

Tema 6: Capacidades de Verificación Funcional en Circuitos Digitales

Hipólito Guzmán Miranda
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla

hguzman@us.es

Acknowledgement to Ray Salemi,
Mentor Graphics

Contexto docente

BT03: Verificación funcional y formal de circuitos digitales

- Tema 6: Capacidades de verificación funcional en circuitos digitales
- Tema 7: Métodos de verificación formal para circuitos digitales
- Tema 8: Diseño de planes de pruebas

Conocimientos previos requeridos:

- VHDL avanzado

Objetivos de aprendizaje

- Conocer las limitaciones de los testbenches clásicos
- Conocer las métricas de verificación más comunes, como pueden ser el alcance de código y el alcance funcional
- Comprender el concepto de modelado a nivel de transacción
- Adquirir las capacidades conceptuales para construir paso a paso un testbench estructurado

Repaso

Verilog para diseñadores de VHDL:

- En Verilog se puede hacer lo mismo que en VHDL...
- ... pero es más fácil equivocarse
- Tipado débil vs fuerte
- Reg y wire
- Bloques always e initial
- Instanciación de módulos

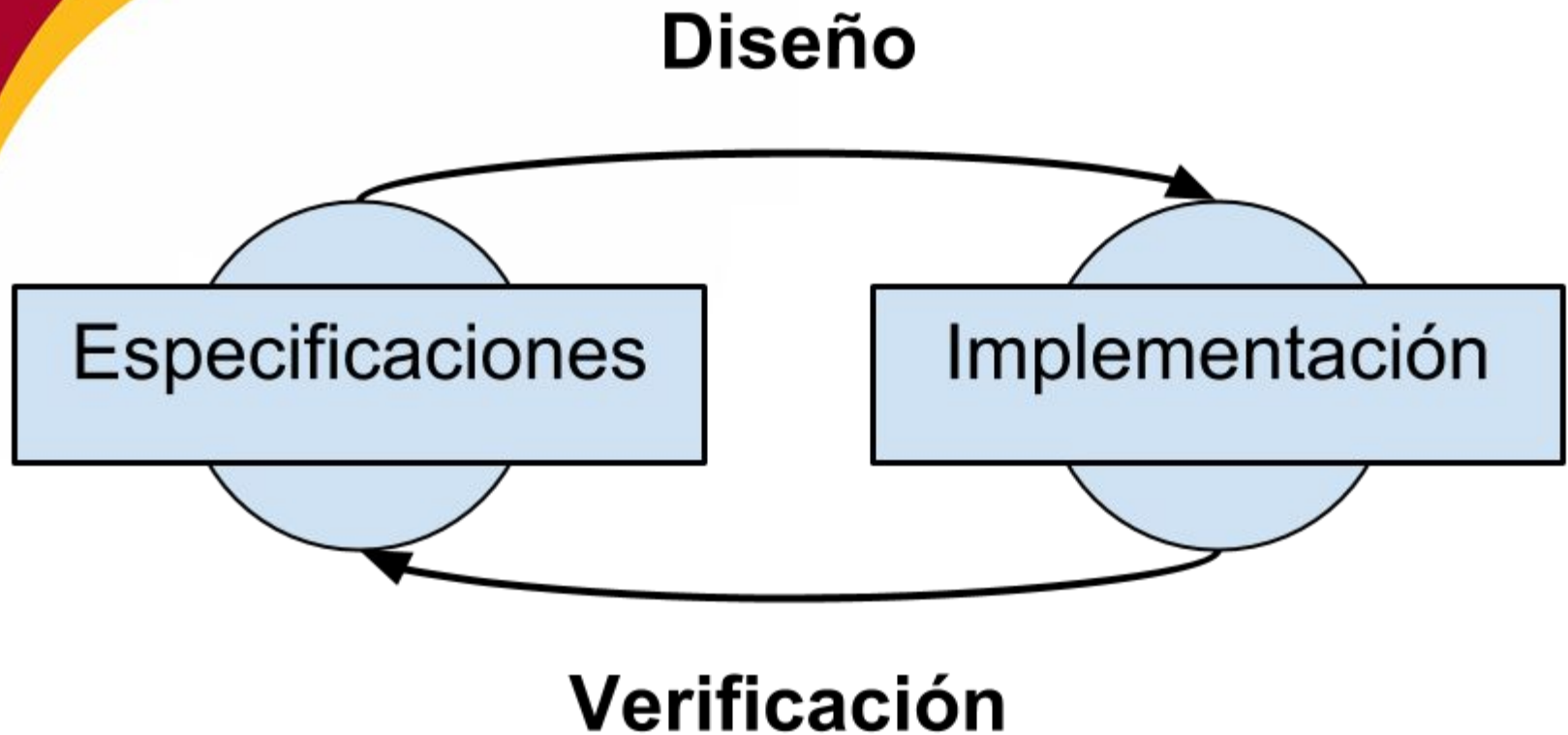
Contenido

- ¿Qué es la verificación?
- ¿Por qué verificar?
- 0.- Test dirigido
- 1.- Code coverage
- 2.- Assertions
- 3.- Modelado a nivel de transacción
- 4.- Self-checking testbenches
- 5.- Estímulos automáticos
- 6.- Functional coverage
- Bibliografía

Contenido

- ¿Qué es la verificación?
- ¿Por qué verificar?
- 0.- Test dirigido
- 1.- Code coverage
- 2.- Assertions
- 3.- Modelado a nivel de transacción
- 4.- Self-checking testbenches
- 5.- Estímulos automáticos
- 6.- Functional coverage
- Bibliografía

¿Qué es la verificación?



Comprobar que la implementación realizada realmente cumple con las especificaciones

Contenido

- ¿Qué es la verificación?
- ¿Por qué verificar?
- 0.- Test dirigido
- 1.- Code coverage
- 2.- Assertions
- 3.- Modelado a nivel de transacción
- 4.- Self-checking testbenches
- 5.- Estímulos automáticos
- 6.- Functional coverage
- Bibliografía

Algunas buenas razones...

- Verification gap
- Salud mental
- Verificación puede ser entre el 50% y el 80% del tiempo total del desarrollo
- Costes de fabricación de ASIC
