

Смешанное моделирование цепей и систем

*Ко-симуляция
при расчете приемопередающего тракта*



Г. Сердюк, Б. Шелковников, Киев-Севастополь, 2005

Анализ тракта в целом. Зачем ?



- В цифровых системах связи используют как аналоговые так и цифровые блоки
- Одна и та же функциональность может быть реализована и в цифровой и в аналоговой части
- Искажения аналоговой части можно компенсировать в цифровой части
- Позволяет определять влияние параметров аналоговой цепи на интегральные свойства системы связи в целом

Симулятор Rincon



- **Симулятор Rincon**
 - Использует VHDL-AMS с частотными расширениями (FD) для описания цепей и компонентов
 - Использует метод Гармонического Баланса (ГБ) для анализа установившегося режима
 - Использует метод Огибающих (Модуляционного ГБ) для анализа цепей при сложных модулированных воздействиях
 - **Взаимодействует с системами дискретного моделирования, что позволяет построить модель тракта в целом**
- **Matlab/Simulink**
 - Применяется для анализа цифровых систем связи (метод комплексных огибающих)
 - Развитая библиотека блоков
 - Расширяется с использованием C/C++

VHDL-AMS

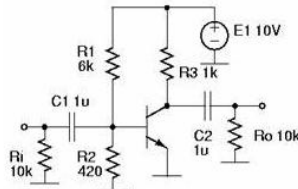


- Стандарт принят в 1999 году для расширения VHDL на аналоговые и смешанные сигналы
- Представляет аналоговую цепь в виде списка компонентов (как и Spice)
- Позволяет описывать как цепи (используя консервативную семантику для узлов) так и системы (используя регулярные переменные).
- Позволяет описывать компоненты, используя уравнения в терминах приложенных и протекающих величин

Список компонентов в VHDL-AMS



- Любой блок имеет интерфейс:
entity amplifier **is**
port (terminal inp, outp: electrical);
end;
- И реализацию (структурная реализация):
architecture structural of amplifier **is**
terminal t1, t2, t3: electrical;



```

begin
    ri: entity res(eq) generic map (10000) port map (inp, ground);
    c1: entity cap(eq) generic map (1.e-6) port map (inp, t1);
    r2: entity res(eq) generic map (420) port map (t1, ground);
    r1: entity res(eq) generic map (6000) port map (t3, t1);
    r3: entity res(eq) generic map (1000) port map (t3, t2);
    r0: entity res(eq) generic map (10000) port map (outp, ground);
    e1: entity vdc(eq) generic map (10) port map (t3, ground);
    c2: entity cap(eq) generic map (1.e-6) port map (outp, t2);
    q1: entity bjt(gp) port map (ground, t1, t2);
    -- параметры можно определить внутри модели прибора
end;

```

Компонент в VHDL-AMS



- В свою очередь компоненты описывается уравнениями (поведенческая реализация):
- Резистор:

```

entity res is
    generic ( r: real );
    port ( terminal a,b : electrical);
end;

architecture eq of res is
    quantity ur across ir through a to b;
begin
    ir==ur/r;
end;

```

Компонент в VHDL-AMS (транзистор)



- Транзистор (модель Гуммеля-Пуна).

```
entity bjt is port (terminal e,b,c : electrical);
end entity;
architecture gp of bjt is
  constant iss : real := 1.e-12;          constant ise : real := 0; --1.e-17;          constant isc : real := 0; --1.e-17;
  constant vt : real := 0.0259;          constant bf : real := 100;          constant br : real := 2;
  constant nf : real := 1;              constant nr : real := 1.5;          constant ne : real := 1;
  constant nc : real := 2;
  quantity icoll through c;             quantity ibase through b;          quantity iem through e;
  quantity vs1 across b to e;           quantity vs12 across b to c;      quantity vce across c to e;
begin
func: procedural is
  variable ibf, ibr, ilc, ile, kqb, ice, r : real;
  begin
    kqb := 1;
    ibf := iss* (myexp(vs1/(nf*vt))-1);          ibr := iss* (myexp(vs12/(nr*vt))-1);
    ile := ise* (myexp(vs1/(ne*vt))-1);          ilc := isc* (myexp(vs12/(nc*vt))-1);
    -- one megaom between c and e to improve convergenece
    ice_r := vce/1.e6;
    icoll := ibf/kqb - ibr/kqb - ibr/br - ilc + ice_r;
    ibase := ibf/bf + ibr/br + ilc + ile ;
    iem := - icoll - ibase;
  end procedural;
end architecture;
```

Гармонический Баланс (уравнение)



