

HY220

Εργαστήριο Ψηφιακών Κυκλωμάτων

**Χειμερινό Εξάμηνο
2022**

**Verilog: Στυλ Κώδικα και
Synthesizable Verilog**

Τα στυλ του κώδικα

- Τρεις βασικές κατηγορίες
 - Συμπεριφοράς - Behavioral
 - Μεταφοράς Καταχωρητών - Register Transfer Level (RTL)
 - Δομικός - Structural
- Και εμάς τι μας νοιάζει;
 - Διαφορετικός κώδικας για διαφορετικούς σκοπούς
 - Synthesizable ή όχι;

Behavioral (1/3)

- Ενδιαφερόμαστε για την συμπεριφορά των blocks
- Αρχικό simulation
 - Επιβεβαίωση αρχιτεκτονικής
- Test benches
 - Απο απλά ...
 - ... μέχρι εκλεπτυσμένα

```
initial begin
    // reset everything
end

always_ff @(posedge clk) begin
    case (opcode)
        8'hAB: RegFile[dst] = #2 in;
        8'hEF: dst = #2 in0 + in1;
        8'h02: Memory[addr] = #2 data;
    endcase

    if (branch)
        dst = #2 br_addr;
end
```

Behavioral (2/3)

- Περισσότερες εκφράσεις
 - for / while
 - functions
 - tasks
 - fork ... join
- Περισσότεροι τύποι
 - integer
 - real
 - πίνακες

```
integer sum, i;
integer opcodes [31:0];
real average;

initial
  for (i=0; i<32; i=i+1)
    opcodes[i] = 0;

always_ff @(posedge clk) begin
  sum = sum + 1;
  average = average + (c / sum);
  opcodes[d] = sum;
  $display("sum: %d, avg: %f",
    sum, average);
end
```



Behavioral (3/3)

```
module test;

task ShowValues;
input [7:0] data;
    $display(..., data);
endtask

...
always_ff @(posedge clk)
    ShowValues(counter);

...
endmodule
```

```
`define period 20

initial begin
    reset_ = 1'b0;
    reset_ = #(2*`period + 5) 1'b1;

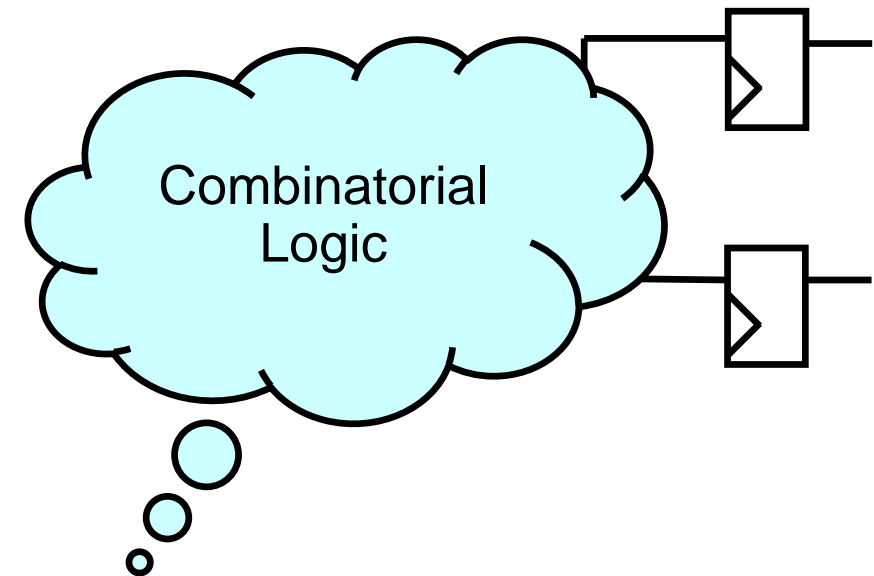
    @(branch);
    reset_ = 1'b0;
    reset_ = #(2*`period + 5) 1'b1;
end
```

```
always @(negedge reset_) begin
    fork
        a = #2 8'h44;
        b = #(4*`period + 2) 1'b0;
        c = #(16*`period + 2) 8'h44;
    join
end
```

