

Lab 3: Sequential Circuits

Group 21: 陳克盈 (112062205)、蔡明妍 (112062224)

Table of Contents

1 Q1: 4-bit Ping-Pong Counter	2
1.1 Implement	2
1.2 Circuit	2
1.3 Testbench	4
2 Q2: First-In First Out (FIFO) Queue	4
2.1 Implement & Circuit	4
2.2 Testbench	7
3 Q3: Multi-Bank Memory	9
3.1 Implement	9
3.2 Circuit	11
4 Q4: Round-Robin FIFO Arbiter	13
4.1 Implement	13
4.2 Circuit	14
4.3 Testbench	16
5 Q5: 4-bit Parameterized Ping-Pong Counter	17
5.1 Implement	17
5.2 Circuit	17
6 FPGA: 4-bit Paramterized Ping-Pong Counter on FPGA	19
6.1 debounce	20
6.2 One Pulse	21
6.3 Display Control	22
7 Other	23

1 Q1: 4-bit Ping-Pong Counter

1.1 Implement

這題需要實作一個 4-bit 的 Ping-Pong Counter，會從 0 開始累加，直到 15 後再從 15 開始減少至 0，不斷循環。

在 verilog 程式碼方面，我們使用了多個 if 條件式，判斷目前屬於什麼狀態：

- $rst_n = 0$: 將 $started, direction$ 設為 true，並將輸出 out 設為 0。
- $started \& enable$: 代表 Counter 正在運作，此時會根據 $direction$ 進行加減：
 - $out = 15, direction = 1$: 代表再繼續往上就會超出範圍，因此將 $direction$ 設為 0 並將輸出 -1
 - $out = 0, direction = 0$: 與上個情況相反，將 $direction$ 設為 1 並將輸出 $+1$
 - 其他情況：根據 $direction$ 進行加減

1.2 Circuit

在電路方面，需要實作的部分如下：

- $started, direction, out$ 儲存：使用了三個 D-Flip-Flop 來儲存
- 計算下一個 clock cycle 的 $out, direction$ ：每個 clock cycle 會根據當下的 $out, direction$ ，透過加減法器預先算出 $out + 1, out - 1$ ，再透過多個 AND gate, NOT Gate，來實作出上述的條件式，分別導至四條線路。最後，再利用 MUX，根據對應的線路與條件來決定下一個 clock cycle 的 out 以及 $direction$ 。
- $enable$: 算出 $out, direction$ 之後，利用 MUX 處理 $enable$ ，若是 $enable = True$ ，則將新的 $out, direction$ 輸入至 D-Flip-Flop，否則就輸入原來的值。
- $reset$: 在上述訊號都處理完後，會再經過一關判斷是否需要 $reset$ ，如果不用則使用上述計算出來的值，否則就將該值設為初始值。

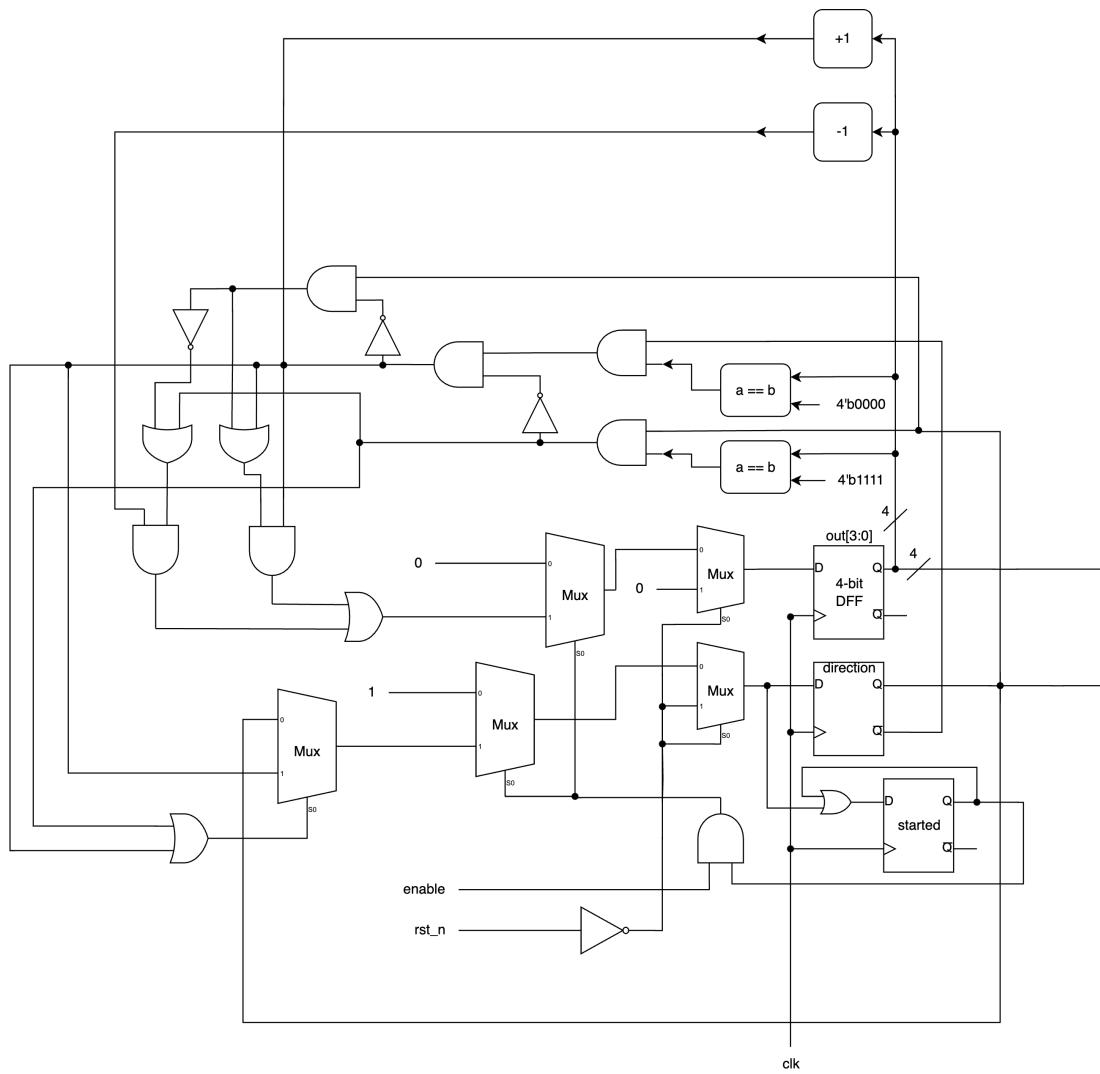


Fig. 1 Q1 Circuit

1.3 Testbench

由於操作相較單純，因此直接利用一個迴圈跑 2^8 次，每次都將 enable 反轉，觀察輸出是否符合預期：

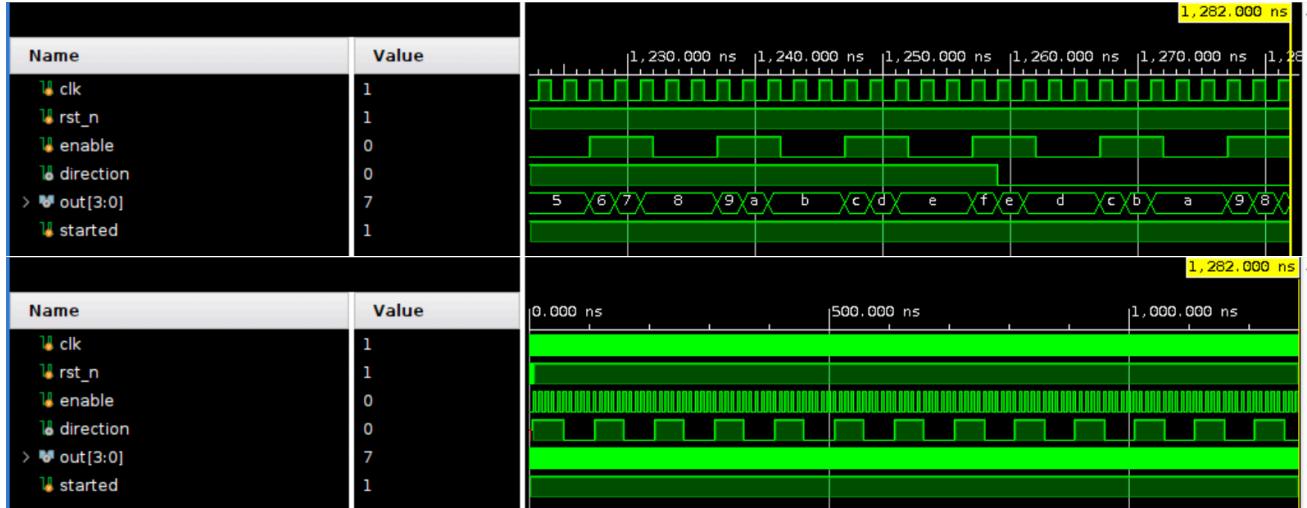


Fig. 2 Q1 Testbench Wave

2 Q2: First-In First Out (FIFO) Queue

2.1 Implement & Circuit

這邊要實現一個 8 個 8-bit 資料的 Queue (First in First out)，實作內容主要以這幾個數值的計算為主：

- *started*：是否開始運作，為 register，會在每個 posedge 時被計算
- *raddr*：讀取的位址，為 register，會在每個 posedge 時被計算
- *waddr*：下一次要寫入的位址，為 register，會在每個 posedge 時被計算
- *count*：目前 Queue 中有幾個資料，為 register，會在每個 posedge 時被計算
- *error*：是否有錯誤，為 wire，判斷方式為：當 *count* = 0 且 *ren* = 1，或是 *count* = 8 且 *wen* = 1 時，*error* 為 True，前者代表沒有資料可以讀取，後者代表沒有空間可以寫入。

