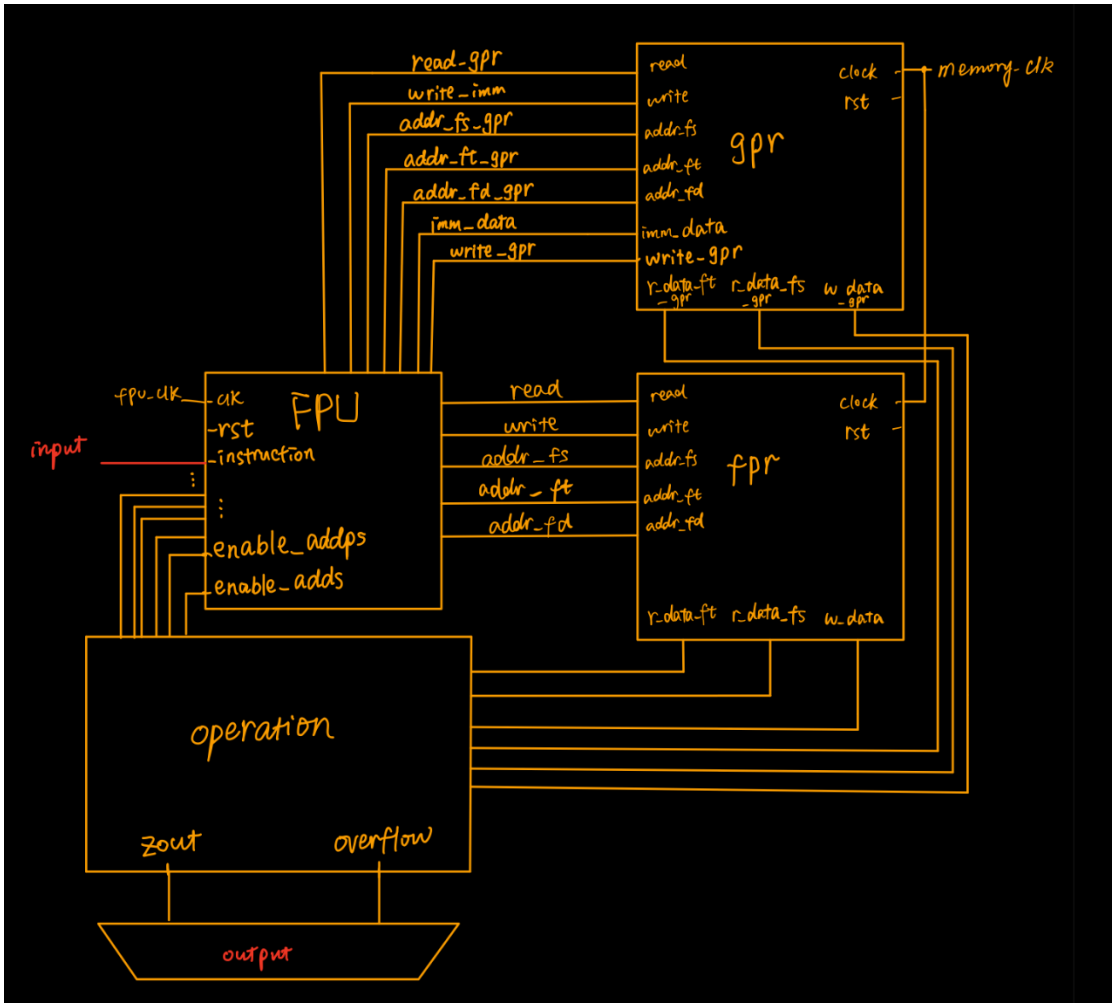
浮点运算单元设计文档

钱煜 3180103948

一、设计框图

1.1 整体框图（部分线因美观效果暂时省去）

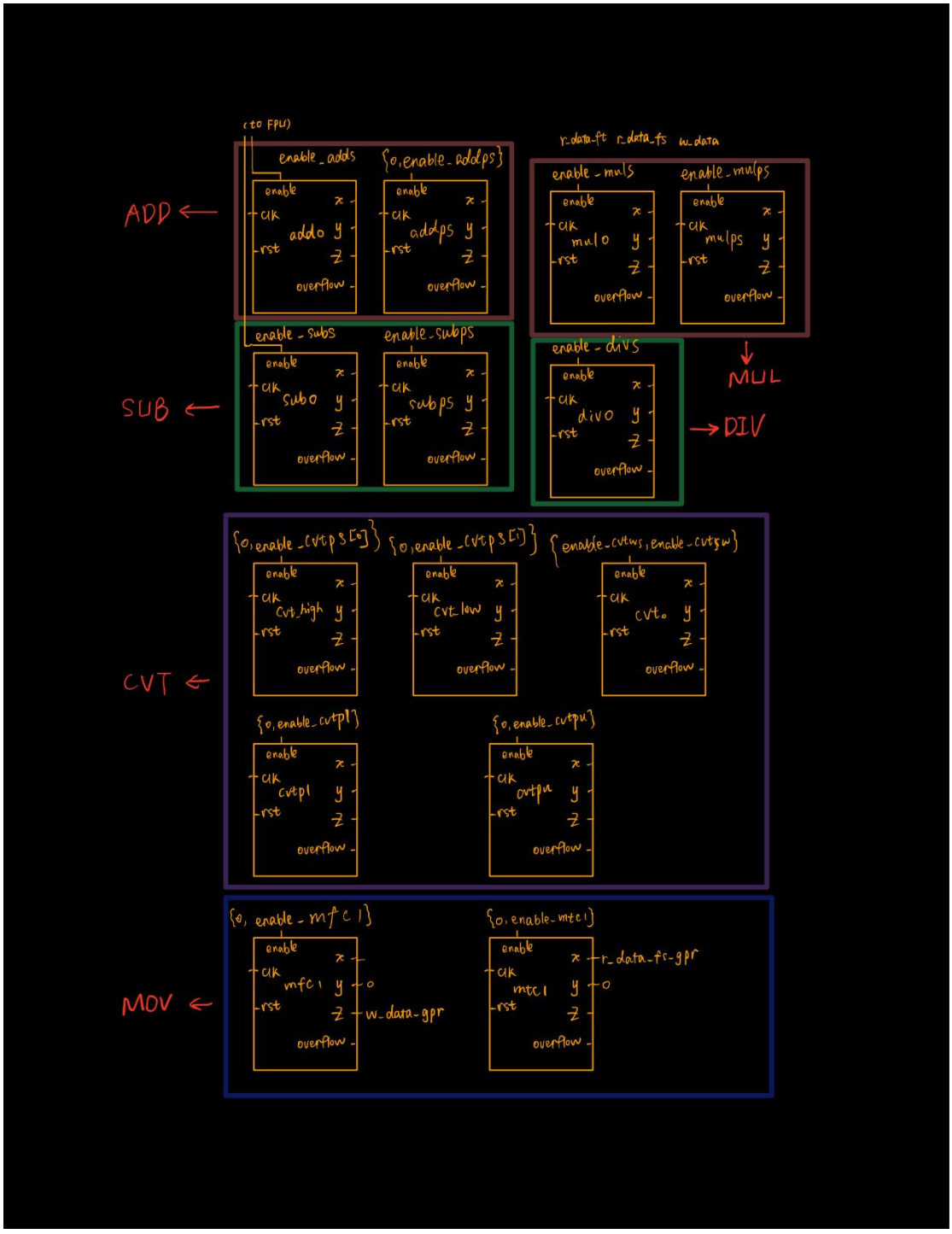


运算顺序为：

FPU 中译码——gpr/fpr 中存取数据（如有需要）——operation 中运算——gpr/fpr 中存取数据，并输出最终结果

（注：operation 部分将在之后给出框图）

1.2 operation 框图



上图为 operation 板块的一部分，未标注的 clk 都连接至 clk，未标注的 rst 都连接至 rst，x，y 分别连接至 r_data_ft, r_data_fs，enable 连接到 FPU 的端口，z 连接到 addr_MUX 的输入端

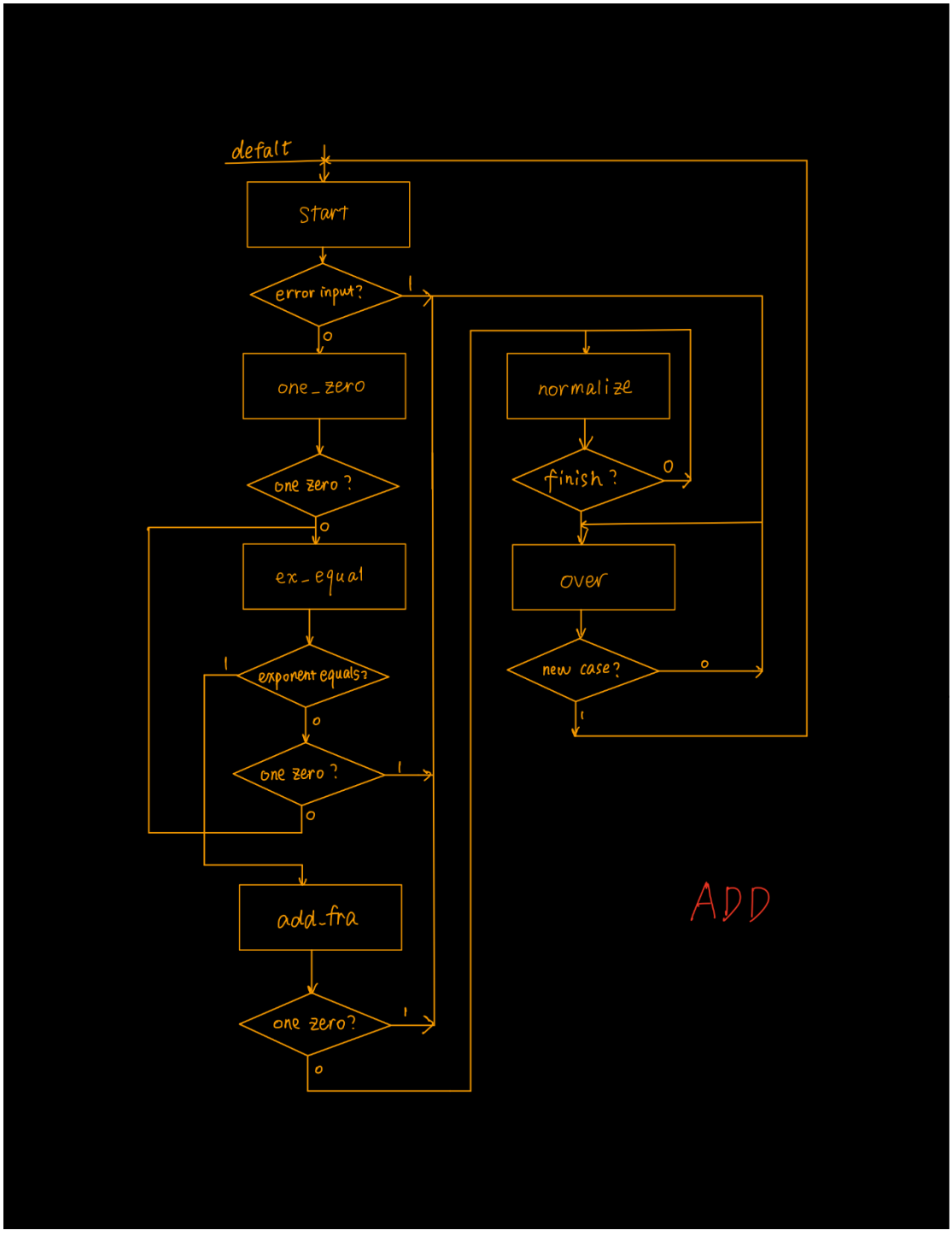
上图为 operation 板块的后半部分，addr 为 FPU 译码后输出的选择地址，zout 和 overflow 为最终的输出

1.3 operation 子模块框图

（注：为了防止跑飞，定义了当除了工作状态外的其他状态出现时，default ： nextstate = START）