- Dificultad de diagnosticar y arreglar fallos sobre el prototipo FPGA
- Terminar (de verdad) los proyectos a tiempo



Motivación

¿Por qué aprender verificación?



Find jobs

Company reviews

Find salaries

Upload your resume

What

Job title, keywords, or company

Where

City, state, or zip code

Verification engineer



Find jobs

Advanced Job Search

Page 1 of 22,569 jobs

Verification engineer jobs

Sort by:

relevance - date

Salary Estimate

\$70,000+ (17885)

\$80,000+ (15639)

\$90,000+ (12300)

\$100,000+ (8576)

\$115,000+ (3912)

Job Type

Full-time (21360)

Internship (904)

Contract (833)

Temporary (636)

Part-time (483)

Commission (33)

IP Verification Engineer new

Intel 4.1 ★

Hillsboro, OR 97124

Verification of complex server IP designs us
will be responsible for, although not limited

Today · [Save job](#) · more...

Design Verification Engineer - E

Apple 4.2 ★

Santa Clara Valley, CA 95014

Pre-silicon digital verification engineer for m
constrained random verification techniques

30+ days ago · [Save job](#) · more...

Design Verification Engineer new

Annappurna Labs (U.S.) Inc. 3.6 ★

ASIC Design Verification Engineer, Processors new

Google 4.3 ★

Sunnyvale, CA

Experience with security-focused verification methods. You will collaborate closely with design and verification engineers in active projects and perform hands...

5 days ago · [Save job](#) · more...

ASIC Design Verification Engineer new

Google 4.3 ★

Sunnyvale, CA +1 location

You will collaborate closely with design and verification engineers in active projects and perform hands-on verification. 4 years of relevant experience.

5 days ago · [Save job](#) · more...

Verification Engineer

Ambarella 3.6 ★

Santa Clara, CA 95054

Perform Block Verification of Ambarella's very complex CABAC compression block. Perform system-level verification of Ambarella's Video Input block as well as...

30+ days ago · [Save job](#) · more...

Design Verification Engineer

Apple 4.2 ★

Santa Clara Valley, CA 95014 +5 locations

Experience with mixed signal verification methodology. Deep knowledge of formal verification methodology. Develop verification plans for all features under your...

30+ days ago · [Save job](#) · more...

