

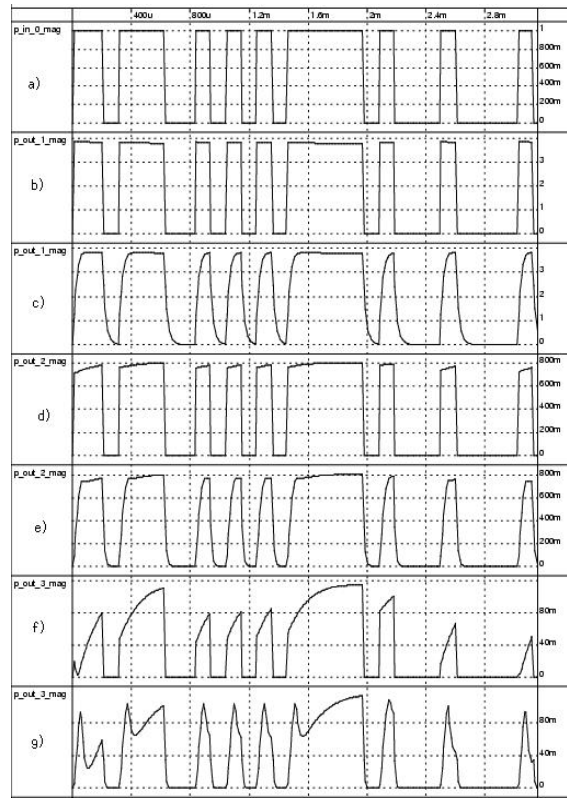


Рис 5. Диаграммы сигналов: а) входной сигнал, б) и с) – основная гармоника выходного сигнала с фильтром и без него; д) и е) – вторая гармоника выходного сигнала; ф) и г) – третья гармоника.
Fig. 5. Signal waveforms: а) – input, б) с) – fundamental with and w/o input filter; д),е) second and ф),г) third with and w/o input filter

уравнения, так как это позволит строить аналоговые поведенческие модели (совмещая уровни 3 и 4 рис. 2 в одном средстве моделирования).

Возможность формулирования пользователем уравнений модели (компонентных уравнений) вообще является важной как при построении макромоделей, так и при моделировании новых физических приборов (новых типов транзисторов, например). Такому требованию удовлетворяют современные языки описания аппаратного обеспечения, особенно принятые в последние годы стандарты Verilog-A, Verilog-AMS [13] и VHDL-AMS [14]. Оба языка содержат средства для описания поведения аналоговых приборов в виде уравнений, описания межсоединений приборов и блоков, объединения приборов и блоков в иерархии и алгоритмического описания асинхронных параллельных процессов, используемых для моделирования цифровых цепей. Оба языка появились сначала как цифровые языки аппаратного обеспечения, и лишь потом были стандартизированы их версии для аналоговых и смешанных сигналов.

Существует еще одно важное соображение в пользу вышеупомянутых языков. Оба эти языка имеют описанную в стандарте спецификацию ядра – процедуру решения и взаимодействия цифровой и аналоговой частей программы моделирования. Т.о. эти языки в состоянии покрывать 4 уровня иерархии моделей, приведенной на рис 2 – с 1 по 4.

Применение указанных языков в создании систем

моделирования и анализа обещает существенные преимущества в гибкости и управляемости системы.

4. Реализация системы моделирования

Описанный подход применен авторами при реализации пакета программ Rincon [15]. В основу пакета положен язык VHDL-AMS, который усилен конструкциями для моделирования распределенных компонент [16,17]. Выбор языка обусловил возможности построения моделей различных уровней. В настоящее время реализовано только аналоговое подмножество языка [17], соответствующее уровням 3 и 4 рис. 2 (и внутреннему прямоугольнику рис.3, представляющему аналоговую часть тракта связи). Реализованы методы гармонического баланса и модуляционного гармонического баланса [12,19], широко применяющегося для анализа тракта при воздействии сложных модулированных сигналов.

Предполагается развитие пакета программ, реализация цифровой части языка VHDL а так же реализация интерфейсов ко-симуляции с другими средствами (в частности SystemC [18]), что позволит реализовать описанную структуру среды моделирования в полном объеме.

5. Пример моделирования

В качестве примера моделирования рассмотрим тракт передатчика рис.4. Для демонстрации возможности подхода, некоторые части передатчика описаны как макромодели, в то время как другие части описаны при помощи цепей различного уровня детализации. Например, формирователь импульсов рассмотрен как простой ФНЧ, модулятор – как некий перемножитель (т.е. заданы только уравнения, задающие поведение блока), усилитель снова детализирован в виде транзисторного каскада. Результаты моделирования представлены на рис.5.

6. Заключение

В настоящем докладе сформулирована и обоснована структура среды многоуровневого моделирования и расчета коммуникационного оборудования. Рассмотрены необходимые уровни моделирования, части системы и способы их взаимодействия. Описана реализация новой среды, которая позволяет использовать модели разных уровней. Приведена иллюстрация использования описанного подхода к расчету тракта передачи.