1.3.1 ADD

1.3.1.1 ADD 状态图



1.3.1.2 ADD 运行过程说明

（1）START

将输入的两个加数 x，y 拷贝到 cmp_x，cmp_y，用于之后比对是否要进行新的一轮运算；

将 x 和 y 拆分成 xe，ye，xm，ym。其中 xe，ye 为指数（考虑到可能溢出，故先不减去 BIAS），zm，ym 为带 1 的小数部分（即在本身的 0.xxxxx 上变成 1.xxxxx）；

判断输入是否规范，具体为：指数是否为 8'd255，以及指数为零且底数不为零，若是，则令 overflow 为 2'b11（代表数值不符合规范），并直接跳转到 OVER，反之，进入 ONE_ZERO；

（2）ONE_ZERO

判断是否至少有一个加数为 0（即指数和底数都为 0），若是，则可以将另一个加数直接赋值给 z 作为输出，同时跳转到 OVER，反之，进入 EX_EQUAL；

（3）EX_EQUAL

判断 xe 和 ye 是否相等，若相等，说明可以直接底数相加，进入 ADD_FRA；

若不相等，将小的指数+1，对应底数右移一位（使得数值不变），若此时底数为零，由于 0 的任意次幂都为 0，则只需将大的指数对应的数赋值给输出即可，同时跳转到 OVER；