Design Verification Engineer

Talent 101 4.0 ★

Santa Clara, CA 95051 +1 location

Contenido

- ¿Qué es la verificación?
- ¿Por qué verificar?
- 0.- Test dirigido
- 1.- Code coverage
- 2.- Assertions
- 3.- Modelado a nivel de transacción
- 4.- Self-checking testbenches
- 5.- Estímulos automáticos
- 6.- Functional coverage
- Bibliografía

Test 'tradicional'

Típico testbench:

- Estímulos definidos a mano
- Siempre los mismos estímulos
- Comprobación mirando “a ojo” la forma de onda

Este enfoque no escala para tests complejos

Ej: 200K estímulos y 1M ciclos de reloj de formas de onda que comprobar

Test dirigido vs aleatorio

- Los tests pueden ser de dos tipos:
 - Directed
 - Estímulos determinados de antemano
 - (puedo haber pre-calculado la salida esperada)
 - Random
 - Estímulos generados cada vez que se lanza la simulación
 - (¿cómo sé si la salida es correcta?)

Test dirigido

- En ambos casos, ¿es difícil estar seguro de que lo hemos probado todo!
- ¿Cuándo sé que he acabado de verificar?

Contenido

- ¿Qué es la verificación?
- ¿Por qué verificar?
- 0.- Test dirigido
- 1.- Code coverage
- 2.- Assertions
- 3.- Modelado a nivel de transacción
- 4.- Self-checking testbenches
- 5.- Estímulos automáticos
- 6.- Functional coverage
- Bibliografía

Es una técnica automática

- La hace el simulador, compilando los ejecutables de simulación con ciertas opciones
- No soportado por Xilinx ISIM :(
- Soportado por ModelSim/Questa, Aldec, GHDL (parcialmente), etc...

Identificar código que no ha sido probado

- Mnemónico :
“**S**ome **B**eers **F**or **E**xtra **C**ourage”
- Statement
- Branch
- FSM
- Expression
- Condition

Statement Coverage

- Qué sentencias se han ejecutado y cuáles no
- Sentencia es cualquier cosa que termine en punto y coma
- Una sentencia (como mucho) por línea facilita la labor de cálculo del coverage al simulador



Testplan Design DesUnits

- [-] tb_bit2symb
- [-] edelweiss_common
- [-] vhdl_verification (no coverage)
- [-] image_pkg
- [-] txt_util
- [-] tb_d_ff
- [-] tb_fadapt
 - [-] clkmanager_inst
 - [-] datagen_inst
 - [-] uut
 - [-] datacompare_inst
 - [-] throughputchecker_inst
- [-] tb_fifo
- [-] tb_pulse_shaping
- [-] tb_qdelay
- [-] tb_symb2chip
- [-] tb_top_tx
- [-] tb_upsampling
- [-] tb_dem_filter
- [-] tb_downsampling
- [-] tb_tap

```

144     32     n_ppdu <= PHR (bit_count);
145     32     n_state <= count_cycles_header;
146         if (bit_count = 7) then
147             4     n_state <= wait_for_data;
148             4     n_byte_count <= 0;
149             4     n_bit_count <= 0;
150         end if;
151     end if;
152     when wait_for_data =>
153         if (remaining = 0) then
154             3     n_state <= idle;
155             3     n_count <= THROUGHPUT - 3; -- conserve throughput between frames
156         elsif (count > 1) then
157             1275534 n_count <= count - 1;
158         elsif (not empty = '1') then
159             3080     rden <= '1';
160             3080     n_count <= THROUGHPUT - 1;
161             3080     n_state <= data;
162         end if;
163     when data =>
164         5048     n_ppdu <= fifo_ppdu;
165         5048     n_ppdu_valid <= '1';
166         5048     n_remaining <= remaining-1;
167         5048     n_state <= wait_for_data;
168     when others =>
169         0     n_state <= idle;
170         0     n_bit_count <= 0;
171         0     n_byte_count <= 0;
172         0     rden <= '0';
173         0     n_count <= THROUGHPUT - 1;
174     end case;
175 end process;
176
177
178 sinc: process(clk, rst)
179 begin
180     if (rst = '1') then
181         22     state <= idle;
182         22     bit_count <= 0;
183         22     byte_count <= 0;
184         22     ppdu <= '0';
185         22     ppu valid <= '0';

```

Branch Coverage

- Puede ser que entremos en un if, pero, ¿por cuál if / elsif / else salimos? ¿por cuál 'when X =>' ?
- Evalúa si se han alcanzado las distintas ramificaciones de nuestro código