而操作過程如下：

- (1) reset：當 *rst_n* 與 *started* 皆為 False 時，將 *started* 設為 True
- (2) 開始後，如果沒有錯誤且 *ren* = 1，則將輸出設定為 *raddr* 的位置、將 *raddr* 設為 *raddr* + 1，以及將 *count* 減一
- (3) 如果上述條件都沒有達到，且要寫入的話，則將 *waddr* 的位置設定為 *din* (data input)、將 *waddr* 設為 *waddr* + 1，以及將 *count* 加一

Memory

首先先介紹我們設計的記憶體單位，我們透過 8 個 8-bit 的 D-Flip-Flop 作為儲存單位，而記憶體控制的部分，除了 *clock* 之外會接收 4 個參數，分別為：

- *ren*：是否讀取記憶體
- *wen*：是否寫入記憶體
- *addr*：讀取或寫入的記憶體位置
- *din*：寫入的資料

並且會輸出 *dout*，代表讀取的資料。

判斷邏輯會是這樣的步驟：

- (1) 如果 *ren* = 1，那麼不執行寫入，直接輸出 *addr* 這個位置的值
- (2) 如果沒有要讀取，且要寫入的話，那麼就將 *din* 的值設為是 *addr* 這個位置新的值
- (3) 沒有要讀取也沒有要寫入的話，就輸出 0 然後不對 DFF 做任何動作

在電路實現的部分，大致會分成幾層：

- (1) 判斷輸入：首先使用比較器對每個位址 *i* 判斷 *addr* 是否等於 *i*，並將其結果與 *!ren&wen* 做 AND，得到的結果便是這個位址是否要寫入。
- (2) D-Flip-Flop 控制：在每個 DFF 前加上一個 MUX，根據上述的結果決定 DFF 的輸入是 *din* 還是原本的值
- (3) 輸出判斷：與第一步相似但相較簡單，直接使用比較器判斷 *addr* 是否等於 *i*，並將結果與 DFF 的輸出做 AND，就能得到這個位址的輸出值。由於只會有一個位址會有輸出值，因此在最後直接做 Bitwise OR 就可以得到最終的輸出。