Register Transfer Level - RTL

- Το πιο διαδεδομένο και υποστηριζόμενο μοντελο για **synthesizable** κώδικα
- Κάθε block κώδικα αφορά την είσοδο λίγων καταχωρητών
- Σχεδιάζουμε **κύκλο-κύκλο** με «οδηγό» το ρολόι
- Εντολές:
 - Λιγότερες
 - ... όχι τόσο περιοριστικές

Think Hardware!



Structural

- Αυστηρότατο μοντέλο
 - Μόνο module instantiations
- Συνήθως για το top-level module
- Καλύτερη η αυστηρή χρήση του

```
module top;
wire clk, reset;
wire [31:0] d_data, I_data;
wire [9:0] d_adr;
wire [5:0] i_adr;

clock clk0(clk);

processor pr0(clk, reset,
             d_adr, d_data,
             i_adr, i_data,
             ...);

memory #10 mem0(d_adr,
               d_data);

memory #6 mem1(i_adr,
               i_data);

tester tst0(reset, ...);

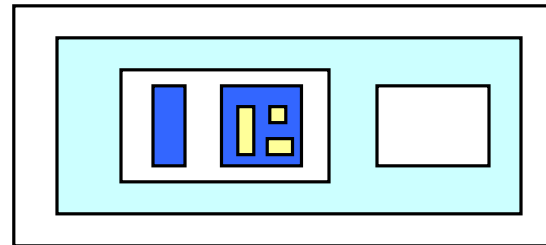
endmodule
```

... και μερικές συμβουλές

- **Ονοματολογία**
 - Όχι πολύ μεγάλα / μικρά ονόματα
 - ... με νόημα
- **Συνδυαστική λογική**
 - Όχι όλα σε μια γραμμή...
 - Ο compiler ξέρει καλύτερα
 - Αναγνωσιμότητα
- **Δομή**
 - Πολλές οντότητες
 - Ε όχι και τόσες!
- **Χρησιμοποιήστε indentation**
 - Καλύτερη ομαδοποίηση
 - Αναγνωσιμότητα

```
wire a, controller_data_now_ready;  
wire drc_rx_2, twra_malista;
```

```
if (~req &&  
    ((flag & prv_ack) |  
     ~set) &&  
    (count-2 == 0))  
    ...
```



... περισσότερες συμβουλές

- Διευκολύνουν την ανάγνωση και την χρήση του κώδικα (filters, tools etc)
 - Είσοδοι ξεκινούν με `i_*`
 - Οι έξοδοι με `o_*`
 - Οι τρικατάστατες με `io_*`
 - Εκτός από ρολόι και `reset`
 - Τα **active low** σήματα τελειώνουν με `*_n`

- Συνδέσεις πορτών συσχετίζοντας ονόματα

```
module adder(o_Sum, i_In1, i_In2);  
adder i0_adder ( // instance names i0_adder, i1_adder ...  
    .i_In2(B),  
    .i_In1(A),  
    .o_Sum(C)  
) // o_Sum = C, i_In1 = A, i_In2 = B
```

Σχόλια

- Ακούγεται μονότονο, αλλά...
 - Κώδικας hardware πιο δύσκολος στην κατανόηση
 - Ακόμα και ο σχεδιαστής ξεχνάει γρήγορα
 - Αν δε μπουν στην αρχή, δε μπαίνουν ποτέ
- Σημεία κλειδιά
 - Σε κάθε module
 - Σε κάθε block



```
/******  
 * Comments on module test:  
 * Module test comprises of  
 * the following components...  
******/  
module test;  
// Line comment
```