- Составленные уравнения решаются в частотной области методом гармонического баланса
- И невязки уравнений, и переменные - спектры

$$F(V) = I(V) + \Omega Q(V) + YV + U = 0$$

$I(V)$ – нелинейные токи = $FFT\{ I (FFT^{-1}\{V\}) \}$

$Q(V)$ – нелинейные заряды (так же)

YV – линейная часть системы ур-й

U – свободный вектор

Гармонический Баланс (Модуляционный)



- Переменные состояния – «медленно изменяющиеся» во времени спектры,
- Решается с шагом по времени

$$F(V(t)) \equiv$$

$$I(V(t)) + \Omega Q(V(t)) + \frac{d}{dt} Q(V(t)) +$$

$$AV(t) + B\left\{\Omega V + \frac{d}{dt} V(t)\right\} + U(t) = 0$$

Гармонический Баланс (решение)



- Решается методом Ньютона
- Траектория решения контролируется уменьшением невязки

$$\|F_{n+1}\| < \|F_n\| * (1 - \varepsilon * \|x_n\| * \|F'_n\|)$$

- Используется как традиционный Ньютон, так и неявный с линейным итерационным солвером (п/п Крылова)
- Используется неявный метод Ньютона без прямого расчета якобиана

Интеграция со средствами дискретного моделирования

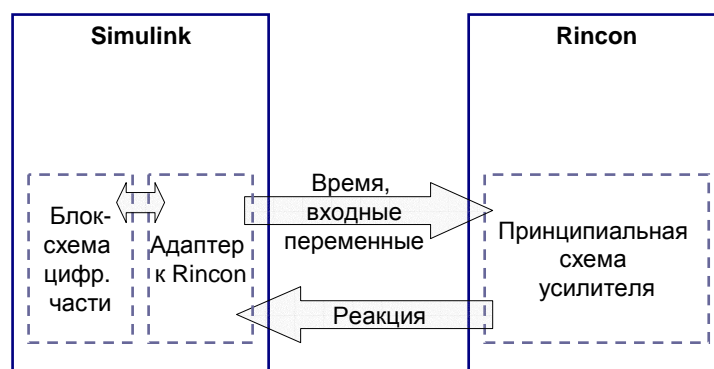


- Применялся метод дискретной комплексной огибающей

$$y_n = A \cdot \sum_{i=0}^K S(x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-i}, \dots)$$

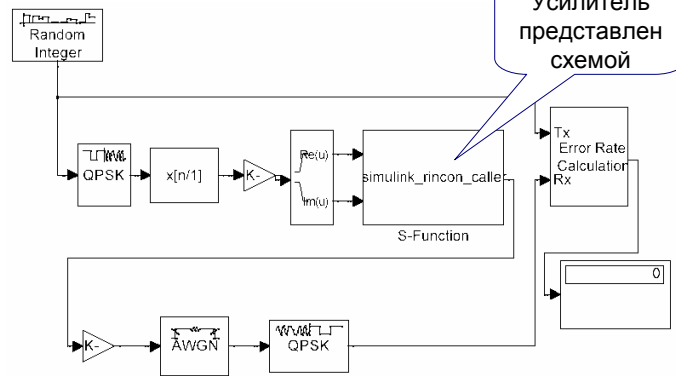
- Сформулировав уравнения МГБ в дискретные моменты времени, объединяем два метода (вызываем первый из второго)
- Ко-симуляция – совместное использование различных средств моделирования в одном процессе анализа.
- Matlab/Simulink – позволяет представить цифровую часть методом комплексной огибающей, имеет развитую библиотеку системных компонентов
- Наряду с Matlab/Simulink можно использовать другие средства, в том числе открытые Ptolemy-II, SystemC, SystemC-AMS

Структура системы



- Два сосуществующих процесса, обменивающихся данными
 - Simulink передает текущее время и значения входных (для Rincon) величин,
 - Rincon выполняет шаг анализа методом МГБ и возвращает результаты в Simulink

Модельная задача



Тракт приемника с QPSK модуляцией

Модельная задача (усилитель)