若没有以上情况，则说明两个加数还没有变换成指数相等且底数不为 0 的情况，继续跳转到 EX_EQUAL 自我循环；

（4）ADD_FRA

判断输入使能 enable 是 2‘b01 还是 2’b10 来判断是加法操作还是减法操作；

如果是加法操作，则判断 xm 和 ym 的大小（注意，此时指数已经相等，比较底数实际上就是比较绝对值大小），来进一步判断 z 的符号位，同时将大数减/加小数，得到最终的小数值。若结果为 0，则直接跳到 OVER，即两个数相等。(注意：这里实际上会出现相加时溢出或者相减时数位降低的情况，这也将在下个状态中解决该问题)；

（5）NORMALIZE

判断 zm 是否超过 24 位（上个状态的遗留问题），若是，则进行移位和指数自增，跳转到 OVER（因为只需一次操作)；

判断 zm 是否低于 23 位（上个状态的遗留问题）若是，则进行移位和指数自检，跳转到 NORMALIZE 自我循环（可能多次操作），直到位数正常为止，进入 OVER；

（6）OVER

判断是否上溢（指数为 8‘d255）或者非规格（指数为 0 而底数不为 0），以此决定输出的 overflow 值；

判断 cmp_x，cmp_y 与 x，y 是否一致，若一致，则跳转到 OVER 不断自我循环，反之，跳转到 START 进行新的一轮运算。

1.3.2 SUB

1.3.2.1 SUB 状态图

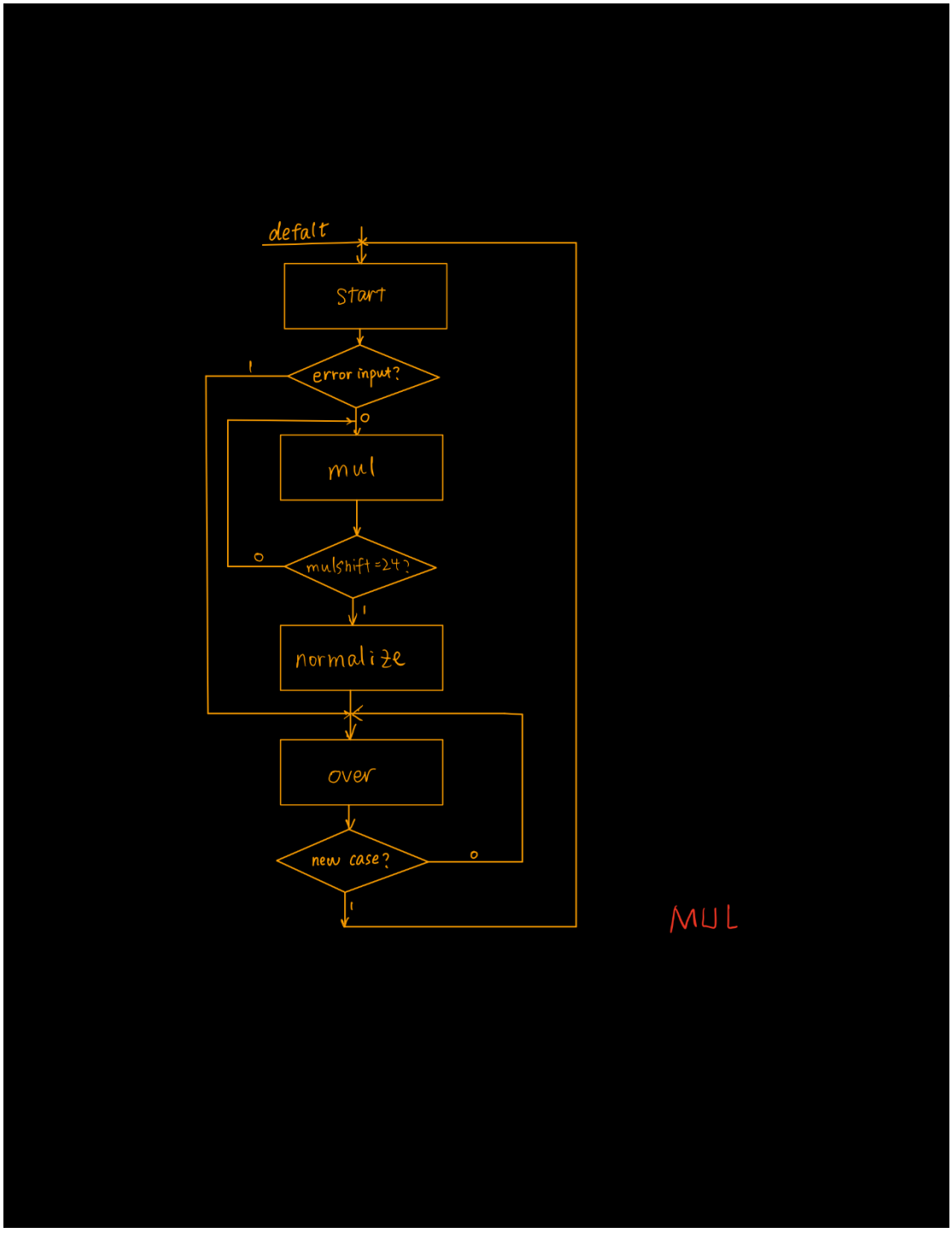
参见 1.3.1.1 ADD 状态图

1.3.2.2 SUB 运行过程说明

参见 1.3.1.2 ADD 运行过程说明

1.3.3MUL

1.3.3.1 MUL 状态图



1.3.3.2 MUL 运行过程说明

（1）START

将输入的两个乘数 x，y 拷贝到 cmp_x，cmp_y，用于之后比对是否要进行新的一轮运算；

将 x 和 y 拆分成 xe，ye，xm，ym。其中 xe，ye 为指数（考虑到可能溢出，故先不减去 BIAS），xm，ym 为带 1 的小数部分（即在本身的 0.xxxxx 上变成 1.xxxxx）；

创建 50 位的 xm1，ym1，为了后续乘法需要的移位准备（考虑了 worstcase 的移位情况，故选择了 50 位）；

判断输入是否规范，具体为：指数是否为 8'd255，以及指数为零且底数不为零，若是，则令 overflow 为 2'b11（代表数值不符合规范），并直接跳转到 OVER，反之，进入 ONE_ZERO；

（2）MUL

根据输入两个乘数的符号位，异或操作得出输出 z 的符号位；

固定 xm1，移动 ym1，每次往高位移动一位，再根据当前 xm1 的数位决定是否加 ym1（本质即为：将乘法看作加权的加法）。移位次数用 mulshift 标记，当移位 25 次后，得到了两个乘数小数部分的乘积 zm，进入 NORMALIZE；

（3）NORMALIZE

通过判断 zm 的最高位，来确定是否需要底数指数对应移位来保证底数为 1 开头的小数，为了保证不产生溢出，用 shift_1 和 shift_2 暂时表示指数部分需要 + 和 - 的位数，并进入 OVER；

（4）OVER

用 e_temp 来存储指数部分，考虑到溢出情况，设定其数位为 10 位;