Verilog and Synthesis

- Χρήσεις της Verilog
 - Μοντελοποίηση και event-driven προσομοίωση
 - Προδιαγραφές κυκλώματος για σύνθεση (logic synthesis)
- Logic Synthesis
 - Μετατροπή ενός υποσυνόλου της Verilog σε netlist
 - Register Inference, combinatorial logic
 - Βελτιστοποίηση του netlist (area, speed)

Synthesizable Verilog Constructs

Construct Type	Keywords	Notes
ports	input, output and inout	
parameters	parameter	
module definition	module, endmodule	
signals and variables	wire, reg, tri	
instantiations	module instances, primitive gates	e.g. mymux(o,i0,i1,s) e.g. nand(out,a,b)
procedural	always, if, else, case	initial almost not supported
procedural blocks	begin, end	
data flow	assign	Delay ignored
Operators	+, -, &, , ~, !=, ==, etc	<u>Caution:</u> *, /, %
functions / tasks	function, task	Limited support (simple CL)
Loops	for, while	Limited support (assigns)

Register – D Flip Flop

```
module Reg # (  
    parameter N = 16,  
    parameter dh = 1)  
(  
    input          clk,  
    input          [N-1:0] i_D,  
    output reg [N-1:0] o_Q);  
//  
    always_ff @(posedge clk)  
        o_Q <= #dh i_D;  
//  
endmodule
```

Register with Asynchronous Reset

```
module RegARst #(
    parameter N = 16,
    parameter dh = 1)
(
    input          clk,
    input          reset_n,
    input          [N-1:0] i_D,
    output logic  [N-1:0] o_Q)
//
    always_ff @(posedge clk or negedge reset_n) begin
        if (~reset_n)
            o_Q <= #dh 0;
        else
            o_Q <= #dh i_D;
    end
endmodule
```

Register with Synchronous Reset

```
module RegSRst #(
    parameter N = 16,
    parameter dh = 1)
(
    input          clk,
    input          reset_n,
    input          [N-1:0] i_D,
    output logic  [N-1:0] o_Q)
//
    always_ff @(posedge clk) begin
        if (~reset_n)
            o_Q <= #dh 0;
        else
            o_Q <= #dh i_D;
    end
endmodule
```

Register with Load Enable

```
module RegLd #(  
    parameter N = 16,  
    parameter dh = 1)  
(  
    input          clk,  
    input          i_Ld,  
    input          [N-1:0] i_D,  
    output logic  [N-1:0] o_Q);  
//  
    always_ff @(posedge clk)  
        if (i_Ld)  
            o_Q <= #dh i_D;  
//  
endmodule
```


Set Clear flip-flop with Strong Clear

```
module scff_sc #(  
    parameter dh = 1)  
(  
    input        clk  
    input        i_Set,  
    input        i_Clear,  
    output logic o_Out);  
//  
    always_ff @(posedge clk)  
        o_Out <= #dh (o_Out | i_Set) & ~i_Clear;  
//  
endmodule
```

Set Clear flip-flop with Strong Set

```
module scff_ss #(
    parameter dh = 1)
(
    input        clk
    input        i_Set,
    input        i_Clear,
    output logic o_Out);
//
    always_ff @(posedge clk)
        o_Out <= #dh i_Set | (o_Out & ~i_Clear);
//
endmodule
```

T Flip Flop

```
module Tff #(
    parameter dh = 1)
(
    input      clk,
    input      rst,
    input      i_Toggle,
    output logic o_Out);
//
always_ff @(posedge clk)
    if(rst)
        o_Out <= #dh 0
    else if (i_Toggle)
        o_Out <= #dh ~o_Out;
//
endmodule
```

Multiplexor 2 to 1

```
module mux2 #(
    parameter N = 16)
(
    output [N-1:0] o_Out,
    input  [N-1:0] i_In0,
    input  [N-1:0] i_In1,
    input                i_Sel);
//
    wire [N-1:0] o_Out = i_Sel ? i_In1 : i_In0;
//
endmodule
```