Branch Coverage

case state is

83.33%

Branch	Source	Hits	Status
TRUE	when idle =>	13	Covered
TRUE	when count_cycles_header =>	79676	Covered
TRUE	when header =>	192	Covered
TRUE	when wait_for_data =>	1278618	Covered
TRUE	when data =>	5048	Covered
TRUE	when others =>	0	ZERO

if ((Looped = true) or (Head /= Tail)) then

50.00%

Branch	Source	Hits	Status
IF	if ((Looped = true) or (Head /= Tail)) then	385	Covered
ALL FALSE	if ((Looped = true) or (Head /= Tail)) then	0	ZERO

FSM Coverage

- Al verificar máquinas de estado, nos interesa saber si hemos cubierto:
 - Los estados
 - Las posibles transiciones entre estados
- Para el 'when others =>' normalmente hay que añadir una excepción

state		83.33%
States / Transitions	Hits	Status
State: idle	390214	Covered
Trans: idle -> count_cycles_header	4	Covered
Trans: idle -> idle	390209	Covered
State: count_cycles_header	79676	Covered
Trans: count_cycles_header -> header	192	Covered
Trans: count_cycles_header -> idle	0	ZERO
Trans: count_cycles_header -> count_cycles_header	79484	Covered
State: header	192	Covered
Trans: header -> count_cycles_header	188	Covered
Trans: header -> wait_for_data	4	Covered
Trans: header -> idle	0	ZERO
Trans: header -> header	0	ZERO
State: wait_for_data	1673819	Covered
Trans: wait_for_data -> idle	3	Covered
Trans: wait_for_data -> data	3080	Covered
Trans: wait_for_data -> wait_for_data	1670735	Covered
State: data	3080	Covered
Trans: data -> wait_for_data	3080	Covered
Trans: data -> idle	0	ZERO
Trans: data -> data	0	ZERO

Expression Coverage

Cuando asignamos:

```
salida <= a OR (b AND c);
```

Si salida = '1'...

- ¿Es porque a = '1' ?
- ¿Es porque b = '1' y c = '1' ?

Si salida = '0'...

- ¿Es porque a, b = '0'?
- ¿Es porque a, c = '0'?

Queremos asegurarnos de que hemos probado todos los casos

Condition Coverage

Como Expression Coverage, pero en las condiciones en lugar de las asignaciones:

```
if(a='1' OR (b='1' AND c='1')) then
```

- ¿a = '1'?
- ¿b='1' y c='1'?

else

- ¿a = '0' y b = '0'?
- ¿a = '0' y c = '0'?



Condition Coverage

FEC : Focused Expression Coverage

FEC Condition: <u>if (i_index = 30 AND q_index = 31)</u> <u>then</u>			50.00%
Input Term	Covered	Reason For No Coverage	Hint
(i_index = 30)	Yes		
(q_index = 31)	No	'_0' not hit	Hit '_0'
Rows	FEC Target	Hits	Matching Input Patterns
Row 1	(i_index = 30)_0	2	{ 0- }
Row 2	(i_index = 30)_1	2	{ 11 }
Row 3	(q_index = 31)_0	0	{ 10 }
Row 4	(q_index = 31)_1	2	{ 11 }

Contenido

- ¿Qué es la verificación?
- ¿Por qué verificar?
- 0.- Test dirigido
- 1.- Code coverage
- 2.- Assertions
- 3.- Modelado a nivel de transacción
- 4.- Self-checking testbenches
- 5.- Estímulos automáticos
- 6.- Functional coverage
- Bibliografía

Notifica si una condición no se cumple

```
assert condition report string  
severity severity_level;
```

4 niveles de gravedad:

- note
- warning
- error
- failure (stops simulation)

¿Son sintetizables?

- No son sintetizables, pero tampoco impiden la síntesis
- El sintetizador en general no mira los assertions
 - Sólo puede mirar aquellos assertions cuya condición sea estática (por ejemplo para evitar síntesis con GENERICS inválidos), y realiza el chequeo en tiempo de síntesis
- Sólo los tiene en cuenta el simulador

Tipos de assertions

- **Firewall assertions**
 - Para asegurar que tus bloques están siendo usados correctamente
 - Los suele añadir el ingeniero de diseño
- **Protocol monitor**
 - Para asegurar que diferentes bloques se están comunicando entre sí correctamente (están cumpliendo el protocolo)
 - Los suele añadir el ingeniero de verificación
 - Un protocol monitor tiene más que assertions

(Pero se usan las mismas sentencias VHDL)