下圖演示的是 8 個 8-bit 的記憶體，可根據需求調整每個單位的位元大小以及有幾個單位。

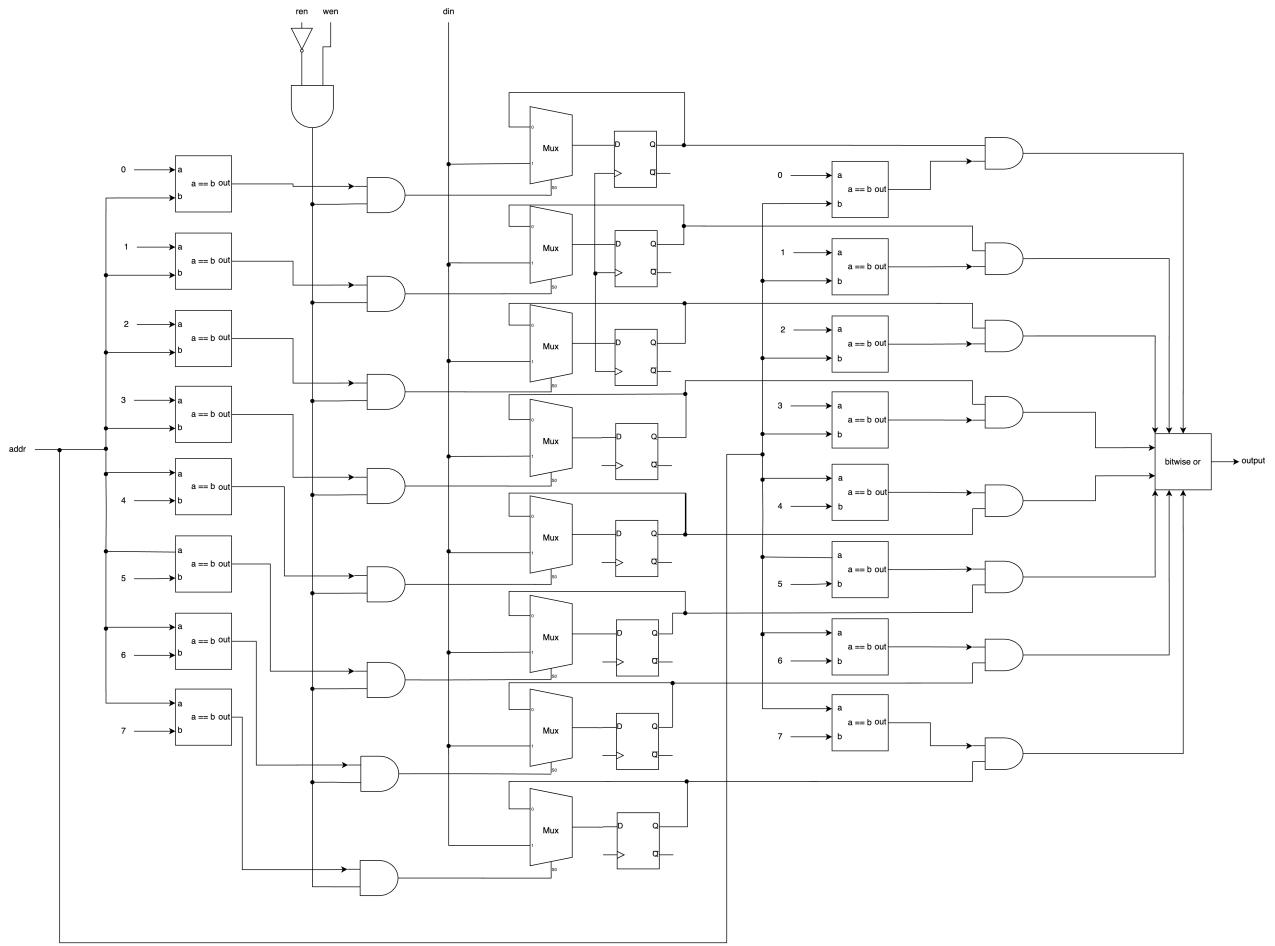


Fig. 3 Memory

FIFO

FIFO 的部分則是利用了上述的記憶體單位，計算出要傳給 Memory 的 ren , wen , $addr$, din 後，得到輸出的結果。

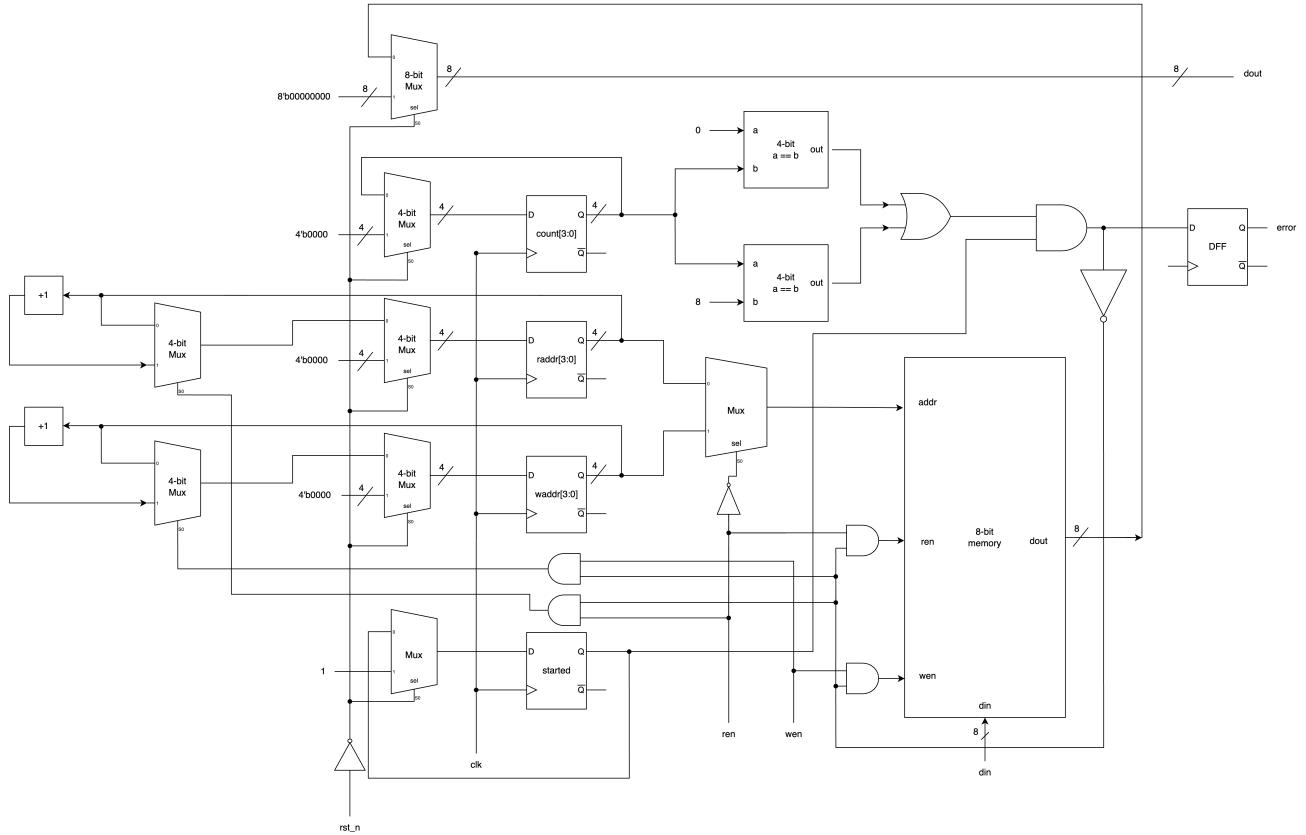


Fig. 4 Q2 Circuit

2.2 Testbench

我們寫了兩個 Testbench，首先是重現題目範例中的波形圖：



Fig. 5 Q2 Example Testbench

接著是我們使用 SystemVerilog 提供的 Queue，進行更完整的測試。由於 ren, wen, din 的組合數太多，因此我選擇了使用跑 2^{10} 測試，每次將這些輸入值設定為一個隨機值，藉此來跑到盡可能多的 case，並透過與 SystemVerilog 中，絕對正確的 Queue 來比對是否有錯誤。執行結果如圖 6 所示。

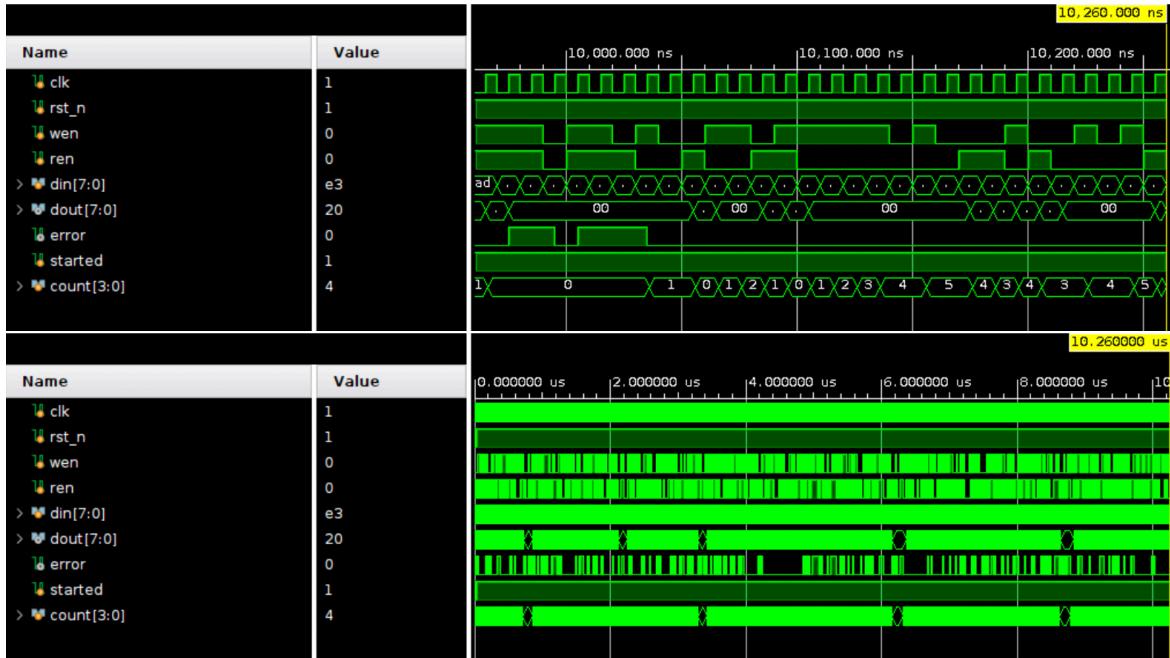


Fig. 6 Q2 SystemVerilog Testbench Wave

但由於 NTHUCAD 不支援 SystemVerilog，因此額外再寫了一個 Testbench。執行結果如下圖 7 所示。

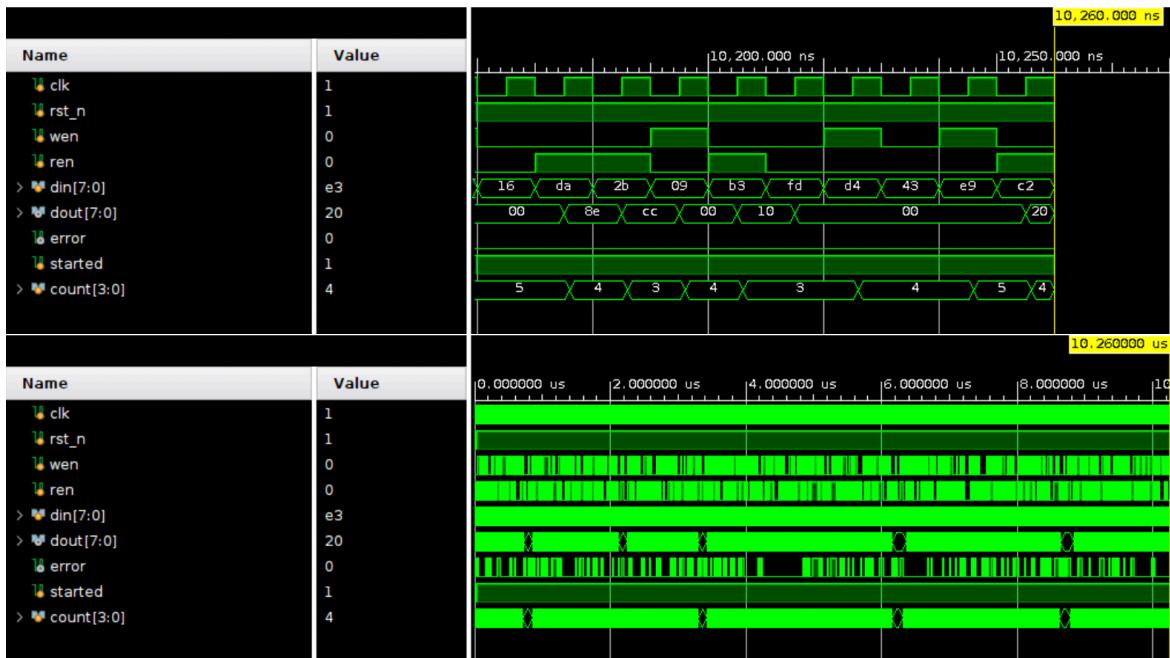


Fig. 7 Q2 Testbench Wave

3 Q3: Multi-Bank Memory

3.1 Implement

這題需要實作一個 Multi-Bank Memory，每個 Bank 有 4 個 Sub-Bank，每個 Sub-Bank 由 128 個 8-bit memory 組成，總共有 4 個 Bank，如下圖 ?? 所示。

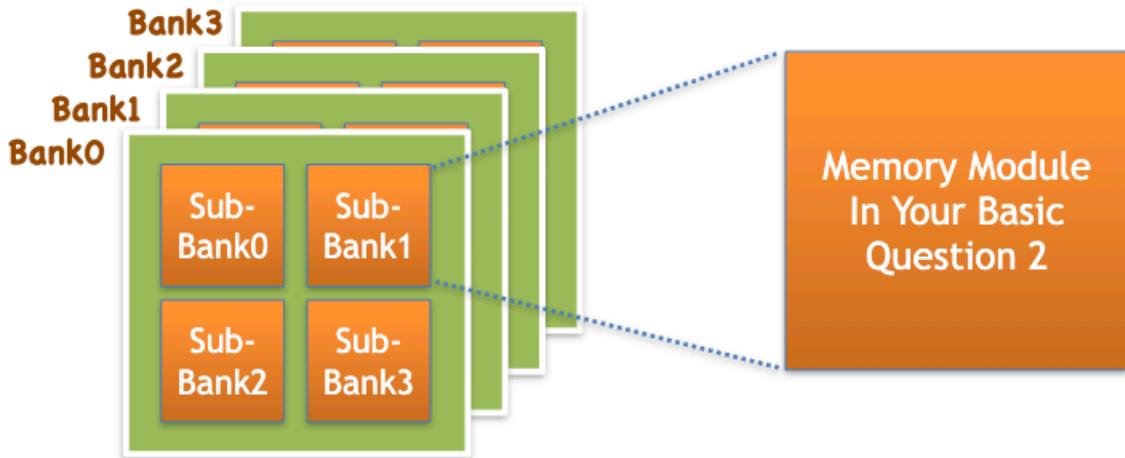


Fig. 8 Q3 Spec

輸入的部分由以下幾個部分組成：

- ren, wen ：是否讀取或寫入
- $raddr(11\text{ bit})$ ：讀取的位址，前兩個 Bit 代表著是第幾個 Bank，接下來的兩個代表的是第幾個 Subbank。
- $waddr (11\text{ bit})$ ：寫入的位址，格式同上
- $din (8\text{ bit})$ ：寫入的資料