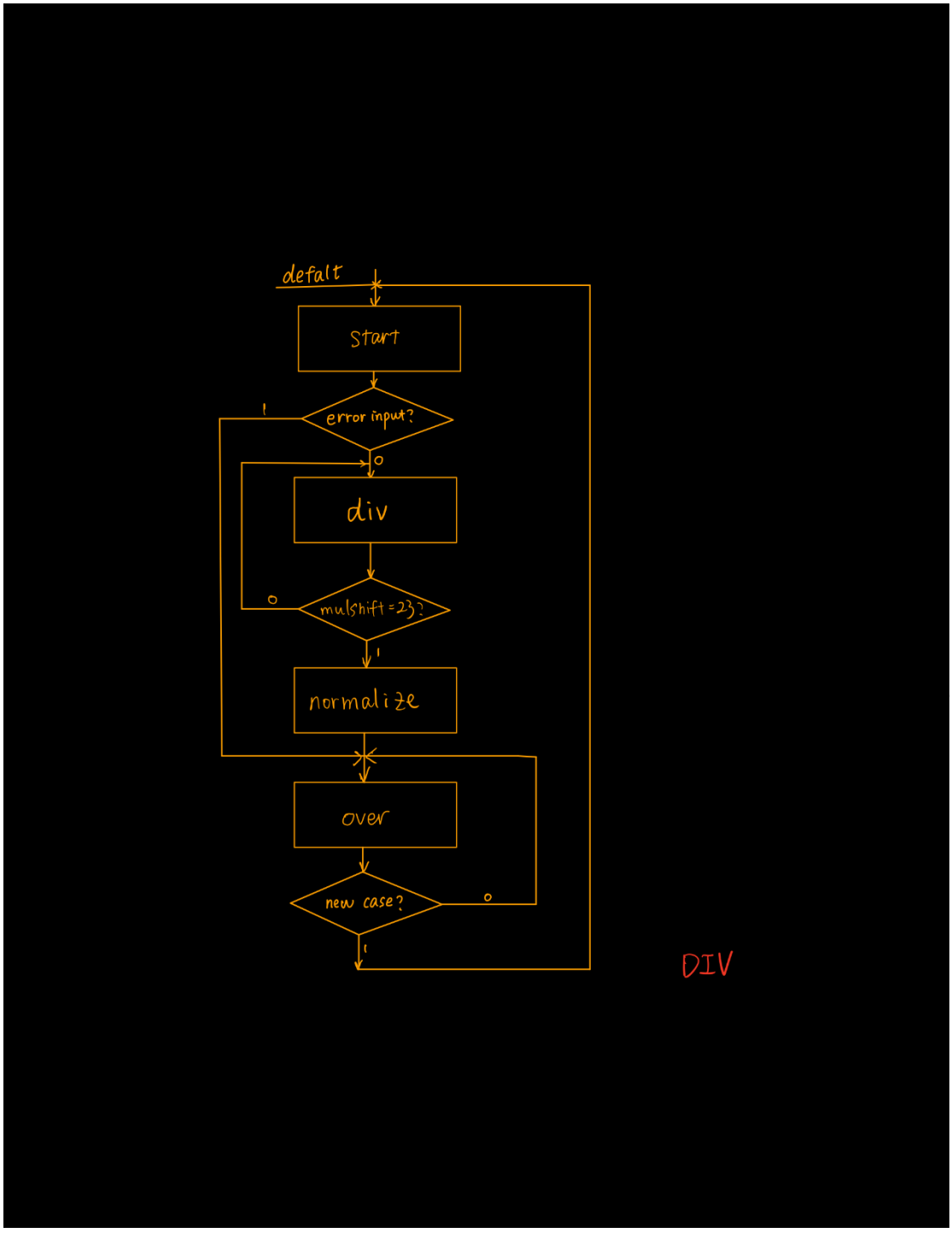
根据其与 8‘d255 和 shift_2 的关系，检测边界情况，注意，此时底数已经完全符合规范，故指数溢出，即为整个数的溢出。

若没有溢出，则正常规格化：根据其指数是否为 8‘d255 或者指数为零而底数不为零，分别置数 overflow，若一切正常，则置数 overflow 为 0;

判断是否 enable 为 1 且至少一个被乘数出现变化，若是，则跳转到 START 进行新的一轮运算，反之，继续在 OVER 自动循环。

1.3.4. DIV

1.3.4.1 DIV 框图



1.3.4.2 DIV 运行过程说明

（1）START

将输入的两个运算数 x，y 拷贝到 cmp_x，cmp_y，用于之后比对是否要进行新的一轮运算；

将 x 和 y 拆分成 xe，ye，xm，ym。其中 xe，ye 为指数（考虑到可能溢出，故先不减去 BIAS），xm，ym 为带 1 的小数部分（即在本身的 0.xxxxx 上变成 1.xxxxx）；

创建 50 位的 xm1，ym1，为了后续除法需要的移位准备（考虑了 worstcase 的移位情况，故选择了 50 位）；

判断输入是否规范，具体为：指数是否为 8'd255，以及指数为零且底数不为零，若是，则令 overflow 为 2'b11（代表数值不符合规范），并直接跳转到 OVER，反之，进入 ONE_ZERO；

（2）DIV

固定 ym1，不断移位 xm1，判断每一次 ym1 对应数位的值，来决定是否要相减（本质上是将 xm1 乘 2 的 23 次幂后求商，因为这样得到的商为 23 位），并用 mulshift 进行计数；

若未到次数，则进入 DIV 自我循环，直到 mulshift 为 23 时，循环结束，进入 NORMALIZE；

（3）NORMALIZE

根据 zm 的最高有效数位，判断指数需要移动的位数，为防止直接运算溢出，存放在 shift_1 和 shift_2 中，进入 OVER；

（4）OVER

判断 e_temp 与 8‘d255 和 shift_2 的大小关系（因为自身数位足够，不必考虑 e_temp 的上溢），若出现溢出，则分别置数 ze 为 8‘d255 或者 8’d0，否则，对输出置数；