Ejemplos

- **En VHDL:**

```
assert (cont >= 0 and cont <= 7)  
  report "cont overflow, should  
never happen!" severity failure;
```

También hay assertions en otros lenguajes como PSL o SystemVerilog

```
assert DATA_LENGTH > 0
```

```
report "fadapt : DATA_LENGTH must be a positive  
non-zero integer"  
severity failure;
```

```
assert (NOT (ifull = '1' and wr_en='1' and  
falling_edge(clk)))
```

```
report "fadapt : Trying to write in a full fifo: data  
will be lost. Check throughput of blocks"  
severity failure;
```

```
assert (NOT (empty = '1' and rd_en='1' and  
falling_edge(clk)))
```

```
report "fadapt : Trying to read from an empty fifo:  
invalid data will be processed"  
severity failure;
```


Si la condición es compleja, mejor en un `if`

- También se puede usar `report` sin `assert`:

```
if (output /= expected) then  
  report (“error in data”)  
  severity error;  
end if;
```

Contenido

- ¿Qué es la verificación?
- ¿Por qué verificar?
- 0.- Test dirigido
- 1.- Code coverage
- 2.- Assertions
- 3.- Modelado a nivel de transacción
- 4.- Self-checking testbenches
- 5.- Estímulos automáticos
- 6.- Functional coverage
- Bibliografía

Transaction-Level Modelling (TLM)

Es elevar el nivel de abstracción en verificación, separando:

- Los datos que se mueven por los interfaces

de

- El movimiento de pines y señales de control asociado

Transaction-Level Modelling (TLM)

Por ejemplo si enviamos datos por una fifo:

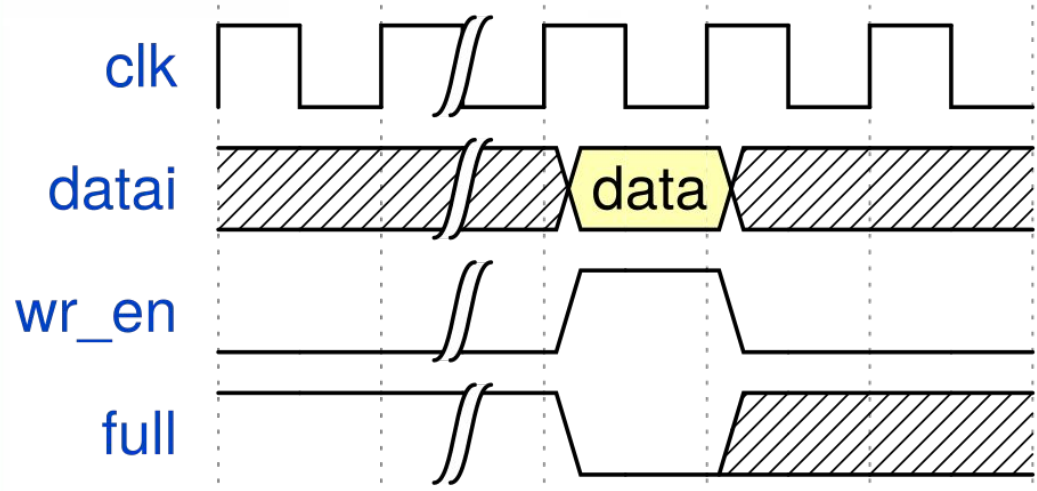
1. Esperamos a que no esté llena
2. Ponemos el dato
3. Activamos write_enable
4. Esperamos un ciclo de reloj
5. Desactivamos write_enable

Queremos separar el envío del dato (fifo_write) del movimiento de pines (full, write_enable, datai)

Transaction-Level Modelling (TLM)