Bank

- input ren, wen ：讀取或寫入的信號
- input $[8:0] raddr, waddr$ ：讀取或寫入的位址，前 2 Bit 代表是哪個記憶體單位，後 7 個則是該記憶體單位內的位址
- input $[7:0] din$ ：寫入的資料
- output $[7:0] dout$ ：讀取的資料（只在 $ren = 1$ 時有意義）

這邊首先建立了四個長度 128，位寬 8-bit 的記憶體，而我們要做的事就是正確的算出要輸入到記憶體的參數是什麼：

- ren ：利用與 $raddr[8 : 7] == i$ ($i \in [0, 3]$) 做 AND 運算，來決定這個記憶體單位要不要讀取
- wen ：與 ren 的處理方式一樣，只是改成使用 $waddr$ 來判斷。
- $address$ ：透過三元運算子，當 $ren = 1$ 時，將 $address$ 設為 $raddr$ ，否則就設為 $waddr$

主 Module

主要的 Module 負責整體的輸入輸出，將輸入的參數正確的分配給各個 Bank，並將正確的 Bank 輸出導向至最後的輸出。

在處理輸入的部分，主要分為以下步驟：

- ren ：直接利用 $ren \& (raddr[10 : 9]) == i$ ($i \in [0, 3]$) 的方式來決定每個 Bank 的 ren
- wen ：分為兩個步驟

(1) 判斷是否能夠輸入，題目規定，當要求同時讀寫同一個 Sub-bank 時，就以讀的操作為主，因此先利用 $wen \&& (ren == 0 || (waddr[10:7] \neq raddr[10:7]))$ 判斷出這次的寫入操作是否合法

(2) 與 ren 用一樣的方式將上述的信號分配到正確的 Bank

至於輸出的部分，我使用了四個 8 bit 的 wire: $out[3 : 0]$ ，分別接至四個 Bank 的輸出，由於在處理輸入信號的部分，當該 Bank 不是要求的 Bank 時， $output$ 會直接是 0，因此要取得正確的輸出就只要將四個 $output$ 做 Bitwise OR 即可。

3.2 Circuit

Memory

這部分沿用的是前面提到的 Memory，將其長度擴充為 128，由於篇幅關係就不額外展示長度 128 的電路圖。

Bank

首先，利用 Mux，以 ren 作為 sel bit，判斷出要操作的 address 是哪一個。若 $ren = true$ ，就選擇 $raddr$ 的後七個 bit，否則就選擇 $waddr$ 的後七個 bit。

接著使用比較器，用 $waddr, raddr$ 的前兩個 bit 與 $0 \sim 3$ 做比較，找出實際要發出訊號的記憶體單位是哪一個，最後再分別跟 ren, wen 做 AND 運算，確保是做哪個操作後，就能夠將訊號傳遞至記憶體單位。

由於只會有一個記憶體單位有輸出值（其他都會被設定為 0），因此最後直接將 4 個記憶體單位的輸出做 Bitwise OR 就能夠得到最後的輸出。如圖 9 所示。

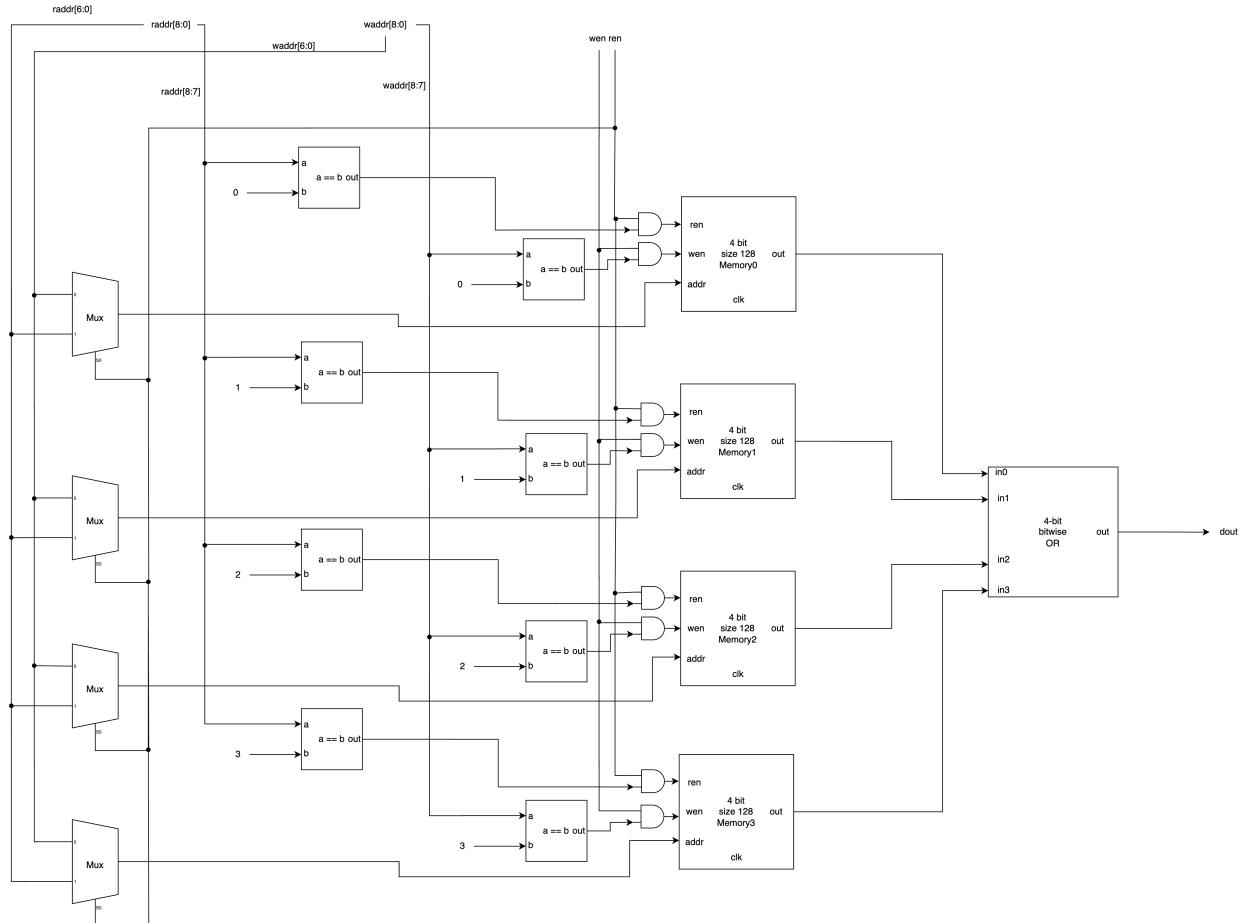


Fig. 9 Q3 Bank

Main Module

與 Bank 的實作方法類似，不過因為同一個記憶體區塊不能同時讀寫的緣故，因此 wen 使用了不等於的比較器，比較 $waddr, raddr$ 的前四個 bit 是否不同，若是不同則將 wen 設為 0 如圖 10 所示。