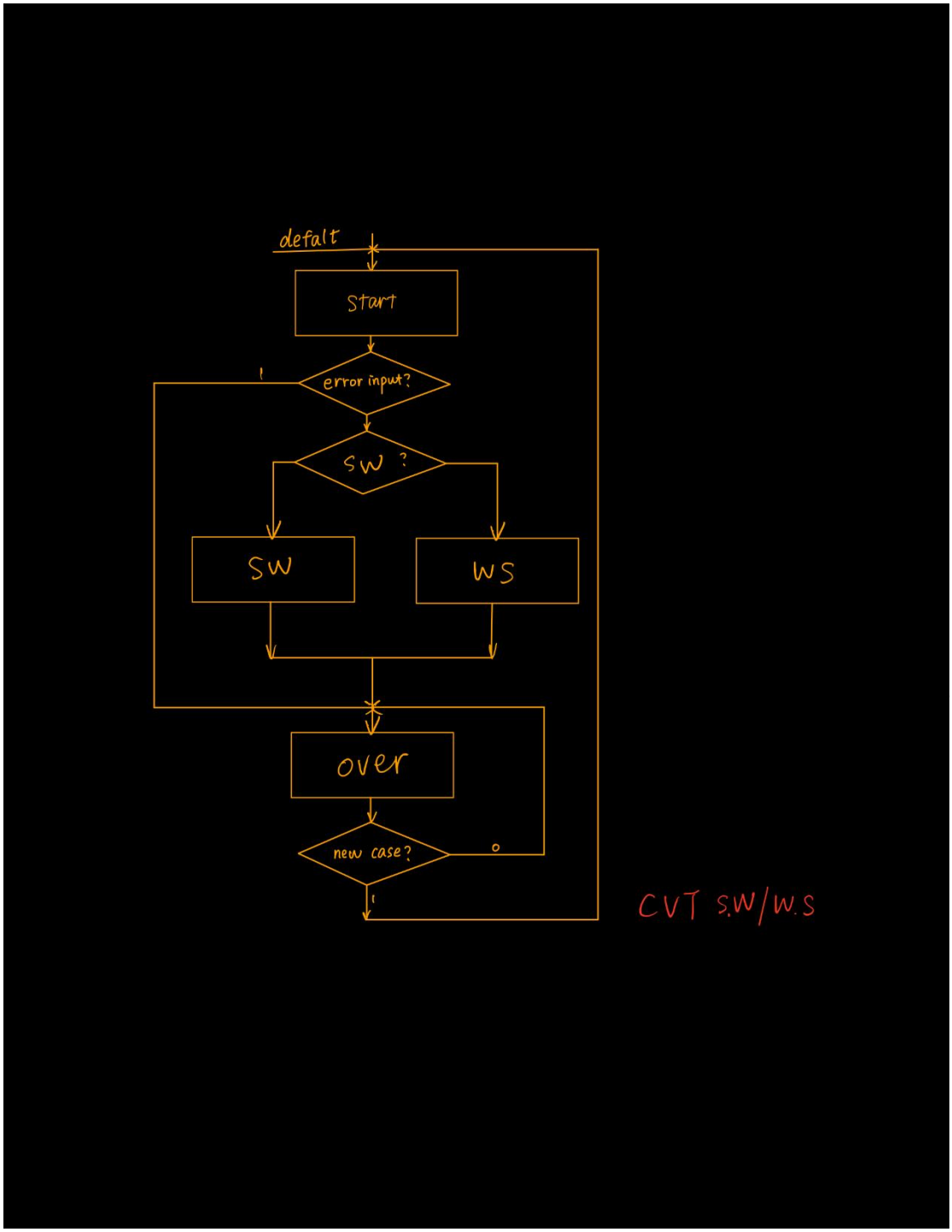
检查输出是否上溢或者趋近于零的非规约，并置数相应 overflow；

判断 enable 是否为 1 且至少有一个输入改变，若是，则跳转到 START 开始新的除法运算，反之，跳转到 OVER。

1.3.5 CVT

由于其他的 CVT 操作可以借助之前的基础架构完成（后文会详细讲述），这里只阐述相对复杂的 SW/WS 部分

1.3.5.1 CVT (SW/WS) 框图



1.3.5.2 CVT (SW/WS) 运行流程说明 （注：切换了判断 error 的时间，防止将 word 误认为是 float 而导致问题）

（1）START

将输入的两个运算数 x，y 拷贝到 cmp_x，cmp_y，用于之后比对是否要进行新的一轮运算；

通过判断 enable 的数值，跳转到 SW 或者 WS；

（2）SW

根据待转化数 x 的最高有效位，取 x 的部分位数作为单精度数的小数位，或者取 x 余下的所有位数并添加末尾的 0 构成单精度数的小数位，同时根据所需移位的数目（包括左移或者右移）决定指数的大小，最后置数符号位；

（3）WS

将 y 拆分成 ye，ym。其中 ye 为指数（考虑到可能溢出，故先不减去 BIAS），ym 为带 1 的小数部分（即在本身的 0.xxxxx 上变成 1.xxxxx）；

判断输入是否规范，具体为：指数是否为 8'd255，以及指数为零且底数不为零，若是，则令 overflow 为 2'b11（代表数值不符合规范），并直接跳转到 OVER；

判断指数是否上/下溢，若是，置数 overflow 和 z，并跳转到 OVER；

若没有溢出，将指数部分减去偏置后用于小数部分的移位，若超出则用 0 补全，不足则舍去多余小数部分；

跳转到 OVER;

（4）OVER

判断 enable 使能信号，若结果为单精度浮点数，检测其是否上溢或非规格趋于零并作出相应 overflow 的置数，反之不作操作（作没有意义的操作以匹配 else）;

判断 enable 是否为真且至少有一个输入改变，若是，则跳转到 START 开始新的转换运算，反之，跳转到 OVER。

二、行为描述

本部分主要讲述了 14 条指令的行为描述，相对着重于行为级的执行次序，而非最底层运算。指令运算过程中，绝大部分使用单精度加法器作为核心运算部件，若出现转移数值，则令对应加法器的某个输入为 0 即可。

2.1 ADD.S

（1）DECODE

创建 cmp_instrction，为之后判断是否要执行新的指令做准备；

将 addr_MUX 置为 4‘b0001，使得该加法器的输出端口与 fpr 的端口连接开通（可以写入）；

跳转到 ADD_READ；

（2）ADD_READ

将 read 信号置为 1，输入指令中 ft 和 fs 寄存器的地址，fpu 访问地址，将对应寄存器中的数保存至 x 和 y（加法器的两个加数输入端口）；

跳转到 ADD_CAL；

（3）ADD_CAL

将 enable_adds 置为 2‘b01，使得对应加法器开始运算；

跳转到 ADD_WRITE；

（4）ADD_WRITE

将 read 置为 0，停止读书，将 write 置为 2‘b01，并输出 fd 的地

址，将运算得到的 z 写入到 fpu 对应地址的目的寄存器中；

（5）OVER

将所有使能信号和输出信号置零，比较 cmp_instruction 与当前指令是否一致，若不一致，则跳转到 DECODE 进行新的运算，反之，在 OVER 中循环；（之后不再重复）