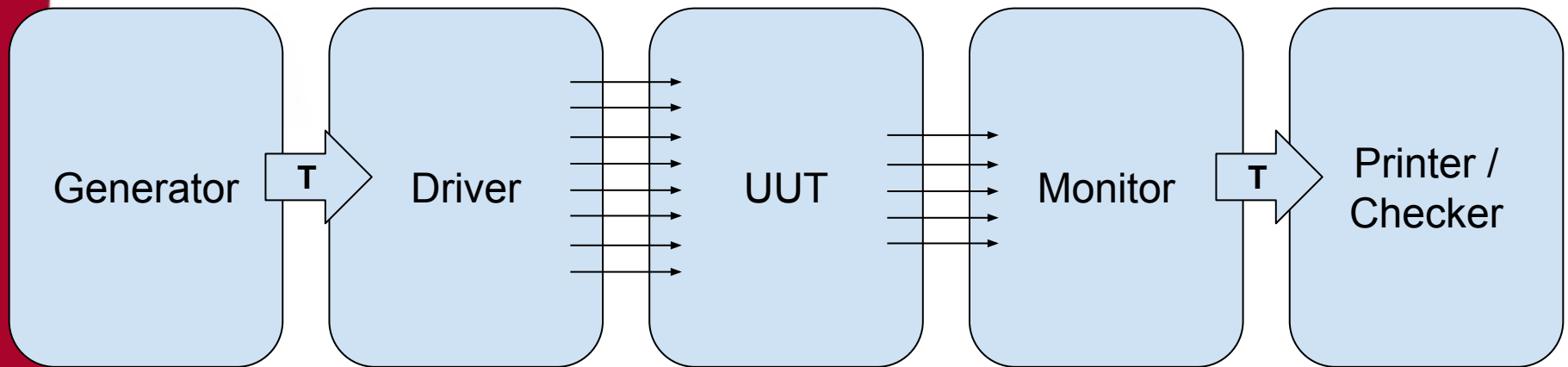
```
fifo_write(data);
```

← data se propaga por el interfaz



← movimiento de pines

Arquitectura de un testbench TLM



¿Cómo se hace?

Definimos un record (o un protected type en VHDL-2002/2008) con los datos asociados a cada canal:

```
type input_tran is
  record
    a   : std_logic_vector (7 downto 0);
    b   : std_logic_vector (7 downto 0);
    op  : op_type;
  end record;
```

¿Cómo se hace?

- Definimos entidad (basada en processes/procedures) para convertir las transacciones en movimiento de pines ('driver')
- Describimos entidad (basada en processes/procedures) para convertir el movimiento de pines en transacciones ('monitor')

Plan de pruebas

Ahora es más fácil definir un plan de pruebas:

- Ante X transacción(es) de entrada, se espera Y transacción(es) de salida

Más información en el Tema 8

Contenido

- ¿Qué es la verificación?
- ¿Por qué verificar?
- 0.- Test dirigido
- 1.- Code coverage
- 2.- Assertions
- 3.- Modelado a nivel de transacción
- 4.- Self-checking testbenches
- 5.- Estímulos automáticos
- 6.- Functional coverage
- Bibliografía