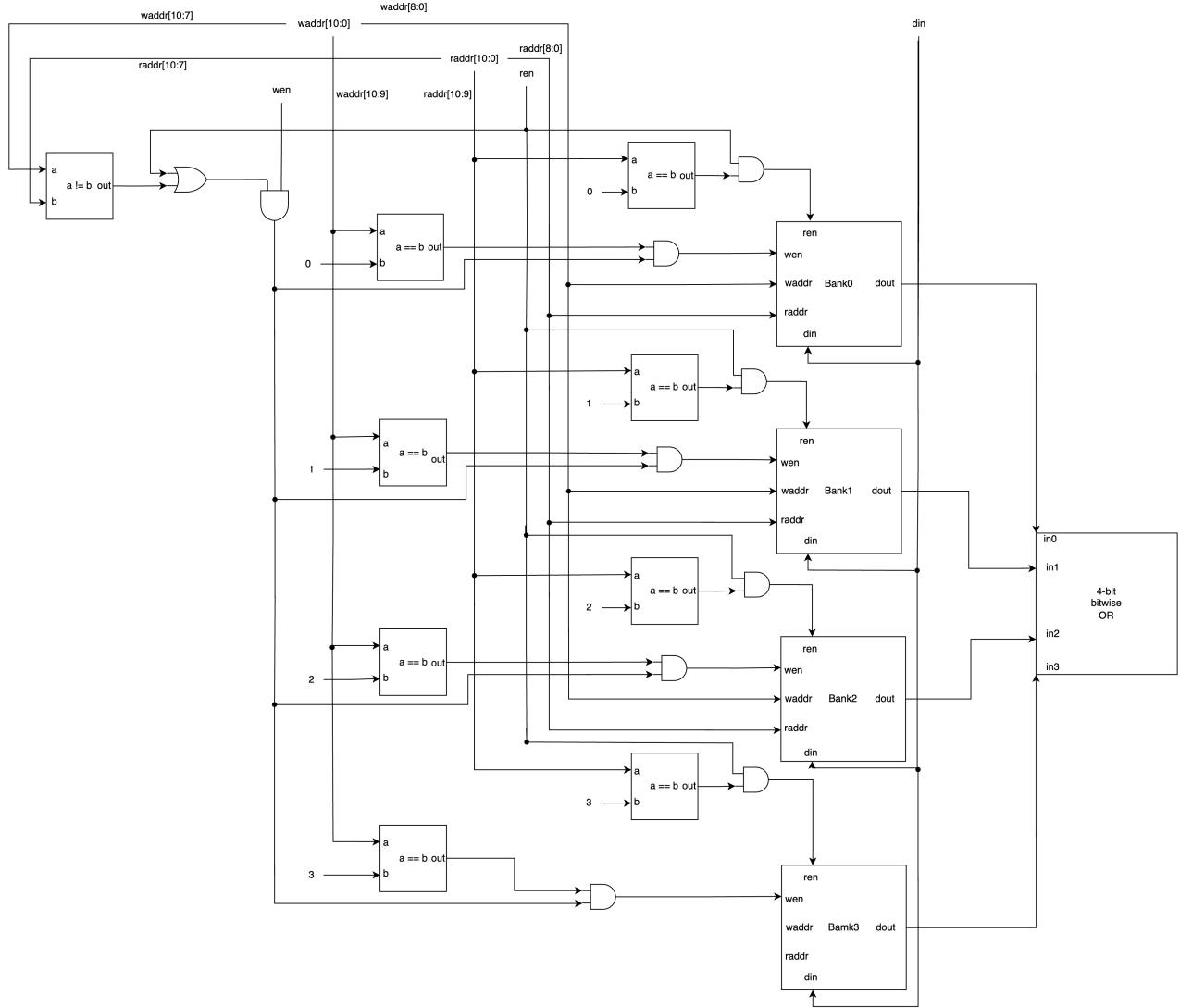


Fig. 10 Q3 Main Module

4 Q4: Round-Robin FIFO Arbiter

- input clk: clock
- input rst_n: 重置信號
- input [3:0] wen : 四個 bit 的寫入信號， $wen[i]$ 代表第 i 個 Queue 是否要輸入
- input [7:0] a, b, c, d : 分別對應到 $i = 0, 1, 2, 3$ 的寫入資料
- output [7:0] dout : 輸出的資料
- output valid : 目前是否能夠輸出資料

這題需要實作一個 Arbiter，會根據 wen 的訊號寫入 Queue 中，並輪流輸出 Queue 中的資料，大致上會有幾種情況：

- 要輸出第 i 個 Queue 的資料，但是該 Queue 正在被寫入：不輸出
- 要輸出第 i 個 Queue 的資料，但是該 Queue 是空的：不輸出
- 要輸出第 i 個 Queue 的資料，且該 Queue 有資料：輸出並 pop 該資料

4.1 Implement

首先使用四個章節 2 實作的 Queue，作為這題的儲存單位。

接著是處理輸入的部分，由於這題是輸入優先，所以我們直接將 $wen[i]$ 以及 a, b, c, d 作為四個 Queue 的 wen 輸入，並將輸出導出到 $out[0] \sim out[3]$ 而 ren 因為輸入優先，因此需要先與 $wen[i]$ 的反相做 AND 運算，才能夠保證輸出只有在沒有輸入的時候才會進行。

接著是將 Queue 的輸出導向至 $dout$ 的部分，我使用一個 2-bit 的 counter register，會在每個 posedge +1 來創造 $0 \sim 3$ 的循環，並用來記錄目前是準備要讀第幾個 Queue，在第 t 個 clock cycle 時，會透過當下 counter 對應的 $ren[i]$ 向 Queue 發送讀取請求，而輸出會在下一個 clock cycle: $t + 1$ 被更新到對應的 $out[i]$ 。

不過輸出會有兩種情況：合法與不合法：

- 不合法：當 Queue 無法執行該操作時，會透過 $error[i]$ 輸出 error 訊號，並在 $t + 1$ 時被更新，再與對應的 $wen[i]$ 做 OR 並反相就是 valid 的數值。不過因為 $wen[i]$ 並不像 $error[i]$ 一樣，會在 clock posedge 更新，因此先將 $wen[i]$ 儲存在一個 register 中，將數值調整為與 clock 同步後，再與 $error[i]$ $\square\square\square\square\square\square$ 。
- 合法：將對應的 $out[i]$ 導向至 $dout$ ，但由於收到 FIFO 的值是在 $t + 1$ 的時候，因此此時需要輸出的答案是 $out[counter - 1]$ 的值，

4.2 Circuit

首先介紹一個 4-bit 的 Shifter，能夠指定將輸入的數字往左位移 $shift$ 次，由四個 4-bit 4-to-1 MUX 組成。

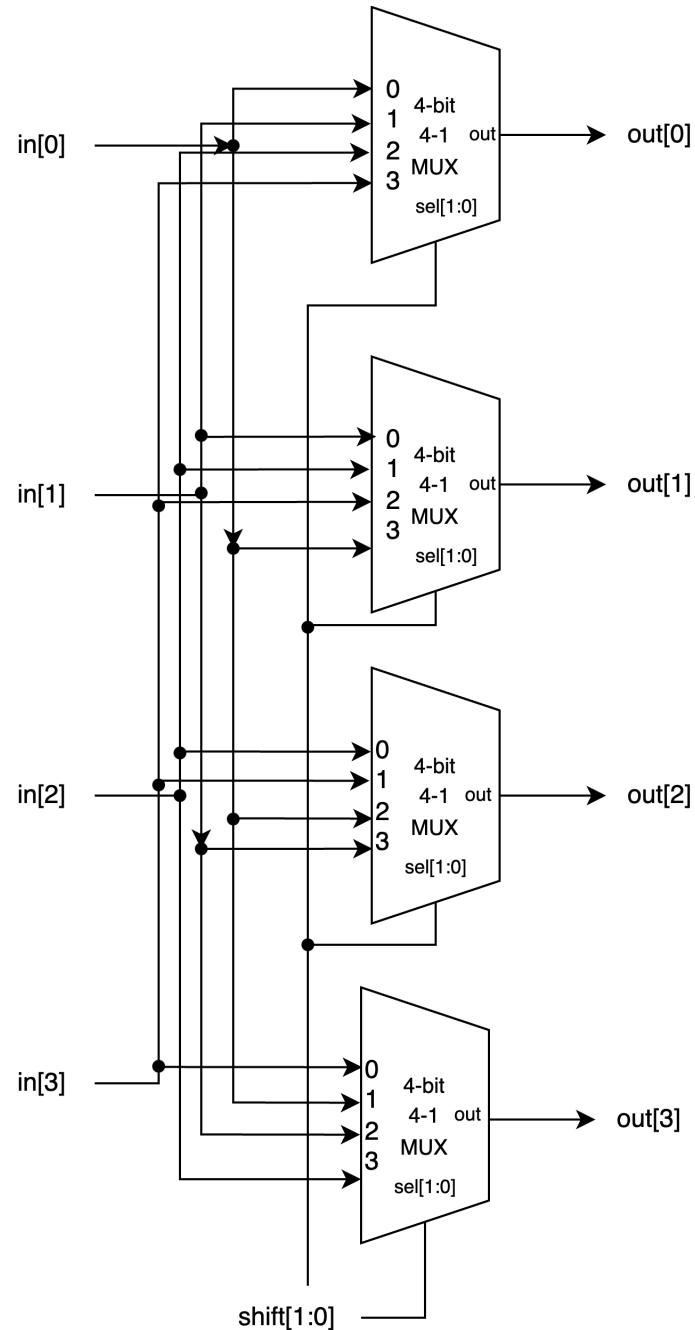


Fig. 11 Q4 Shifter

接著是整體的電路實作，基本上分為三層：

輸入層

- ren : 透過 left shift 0001 i 次的方式，來指定 ren 的第幾個位元要是 true
- counter : 每個 clock cycle 會加一，由於是 2-bit 的關係，因此數到 4 時會自動歸零為 0
- wenc : 將 wen 存進去，使其與 clock 同步

計算層

將輸入的 wen 以及計算出來的 ren 傳到 Queue 中

輸出層

透過以 counter 作為 sel bit 的 MUX 判斷要輸出哪一個 output 的值，但由於當 error 發生的時候有可能得到 X 的輸出，因此在最後再加一個 2-to-1 MUX，用 valid 當作 sel bit，在發生不合法的情況時直接輸出 0。