2.2 ADD.PS

（1）DECODE

基本操作与 2.1 一致，将 addr_MUX 置为 4‘b0010；

跳转到 ADDPS_READ1；

（2）ADDPS_READ1

同 ADD_READ 类似；

跳转到 ADDPS_CAL

（3）ADDPS_CAL

同 ADD_CAL 类似；

跳转到 ADDPS_READ2；

（4）ADDPS_READ2

将 ft 和 fs 的地址+1 后进行读取；

跳转到 ADDPS_CAL2；

（5）ADDPS_CAL2

同 ADD_CAL 类似；

跳转到 ADDPS_WRITE2；

（6）ADDPS_WRITE2

写入操作，注意将 fd 目的寄存器地址+1；

跳转到 OVER

（7）OVER

略

2.3 SUB.S

2.4 SUB.PS

以上两条指令与 2.1，2.2 类似，注意写入使能信号的第二位需要为 1，以表示减法运算；

2.5 MUL.S

2.6 MUL.PS

2.7 DIV.S

与 2.1，2.2 类似，基本思想为

译码（改变输出和 overflow 数据选择器的地址）——读数——运算——写数——读数（注意地址改变）（如有必要）——运算（如有必要）——写数（注意地址改变）（如有必要）——OVER

2.8 CVT.PS.S

与 2.2 类似，基本思想为

译码（改变输出和 overflow 数据选择器的地址）——读数——类型

转换——写数——读数（注意地址改变）——类型转换——写数（注意地址改变）——OVER

2.9 CVT.S.W

2.10 CVT.W.S

2.11 CVT.S.PL

2.12 CVT.S.PU

与 2.1 类似，基本思想为

译码（改变输出和 overflow 数据选择器的地址）——读数（如有必要，注意地址变换）——类型转换——写数（如有必要，注意地址变换）——OVER

2.13 LUI

2.14 ORI

2.15 MFC1

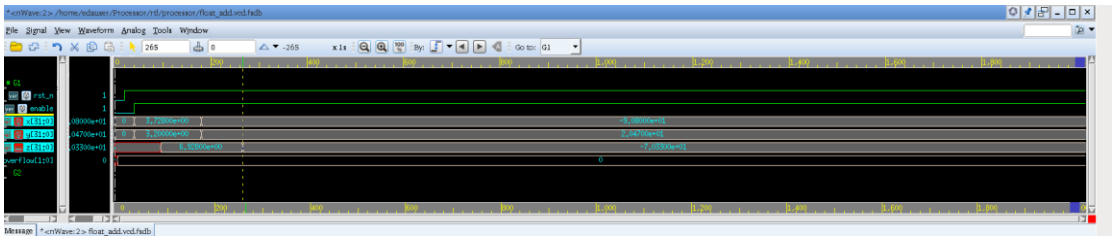
2.16 MTC1

以上操作均涉及对 gpr 的存取，基本思想与 2.1 类似，不再赘述。注意使能信号不一定是 read&write，可能是 read_gpr，write_gpr，write_imm 等