Multiplexor 4 to 1

```
module mux4 #(
    parameter N = 32)
(
    input      [N-1:0] In0,
    input      [N-1:0] In1,
    input      [N-1:0] In2,
    input      [N-1:0] In3,
    input      [ 1:0] Sel,
    output reg [N-1:0] Out);
//
    always @(i_In0 or i_In1 or i_In2 or i_In3 or i_Sel) begin
        case ( i_Sel )
            2'b00 : o_Out <= i_In0;
            2'b01 : o_Out <= i_In1;
            2'b10 : o_Out <= i_In2;
            2'b11 : o_Out <= i_In3;
        endcase
    end
endmodule
```

Positive Edge Detector

```
module PosEdgDet #(
    parameter dh = 1)
(
    input  clk,
    input  i_In,
    output o_Out);
//
    logic Tmp;
    always_ff @(posedge clk)
        Tmp <= #dh i_In;
//
    assign o_Out = ~Tmp & i_In;
//
endmodule
```

Negative Edge Detector

```
module NegEdgDet #(
    parameter dh = 1)
(
    input  clk,
    input  i_In,
    output o_Out);
//
    logic Tmp;
    always_ff @(posedge clk)
        Tmp <= #dh i_In;
//
    assign o_Out = Tmp &~i_In;
//
endmodule
```

Edge Detector

```
module EdgDet #(
    parameter dh = 1)
(
    input  clk,
    input  i_In,
    output o_Out);
//
    logic Tmp;
    always_ff @(posedge clk)
        Tmp <= #dh i_In;
//
    wire Out = Tmp ^ i_In;
//
endmodule
```


Tristate Driver

```
module Tris #(
    parameter N = 32)
(
    input  [N-1:0] i_TrisIn,
    input                i_TrisOen_n,
    output [N-1:0] o_TrisOut);
//
    assign o_TrisOut = ~i_TrisOen_n ? i_TrisIn : `bz;
//
endmodule
```

Up Counter

```
module Cnt #(
    parameter N      = 32,
    parameter MaxCnt = 100,
    parameter dh     = 1)
(
    input          clk,
    input          i_En,
    input          i_Clear,
    output logic   o_Zero,
    output logic [N-1:0] o_Out);
//
always_ff @(posedge clk) begin
    if(i_Clear) begin
        o_Out  <= #dh 0;
        o_Zero <= #dh 0;
    end
    else if (i_En) begin
        if (o_Out==MaxCnt) begin
            o_Out  <= #dh 0;
            o_Zero <= #dh 1;
        end
        else begin
            o_Out  <= #dh o_Out + 1'b1;
            o_Zero <= #dh 0;
        end
    end
end
endmodule
```

Parallel to Serial Shift Register

```
module P2Sreg #(
    parameter N = 32,
    parameter dh = 1)
(
    input        clk,
    input        reset_n,
    input        i_Ld,
    input        i_Shift,
    input [N-1:0] i_In,
    output       o_Out);
//
    logic [N-1:0] TmpVal;
//
    always_ff @(posedge clk or negedge reset_n) begin
        if (~Reset_n) TmpVal <= #dh 0;
        else begin
            if (i_Ld) TmpVal <= #dh i_In;
            else if(i_Shift) TmpVal <= #dh TmpVal>>1;
        end
    end
//
    assign o_Out = TmpVal[0];
//
endmodule
```

Serial to Parallel Shift Register

```
module S2Preg #(
    parameter N = 32,
    parameter dh = 1)
(
    input          clk,
    input          i_Clear,
    input          i_Shift,
    input          i_In,
    output logic [N-1:0] o_Out);
//
always_ff @(posedge clk) begin
    if (i_Clear)
        o_Out <= #dh 0;
    else if (i_Shift)
        o_Out <= #dh {o_Out[N-2:0], i_In};
end
//
endmodule
```