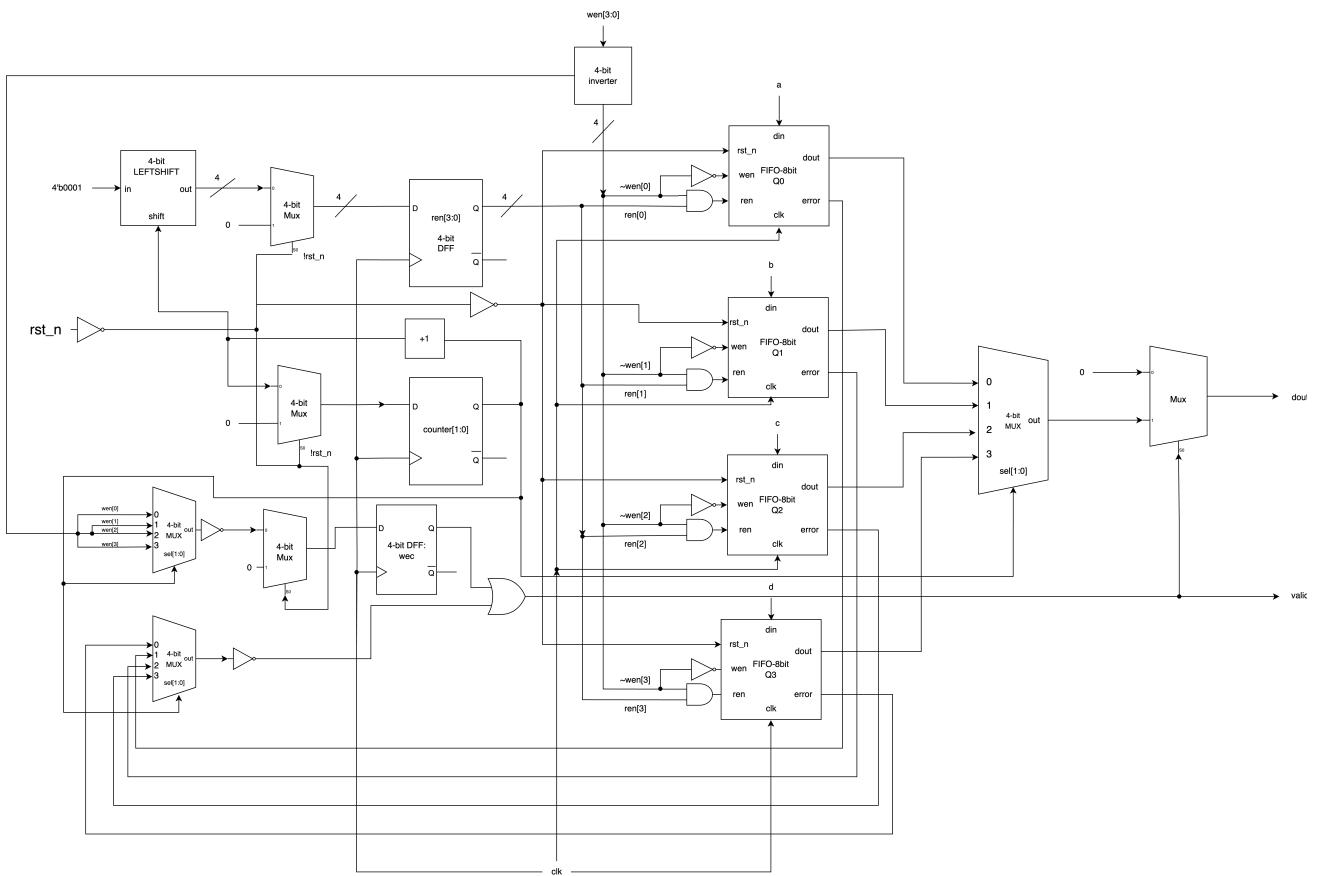


Fig. 12 Q4 Circuit

4.3 Testbench

首先重現了題目範例中的波形圖：

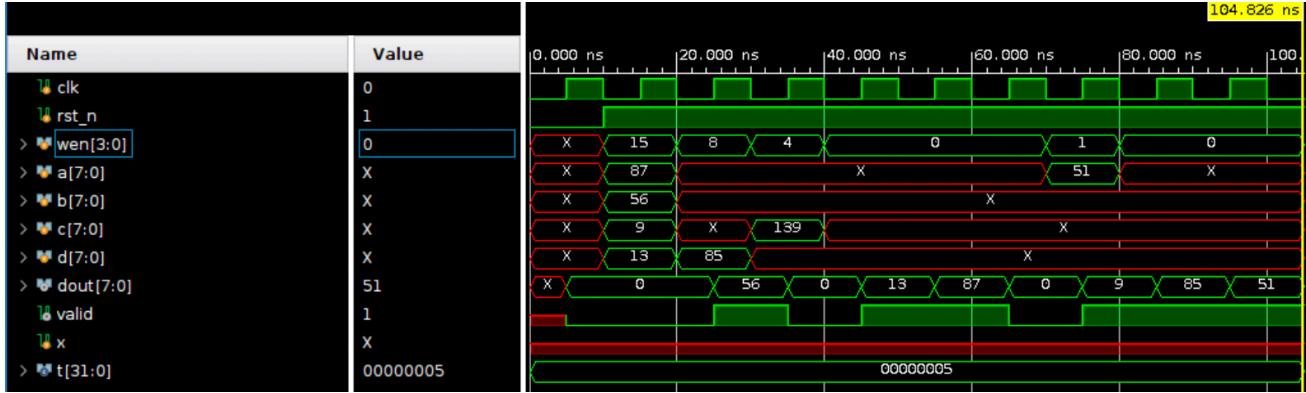


Fig. 13 Q4 Example Testbench

接著再使用 random 來進行額外的模擬，並觀察是否與期望相符。

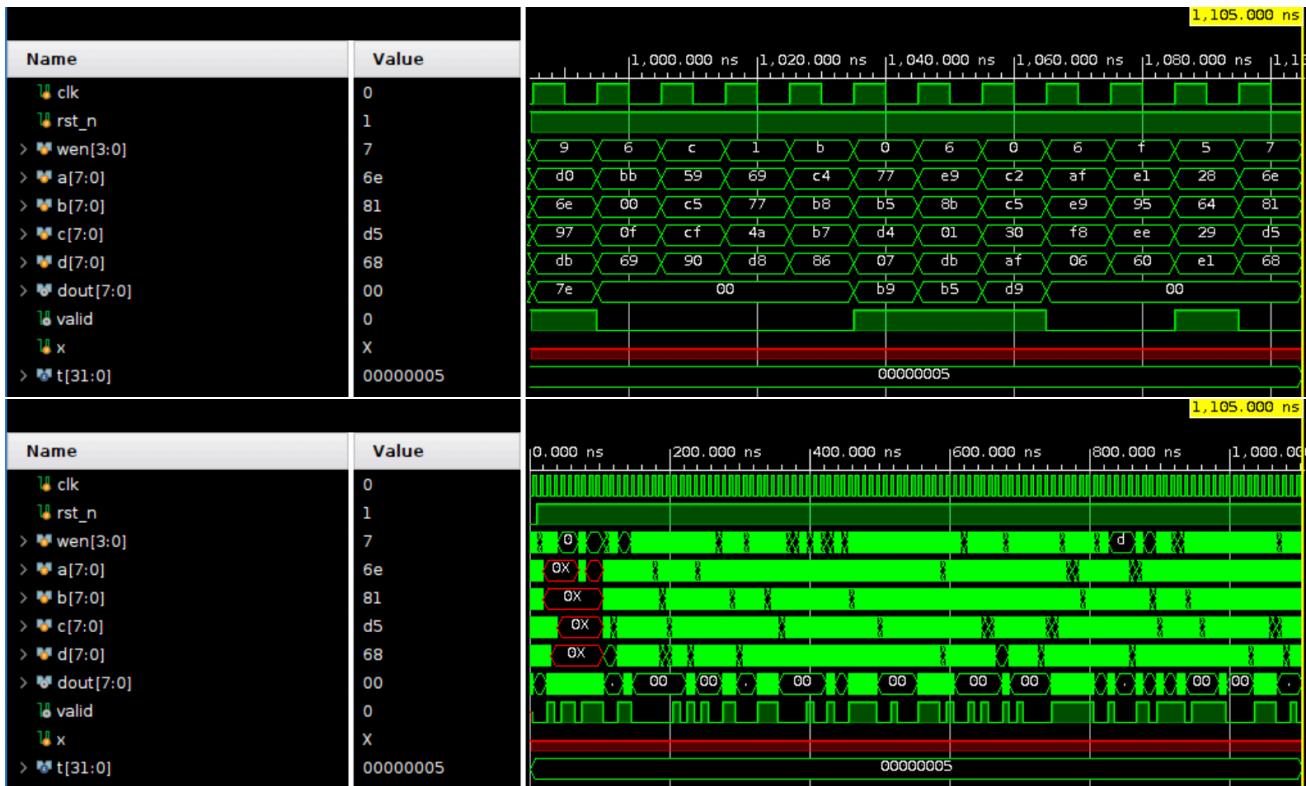


Fig. 14 Q4 Testbench Wave

5 Q5: 4-bit Parameterized Ping-Pong Counter

5.1 Implement

- input clk: clock
- input rst_n : 重置信號
- input flip : 是否翻轉
- input [3:0] max : 最大值
- input [3:0] min : 最小值
- output direction : Counter 變化方向
- output [3:0] out : 輸出的值