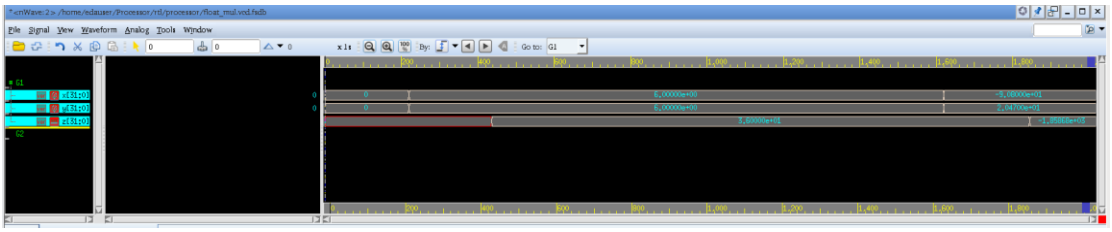
三、测试样例（部分）

3.1 单个模型（单精度）

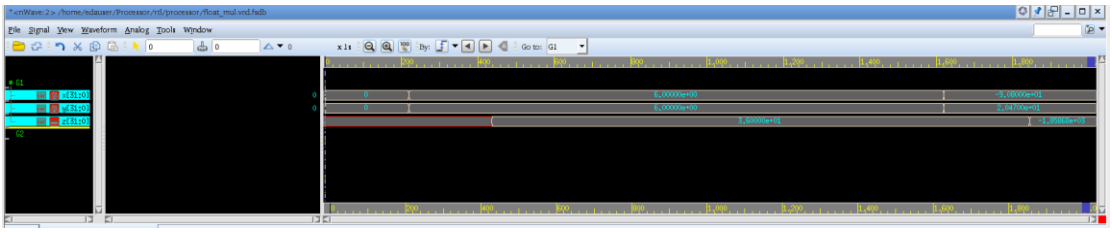
3.1.1 加法器



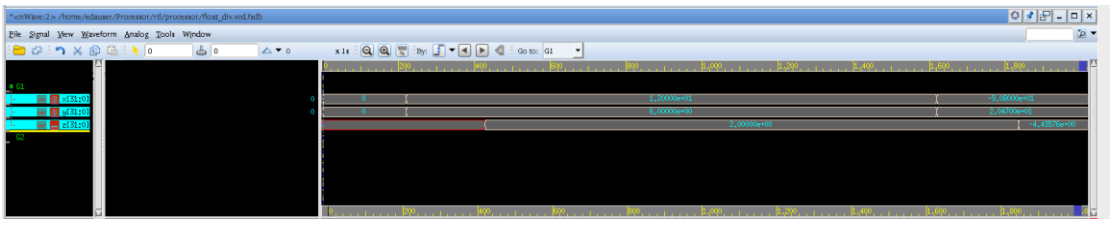
3.1.2 减法器



3.1.3 乘法器

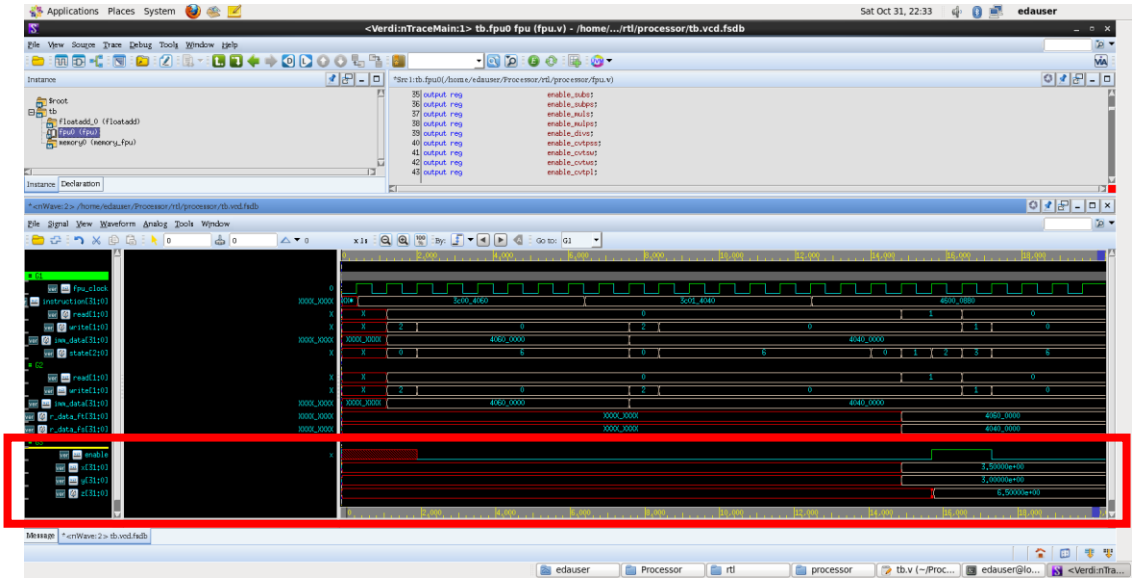


3.1.4 除法器

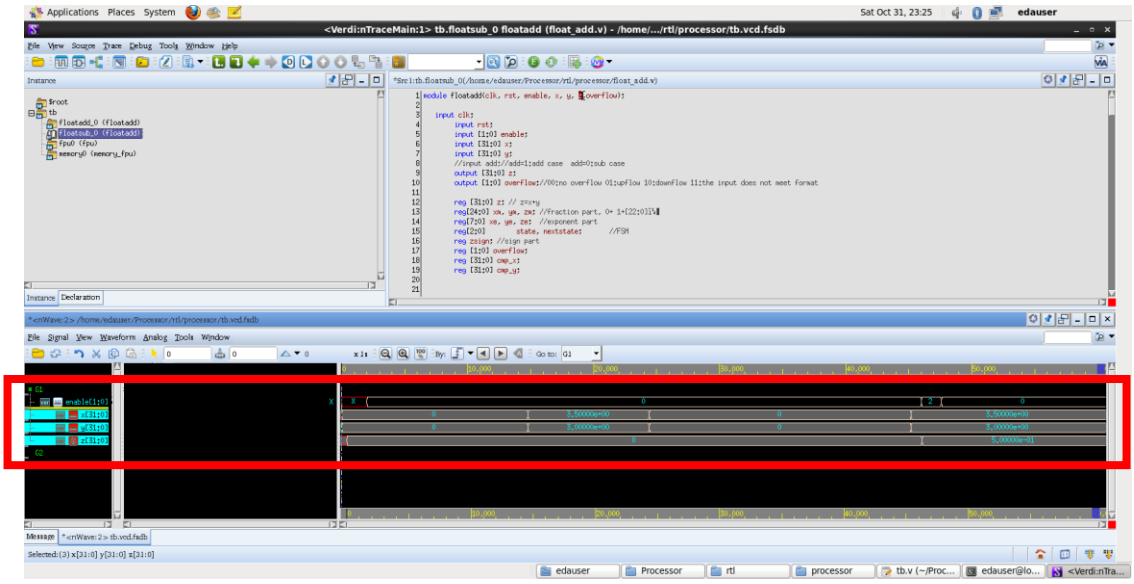


3.2 指令

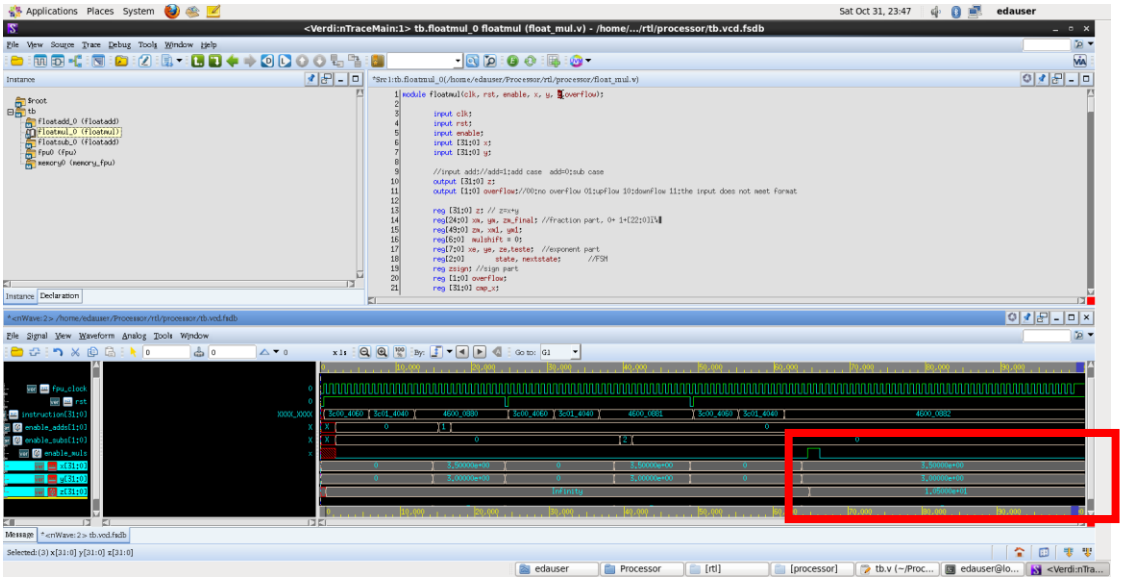