Литература

- [1] Frank Ditore, Kal Kalbasi, System-Level Solutions: A Top Down Approach to IC Design, Presentation by Agilent Technologies, 2002, http://eesof.tm.agilent.com/pdf/adv_rfic_paper01.pdf
- [2] Piet Wambacq et al., High-level Simulation and modeling tools for mixed signal front-ends of wireless systems, Proc of AACD, Spa, Belgium, March 2002, [http://www.imec.be/design/pdf/mixsig/aacd2003_wambacq\[1\].pdf](http://www.imec.be/design/pdf/mixsig/aacd2003_wambacq[1].pdf)
- [3] D. Long, R. Melville, K. Ashby, B. Horton, Full-chip harmonic balance, Proc IEEE Custom Integrated Circuits conf, pp. 379-382, 1997.
- [4] Kurt R. Matis, Multilevel Simulation of WCDMA Systems for Third-Generation Wireless Applications, <http://sss-mag.com/pdf/wcdma.pdf>
- [5] Uwe Knochel, Jurgen Hartung, Approaches to consider analog RF components in system level simulation of mobile communications, ANALOG 2002, Bremen, May, 2002, pp. 219-

224.

- [6] Jack Sifri, Niranjana Kanaglekar, Simulation Tools Converge on Large RFICs, Communication Systems Design, June, 2002
- [7] Spice, <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/lcBook/SPICE>
- [8] V. Rizzol et al., General-Purpose Harmonic Balance Analysis of Nonlinear Microwave circuits under Multitone Excitation, IEEE Trans. on MTT, vol. 36, no 12, December, 1988, pp. 1650-1660
- [9] B.N.Shelkovnikov, K.S.Sunduchkov, G.V.Serdyuk, Lomaka V.L., A.A.Mikryukov, O.V.Kolchanov, Mathematics and Software for Microwave Circuit Design; Proc. of the International Symposium on Signals, Systems and Electronics (ISSSE'92), Paris, 1992;
- [10] G. Serdyuk, D. Goodman, VHDL Approach Improves Nonlinear Simulation, Microwaves & RF, November 2001, pp. 76-102.
- [11] M. Schiff, Baseband Simulation of Communication Systems, Ap. Note AN 133, April, 26, 2000, Elanix, Inc.
- [12] Ken Kundert, Simulation Methods for Rf Integrated Circuits, ICCAD-97, November, 1997.
- [13] Verilog-AMS LRM Draft <http://www.eda.org/verilog-ams>
- [14] VHDL-AMS <http://www.eda.org/vhdl-ams>
- [15] D. Goodman, G.Serdyuk, RINCON - A Rigorous Tool for Accurate RF/Microwave modeling and simulation. http://www.ridgetop-group.com/resource_center/RINCON_Modeling_VHDL_FD_Article.pdf
- [16] Gennady Serdyuk, Boris Shelkovnikov, VHDL-AMS Subset Usage for Harmonic Balance Circuit Simulation, Conf. Proceedings, TCSET-2004, Lviv, Slavsko, 2004.
- [17] Gennady Serdyuk, Boris Shelkovnikov, VHDL-AMS Modeling for Harmonic Balance Circuit Simulation, Conf. Proc., MIKON-2004, Warshava, 2004
- [18] SystemC Home Page, <http://www.systemc.org/>
- [19] How-Siang Yap, "Designing to Digital Wireless Specifications Using Circuit Envelope Simulation", Applied Microwave & Wireless, June, 1998, pp. 84-89.

Multilevel Transceiver Modeling and Simulation.

G. Serdyuk*, B. Shelkovnikov**, A. Shelkovnikov***
* <gserdyuk@ridgetop-group.com>,
** Telecommunication Systems Institute NTU <KPI>,
Industrialnij per.2, 03056 Kiev, Ukraine <shelk@ukr.net>,
*** <ashelk@ukr.net>

Abstract. Paper contains consideration of simulation techniques for RF circuits and systems and different modeling levels. Ways to combine models of different levels in one design environment are proposed and multilevel modeling and simulation framework structure is substantiated. New implementation of such environment is described. It allows usage of different level models in one simulation process.

To provide detailed simulation of communication link, different system level techniques and models ought to be used. They may be combined via co-simulation, or using macro (behavioral) modeling approaches. Correspondent modeling levels are shown on Fig 2.

Required structure of multilevel simulation framework is outlined and grounded. Usage of modern HDL is shown to be advisable. Structure of simulation framework reflects communication link structure and is shown on Fig 3.

Such structure is implemented by author in Rincon harmonic balance simulator using Frequency Domain VHDL-AMS language extension [15]. Its usage is illustrated in simulation of communication transmitter outlined on Fig. 4. It is described using behavioral models mostly (see Listing 1, for example), but some blocks are specified as netlists. Simulation results are presented at Fig. 5.