這題與 Q1 類似，不過加入了 $min, max, flip$ 的參數，代表 Counter 能夠達到的最大值、最小值，以及是否要翻轉方向。

5.2 Circuit

output 的計算會經過幾個步驟：

- (1) 判斷 out 是否已經達到邊界，若是碰到上界，將 $direction$ 設為 0、 $out - 1$ ，反之則設為 1、 $out + 1$
- (2) 判斷是否已經開始 ($start = 1$)、是否啟用 ($enable = 1$)、是否符合範圍 ($out \in [min, max]$)，若是的話，則：
 - $out = max$ ：將 $direction$ 設為 0、 $out - 1$
 - $out = min$ ：將 $direction$ 設為 1、 $out + 1$
 - 其他情況：根據 $direction$ 進行加減
 否則就讓 $direction$ 保持原樣
- (3) 判斷是否需要翻轉，是的話則反轉 $direction$ ，並依據 $direction$ 進行加減
- (4) 判斷是否啟用，是的話套用以上的結果，否則話則保持原樣
- (5) 判斷是否需要 reset，是的話將 $direction$ 設為 1、 out 設為 0，否則保持以上結果

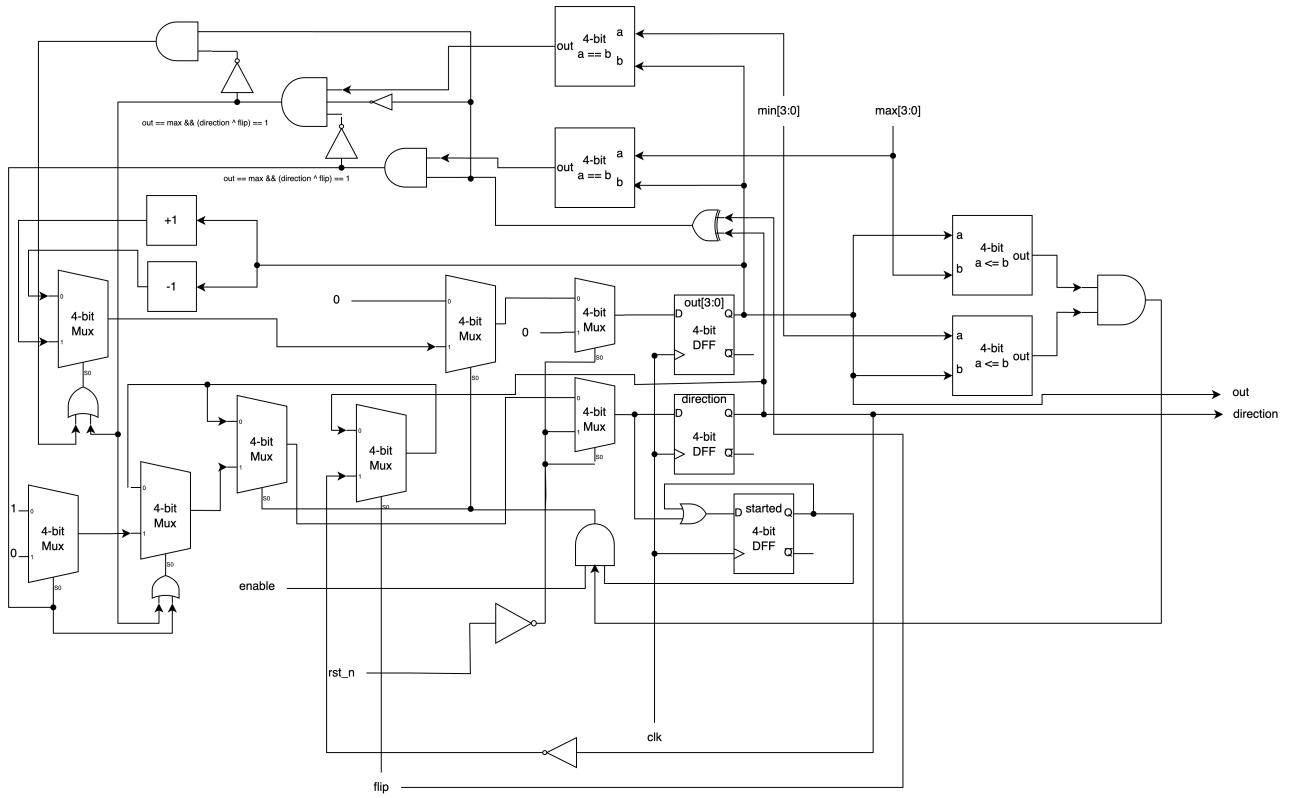


Fig. 15 Q5 Circuit

6 FPGA: 4-bit Paramterized Ping-Pong Counter on FPGA

這題需要將上個問題的 Counter 實作在 FPGA 上，並透過以下接口作為輸入輸出：

- $SW[15]$: enable
- $SW[14 : 11]$: max
- $SW[10 : 7]$: min
- Button Down: flip
- Button UP: reset
- 7-segment-display: out

我們寫了一個 Display Control 模組，用來運算 Counter 的輸入以及七段顯示器的輸出，而 Counter 則是沿用上一題的實作稍作修改，加上了 cnt_en 這個訊號。

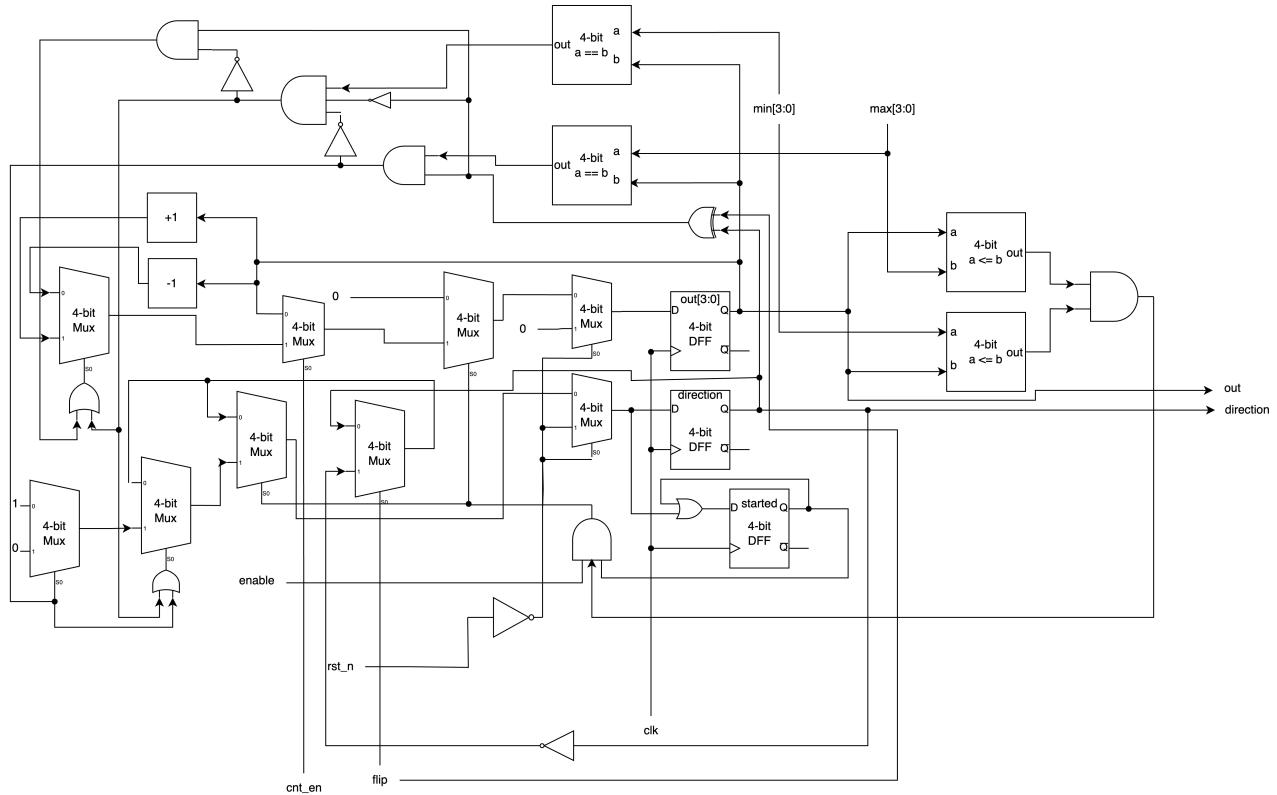


Fig. 16 FPGA Counter

6.1 debounce

Implement

首先要介紹 debounce，這是為了要避免按鈕會出現雜訊，導致沒有辦法成功讀到正確的訊號。

因為在 FPGA 上，clock 的時脈是 100MHz，因此按鈕按下的時候，會經過很多次 clock cycle。我們可以利用這個性質，判斷按鈕的訊號是不是連續好幾個 clock 都很穩定，這次使用的是四個 D-Flip-Flop，互相串接，並且在四個輸出都是 True 的時候才會輸出 True 訊號，這樣的做法可以確保訊號真實穩定經過了 4 個 clock cycle 以上。