Self-checking Testbenches

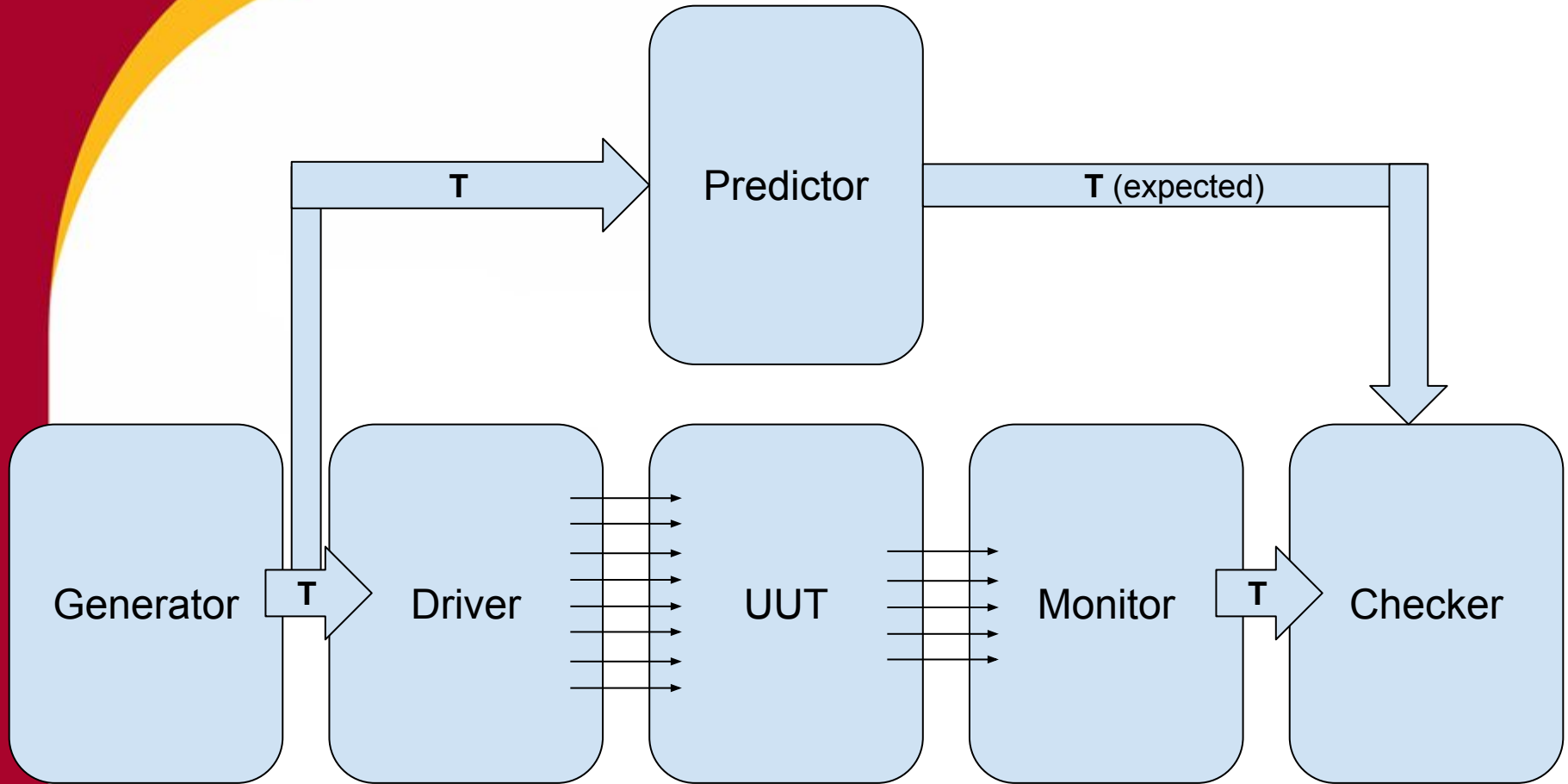
- En lugar de comprobar a mano las formas de onda, insertamos en el testbench comprobaciones de:
 - Si los movimientos de pines son correctos (assertions del protocol monitor)
 - Si los datos de salida son correctos
- Predictor: predice las transacciones de salida esperadas
- Checker: comprueba si las transacciones son correctas.

Diseño del checker

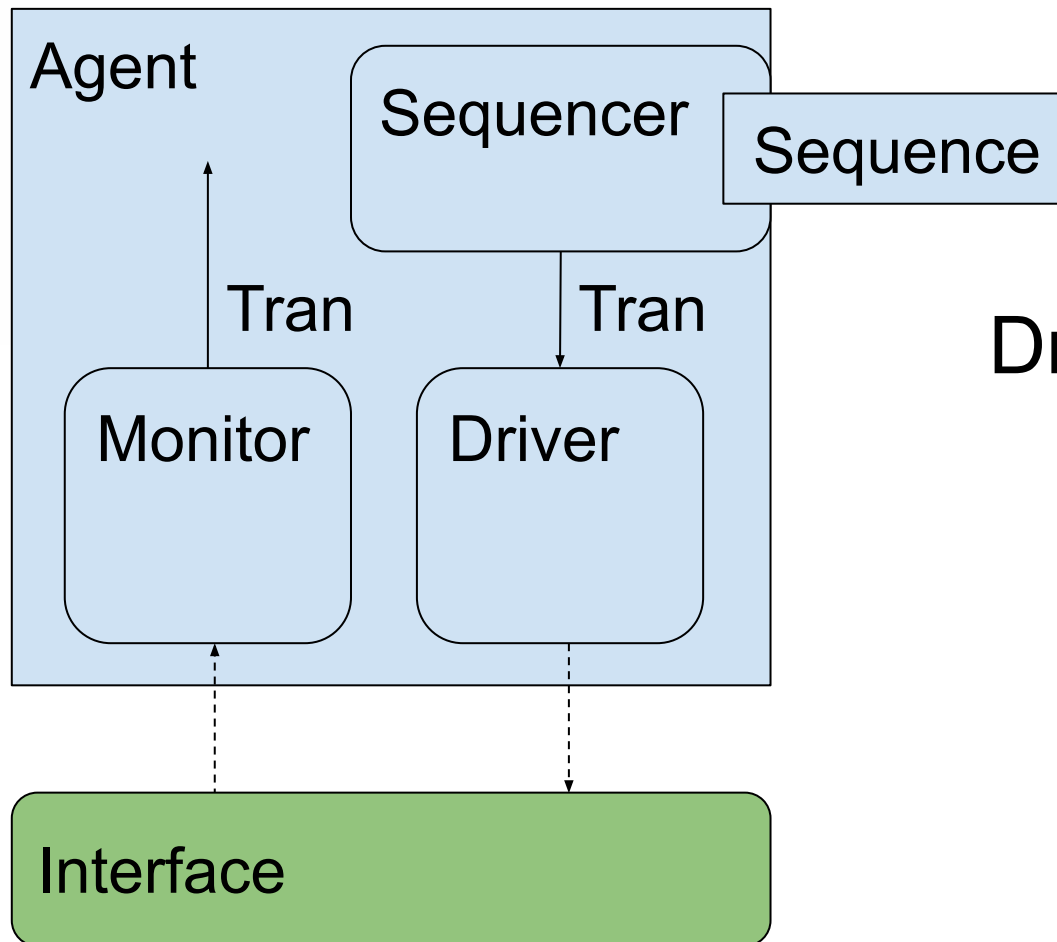
Dos opciones:

1. Generar ficheros de salida 'gold' provenientes de un modelo de alto nivel
 - Por ejemplo, para crosscheck con Matlab/octave
2. Integrar modelo de alto nivel en la simulación
 - Modelo realizado en VHDL o (System)Verilog
 - Interfaz QuestaSim-Matlab
 - Interfaz VHDL-C (GHDL, QuestaSim)
 - Python (CoCoTb)

Self-checking Testbenches



Agente de verificación



Driver + Monitor

Contenido

- ¿Qué es la verificación?
- ¿Por qué verificar?
- 0.- Test dirigido
- 1.- Code coverage
- 2.- Assertions
- 3.- Modelado a nivel de transacción
- 4.- Self-checking testbenches
- 5.- Estímulos automáticos
- 6.- Functional coverage
- Bibliografía

Estímulos automáticos

Si tenemos un 'checker' que incluye un modelo de alto nivel con el que comparar:

- Podemos generar estímulos aleatorios
- 'Test random' como contraposición a 'test dirigido'
- En realidad es 'constrained random' porque se aplican restricciones a los estímulos generados

Contenido

- ¿Qué es la verificación?
- ¿Por qué verificar?
- 0.- Test dirigido
- 1.- Code coverage
- 2.- Assertions
- 3.- Modelado a nivel de transacción
- 4.- Self-checking testbenches
- 5.- Estímulos automáticos
- 6.- Functional coverage
- Bibliografía

Alcance Funcional

Code coverage es muy útil pero NO nos dice:

- Si la ejecución fue correcta o no
- Si hemos probado todos los 'corner cases': valores, rangos, etc
- Si estamos aplicando los estímulos en secuencias correctas

Functional coverage indica si estamos cubriendo todo el plan de pruebas

Alcance Funcional

Ejemplo:

- Multiplicador 32 bits, 4G casos posibles
- Al menos deberíamos probar:
 - positivo * positivo
 - positivo * negativo
 - negativo * positivo
 - negativo * negativo
 - positivo * cero
 - negativo * cero
 - cero * positivo
 - cero * negativo
 - cero * cero

¿Cómo se hace?

- Se definen 'bins' (contenedores)
- Cuando se genera la transacción de entrada se anota a qué bin pertenece la transacción generada
- Al final de la simulación se genera un informe del coverage de cada bin (número de veces que se alcanza cada una)

Normalmente se utilizan packages de terceros que ya dan esta funcionalidad (OSVVM CoveragePkg en VHDL)

Contenido

- ¿Qué es la verificación?
- ¿Por qué verificar?
- 0.- Test dirigido
- 1.- Code coverage
- 2.- Assertions
- 3.- Modelado a nivel de transacción
- 4.- Self-checking testbenches
- 5.- Estímulos automáticos
- 6.- Functional coverage
- Bibliografía

Bibliografía

- Ray Salemi, *FPGA Simulation: A Complete Step-by-Step Guide*. Boston Light Press, 2009

Resultados de aprendizaje

- ¿Para qué sirven las métricas de verificación?
- Diferencias entre code coverage y functional coverage
- ¿Por qué tiene sentido hacer test con entradas aleatorias con restricciones (constrained random)?
- Conocer la importancia de los assertions
- Conocer qué es el modelado a nivel de transacción y cómo influye en la construcción de testbenches estructurados