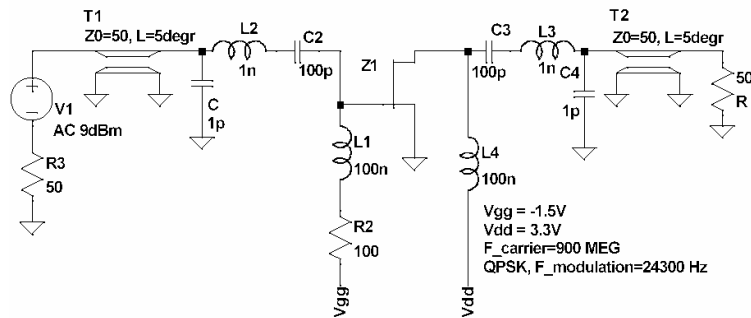
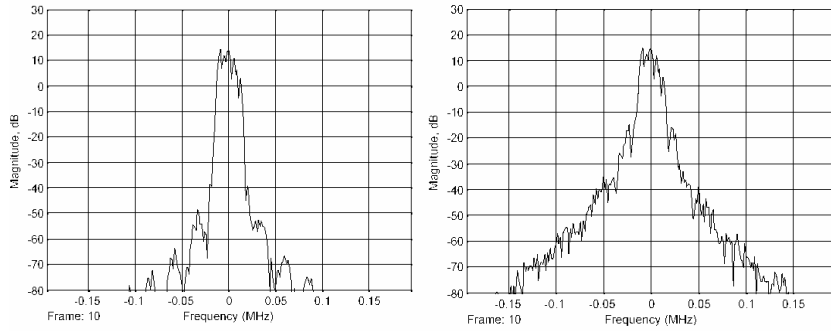


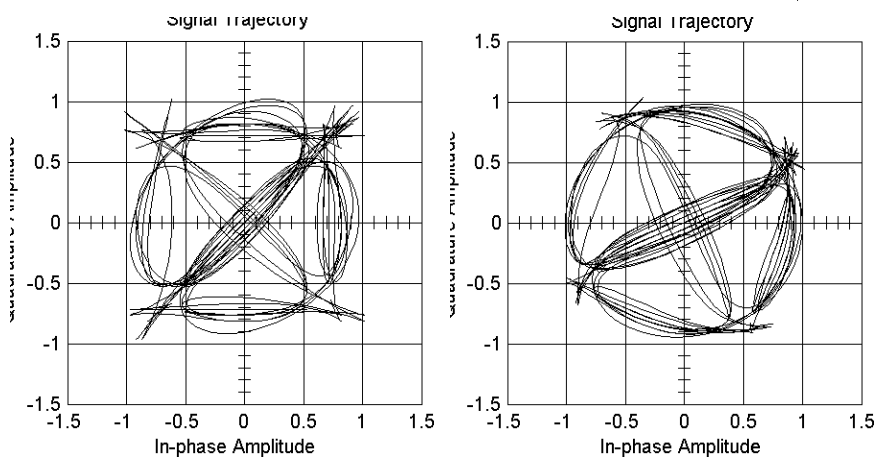
Схема усилителя

Результаты (спектры)



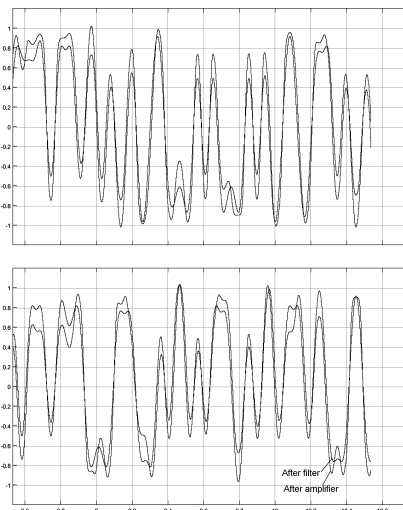
Спектры на входе и выходе усилителя

Результаты (траектории сигнала)



Траектории сигналов на входе и выходе усилителя

Синфазная и квадратурная компоненты



Нормализованные синфазная и квадратурная компоненты – на входе и выходе усилителя

Заключение



- Продемонстрирована расширяемость программы моделирования Rincon –
- Использована ко-симуляция для анализа связанного тракта – взаимодействуют различные методы моделирования (МГБ и комплексных огибающих)
- Приведена реализация среды
- Иллюстрация – расчет приемопередающего тракта

Распространение Rincon



- Студенческая версия доступна

<http://www.rincon-eda.com>

*без ограничения по времени использования,
ограничен размер задач*

- Бесплатная полная лицензия для учебных организаций

info@rincon-eda.com

gserdyuk@gserdyuk.org

Спасибо за внимание



- Rincon – анализ СВЧ и радиочастотных схем и систем <http://www.rincon-eda.com>
- Метод гармонического баланса – традиционный и п/п Крылова
- Модуляционный гармонический баланс – сложные сигналы
- VHDL-AMS/FD – создание линейных и нелинейных моделей произвольной сложности
- **Ко-симуляция - совместное использование с различными средствами моделирования.**