Circuit

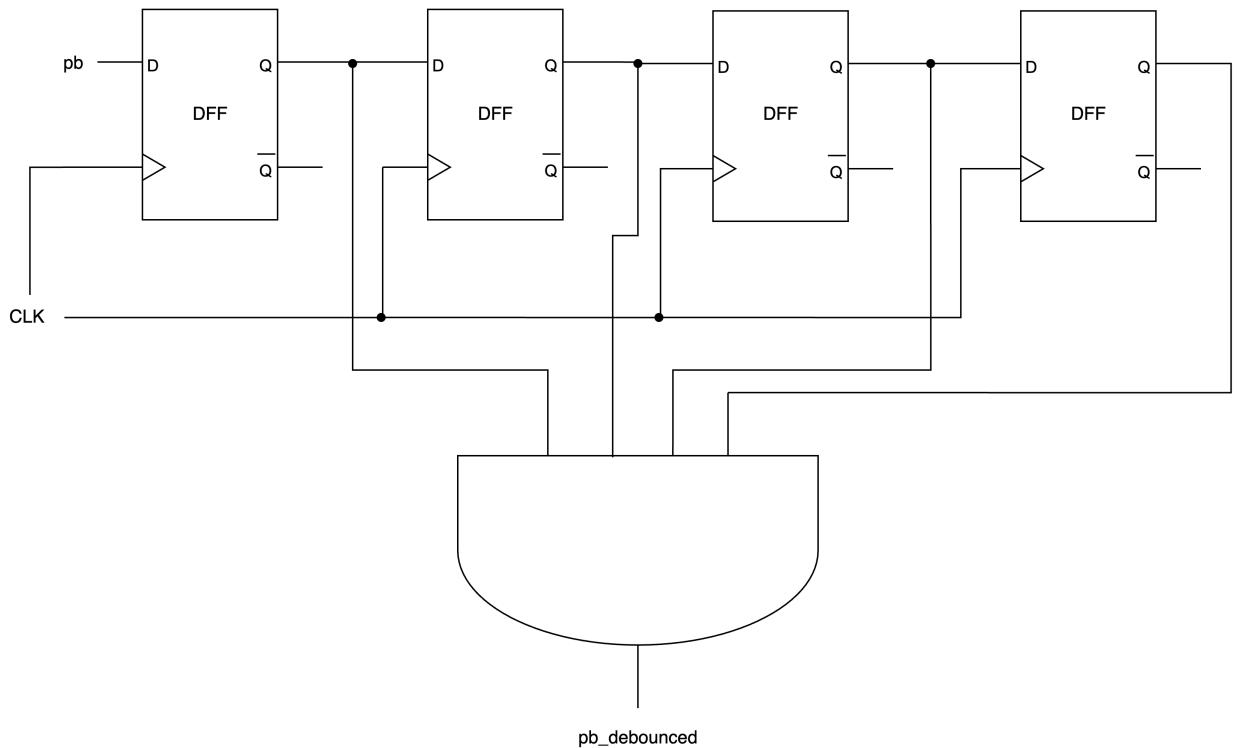


Fig. 17 Debounce

6.2 One Pulse

Implement

接續上一個問題，由於按鈕按下會經過很多個 clock cycle，直接作為輸入的話會導致判定為多次輸入，因此需要一個 One Pulse 模組，讓按鈕在按下的時候只會輸出一次訊號。

首先，利用 D-flip-flop 使得訊號延遲一單位，並將其反相。接著將其與原本的訊號做 AND 運算，就會產生一個只有一個 clock cycle 兩個都是 True 的訊號，最後再將其導向一個 D-Flip-Flop，最後的輸出就會是一個只有一個 clock cycle 是 True 的訊號，如下圖。

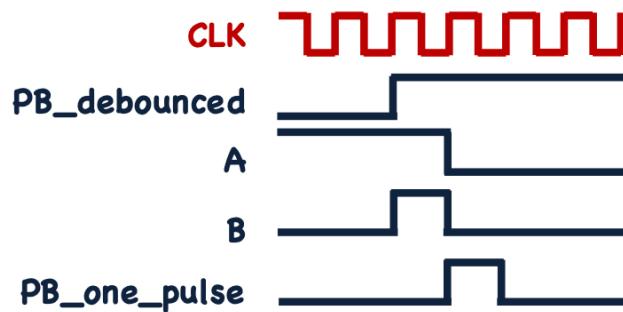


Fig. 18 One Pulse wave

Circuit

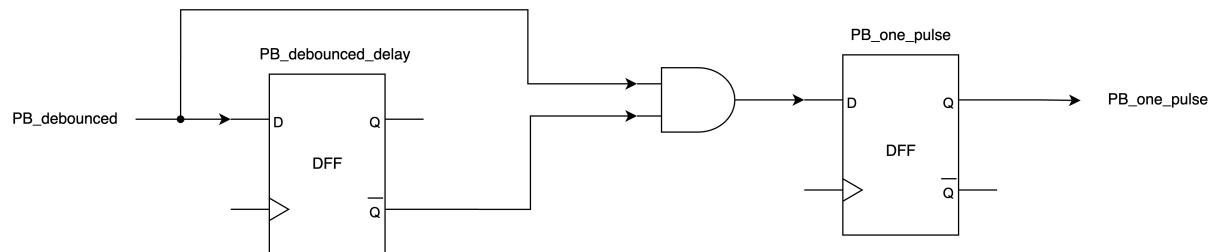


Fig. 19 One Pulse Circuit

6.3 Display Control

由於 FPGA 上的頻率為 100MHZ，對於某些計算來說太快了，因此這邊先定義了一個 32-bit 的整數：*counter*，每 $33554432(2^{24})$ 個 clock cycle 為一個循環用來控制 Counter 加減法的頻率，使得其頻率降到原本的 $\frac{1}{2^{24}}$ 。

除此之外，我們取了這個整數的第 15, 16 個 bit，作為七段顯示器的切換頻率，使其能夠降到原始 clock 頻率的 $\frac{1}{2^{15}}$

接著是 Counter 的部分，我們在原來的基礎上加上了 *cnt_en* 這個參數，當 *counter* 經過一個循環後，*cnt_en* 就會變成 True 一個 clock cycle，並進行加減法的操作。但如果中途有 flip, reset 的操作，就會直接改變輸出值，並且將 *counter* 重設。

Counter 算出數值後，接著要將輸出的數字 *digit* 以及方向 *direction* 輸出到七段顯示器上。首先是 *direction*，我們利用這個表達式算出了 *direction* 與七段顯示器最右邊兩個單位的 *seg* 值：

$$seg[0] = (direction == 1)? \neg(7'b0100011) : \neg(7'b0011100)$$

$$seg[1] = (direction == 1)? \neg(7'b00111000) : \neg(7'b0000011)$$

至於七段顯示器的部分，與上次的 Lab 類似，我們統計了 *digit* = 0 ~ 9 的情況下，每一段所對應的布林表達式：

- A : $out = nor(num[0], num[2], num[3], num[5], num[6], num[7], num[8], num[9])$
- B : $out = nor(num[0], num[1], num[2], num[3], num[4], num[7], num[8], num[9])$
- C : $out = nor(num[0], num[1], num[3], num[4], num[5], num[6], num[7], num[8], num[9])$
- D : $out = nor(num[0], num[2], num[3], num[5], num[6], num[8])$
- E : $out = nor(num[0], num[2], num[6], num[8])$
- F : $out = nor(num[0], num[4], num[5], num[6], num[8], num[9])$
- G : $out = nor(num[2], num[3], num[4], num[5], num[6], num[8], num[9])$

至於這些 *num[]* 可以透過左移的方式產生：

$$num[0] = 1 << (digit >= 10? digit - 10 : digit)$$

$$num[1] = 1 << (digit >= 10)$$

得到每一段的 *out* 之後，就可以開始處理七段顯示器的輸出，由於輸出頻率是 FPGA 的 $\frac{1}{15}$ ，因此在任意時間下，要輸出的單位就是 *counter*[16 : 15]，利用這個性質，用以下的式子就可以成功的運算出七段顯示器的設定。

$$seg_{out} = seg[counter[16 : 15]]$$

$$an[0] = counter[16 : 15]! = 0;$$

$$assignan[1] = counter[16 : 15]! = 1;$$

$$assignan[2] = counter[16 : 15]! = 2;$$

$$assignan[3] = counter[16 : 15]! = 3;$$

7 Other

What we have learned

首先是記憶體的部分，透過這次的實作，能夠了解到如果要實現讀寫 lock 的話要怎麼實作，並將其應用到第三題的 Multi-Bank Memory 上。該題目呈現了硬體中大致上的記憶體架構，以及電腦是如果透過分區來 lock 讀寫的機制。我想這也是為什麼我們在寫平行程式等需要大量讀寫演算法的時候，會需要考慮 IO lock 的問題。

接著是 Sequential Circuit 的部分，由於資料只會在 posedge 的時候改變，會像是 pipeline 的形式，因此在思考如何設計的時候會更加不容易，除了需要考慮到每經過一個 D-Flip-Flop，就會多一個 clock cycle 的延遲，以及資料運算的設計方式，不能用平常在寫程式的變數來思考，必須帶入到一個以「狀態」為單位的思考模式。

最後是 FPGA 的部分，上次 Lab 只有顯示一個單位（數字），所以不會有輪詢率的問題，但這次需要顯示四個單位，因此需要讓他們以足夠高且合適的頻率輪流顯示，才能夠清楚地顯示，這部分最簡單的方式就是直接用一個 counter，並除以一個數字來決定要經過幾個 clock cycle 才能夠換下一個單位。但是硬體在除法以及 mod 的運算上特別麻煩，因此我後來想到以二進位的性質，直接存取某幾個 bit 或是左移，只要除數都是 2 的冪次，就能直接實現除法以及 mod。

分工

- 陳克盈：程式碼、報告
- 蔡明妍：電路圖