Barrel Shift Register

```
module BarShiftReg(  
    parameter N = 32,  
    parameter dh = 1)  
(  
    input          clk,  
    input          reset_n,  
    input          i_Ld,  
    input          i_Shift,  
    input          [N-1:0] i_In,  
    output logic  [N-1:0] o_Out);  
//  
always_ff @(posedge clk) begin  
    if (~reset_n) o_Out <= #dh 0;  
    else begin  
        if (i_Ld)  
            o_Out <= #dh i_In;  
        else if (i_Shift)  
            o_Out <= #dh {o_Out[N-2:0], o_Out[N-1]};  
    end  
end  
//  
endmodule
```

3 to 8 Binary Decoder

```
module dec #(
    parameter Nlog = 3)
(
    input          [          Nlog-1:0] i_in,
    output logic  [((1<<Nlog))-1:0] o_out);
//
integer i;
//
always @(i_in) begin
    for (i=0; i<(1<<Nlog); i=i+1) begin
        if (i_In==i)
            o_out[i] = 1;
        else o_out[i] = 0;
    end
end
//
endmodule
```

8 to 3 Binary Encoder

```
module enc #(
    parameter Nlog = 3)
(
    input          [((1<<Nlog)-1):0] i_In,
    output logic  [Nlog-1:0] o_Out);
//
integer i;
//
always @(i_In) begin
    o_Out = x;
    for (i=0; i<(1<<Nlog); i=i+1) begin
        if (i_In[i]) o_Out=i;
    end
end
//
endmodule
```

Priority Enforcer Module

```
module PriorEnf #(
    parameter N = 8)
(
    input      [N-1:0] In,
    output reg [N-1:0] Out,
    output reg          OneDetected);
//
integer i;
reg      DetectNot;
always @(i_In) begin
    DetectNot=1;
    for (i=0; i<N; i=i+1) begin
        if (i_In[i] & DetectNot) begin
            o_Out[i]=1;
            DetectNot=0;
        end
        else o_Out[i]=0;
    end
    OneDetected = !DetectNot;
end
endmodule
```


Latch

```
module Latch #(
    parameter N = 16,
    parameter dh = 1)
(
    input [N-1:0] i_In,
    input i_Ld,
    output reg [N-1:0] o_Out);
//
always @(i_In or i_Ld)
    if (i_Ld) o_Out = #dh i_In;
//
endmodule;
```

Combinatorial Logic and Latches (1/3)

```
module mux3 #(
    parameter N = 32 )
(
    input [ 1:0] Sel,
    input [N-1:0] In2,
    input [N-1:0] In1,
    input [N-1:0] In0,
    output reg [N-1:0] Out);
    always @(In0 or In1 or In2 or Sel) begin
        case ( Sel )
            2'b00 : Out <= In0;
            2'b01 : Out <= In1;
            2'b10 : Out <= In2;
        endcase
    end
endmodule
```

Γιατί είναι λάθος;



Combinatorial Logic and Latches (2/3)

```
module mux3 #(
    parameter N = 32 )
(
    input [ 1:0] Sel,
    input [N-1:0] In2,
    input [N-1:0] In1,
    input [N-1:0] In0,
    output reg [N-1:0] Out);
    always @(In0 or In1 or In2 or Sel) begin
        case ( Sel )
            2'b00 : Out <= In0;
            2'b01 : Out <= In1;
            2'b10 : Out <= In2;
            default : Out <= x;
        endcase
    end
endmodule
```

To σωστό !!!



Combinatorial Logic and Latches (3/3)

- Όταν φτιάχνουμε συνδυαστική λογική με always blocks και regs τότε πρέπει να αναθέτουμε τιμές στις εξόδους της λογικής για όλες τις πιθανές περιπτώσεις εισόδων (κλήσεις του always) !!!
 - Για κάθε if ένα else
 - Για κάθε case ένα default
- Παραλείψεις δημιουργούν latches κατά τη σύνθεση
 - Οι περιπτώσεις που δεν καλύπτουμε χρησιμοποιούνται για το «σβήσιμο» του load enable του latch. (θυμάται την παλιά τιμή)