


# 2024 Digital IC Design

## Homework 3: matrix multiplier

NAME		楊晴雯					
Student ID		P76114511					
Simulation Result							
Functional simulation	100	Gate-level simulation	100	Clock width	18 (ns)	Gate-level simulation time	87156 (ns)
<div><div><div><div>Project: /home/nanaili/h/courseworks/IC-Design/hw3</div><div><div>h) testfixture.v</div><div>h) MM helper.v</div><div>h) MM.v</div></div><div>h) testfixture.v Verilog 1 05/10/2024 11:56:44... h) MM helper.v Verilog 0 05/09/2024 03:12:01... h) MM.v Verilog 2 05/10/2024 11:28:49...</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div><div><div>h) testfixture</div><div>h) MM helper</div><div>h) MM</div></div></div>							

Flow Summary	
 <<Filter>>	
Flow Status	Successful - Fri May 10 11:29:32 2024
Quartus Prime Version	20.1.1 Build 720 11/11/2020 SJ Lite Edition
Revision Name	MM
Top-level Entity Name	MM
Family	Cyclone IV E
Device	EP4CE55F23A7
Timing Models	Final
Total logic elements	534 / 55,856 ( < 1 % )
Total registers	320
Total pins	36 / 325 ( 11 % )
Total virtual pins	0
Total memory bits	0 / 2,396,160 ( 0 % )
Embedded Multiplier 9-bit elements	4 / 308 ( 1 % )
Total PLLs	0 / 4 ( 0 % )

### Description of your design

For this assignment, I designed 2 modules to perform the matrix multiplication.

(1) MMHelper: it handles the writing and computing of data.

```

module MMHelper#(parameter DATA_WIDTH=8, parameter N=4, parameter OUT_DATA_WIDTH=20)(
    clk,
    reset,
    wr_enable,
    compute_enable,
    in_data,
    i, j,
    is_first_mat,
    match_dim,
    out_data);
    input clk, reset;
    input wr_enable, compute_enable;
    input [DATA_WIDTH-1:0] in_data;
    input [N-1:0] i, j; // matrix indexing
    input is_first_mat; // 1 if first matrix, 0 if second matrix; only takes effect in wr_enable mode
    input [N-1:0] match_dim; // the dimension of the matrices to match with; 4*4 matrix at most; match_dim <= N
    output reg signed [OUT_DATA_WIDTH-1:0] out_data;
    // N*N matrix at most
    reg signed [DATA_WIDTH-1:0] M1 [N-1:0][N-1:0]; // matrix storage
    reg signed [DATA_WIDTH-1:0] M2 [N-1:0][N-1:0];
    integer x, y, k; // running index

```

(2) MM: it handles when to write data, to which location (which matrix and at which index pair) to write data into, when to compute and all the valid/busy signals.

```

module MM#(parameter DATA_WIDTH=8, parameter N=4, parameter OUT_DATA_WIDTH=20)(in_data,
    col_end,
    row_end,
    is_legal,
    out_data,
    rst,
    clk,
    change_row,
    valid,
    busy);
    input clk;
    input rst;
    input col_end;
    input row_end;
    input [DATA_WIDTH-1:0] in_data;

    output wire signed [OUT_DATA_WIDTH-1:0] out_data;
    output reg is_legal;
    output reg change_row, valid, busy;
    reg wr_enable, compute_enable, is_first_mat;
    // wr_enable = 1: write to the matrix at (i,j)
    // is_first_mat = 1: write to M1, else write to M2
    // compute_enable = 1: compute the product of M1 and M2 at (i,j)
    reg [N-1:0] i, j;
    reg [2:0] currState, nextState;
    reg reset;
    // INPUT_MAT1: inputs the first matrix
    // INPUT_MAT2: inputs the second matrix
    // COMPUTE: computes 1 element of the output matrix
    // OUTPUT: outputs the computed element
    parameter [2:0] RESET=3'b000, INPUT_MAT1=3'b001, INPUT_MAT2=3'b010, COMPUTE=3'b011, OUTPUT=3'b100;
    reg [N-1:0] M1_height, M1_width, M2_height, M2_width;
    reg [N-1:0] match_dim; // M1 x M2 requires they match in M1's width and M2's height; match_dim records this matching dimension

```

MM follows the design of “2 Comb + 1 Sequential logic” rules. It uses 5 states to monitor the whole program flow. Each time a testcase (a computation procedure) ends, it goes to RESET state to clear all the signals and the matrix storage inside MMHelper. I move all signals that only change at certain states to the sequential block to ensure the cleanness of the other 2 combinational circuits. Note that in COMPUTE state, I compute the (i,j) element of output matrix, which can be at most 4 additions and 4 multiplications in 1 clock cycle and could be the critical path. An optimization possibility is to separate them into 4 clock cycles.

Special thanks to the TA in charge for pointing out the timing (posedge/negedge) mismatch between 2 modules, which I failed to detect on my own.

*Scoring = (Total logic elements + total memory bit + 9\*embedded multiplier 9-bit element) × (Total cycle used\*clock width)*