3.2.1 ADD.S （3.5+3=6.5）



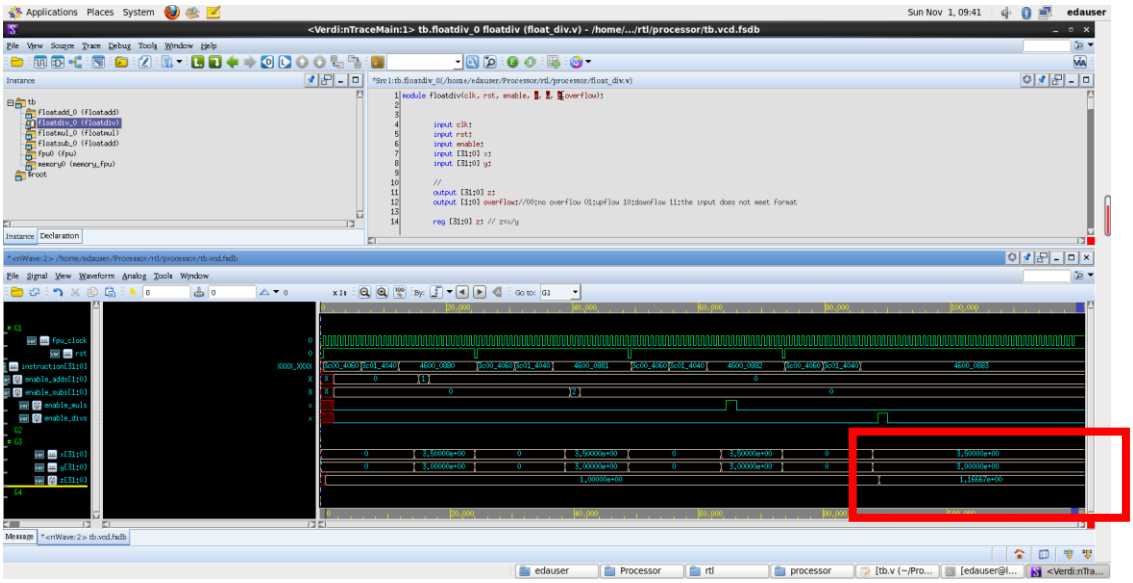
3.2.2 SUB.S （3.5-3=0.5）



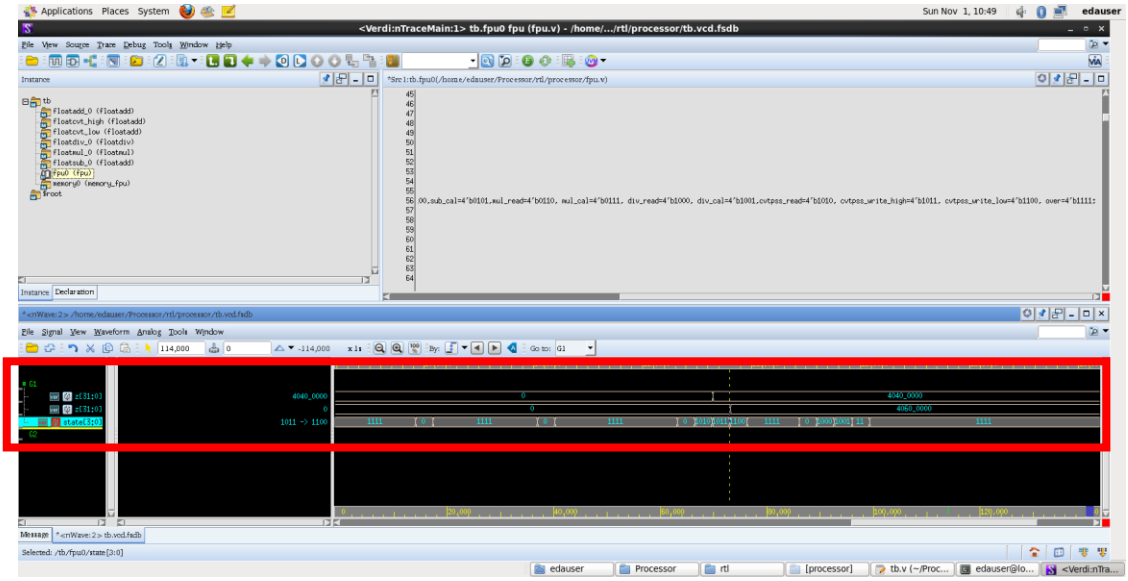
3.2.3 MUL.S （3.5*3=10.5）



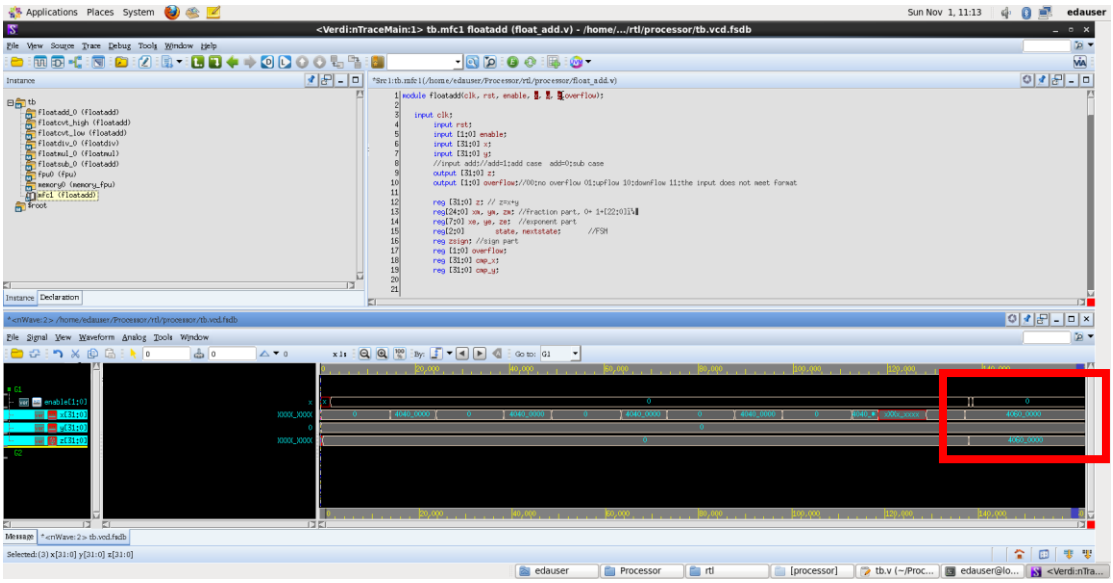
3.2.4 DIV.S （3.5/3=1.6667）



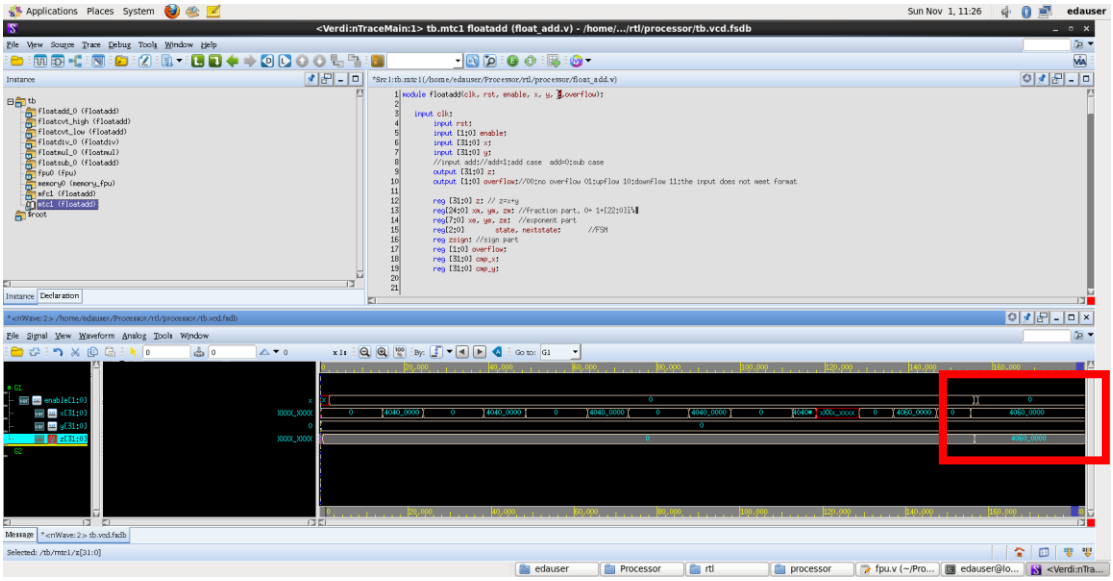
3.2.5 CVT.PSS（两个 z 代表两个转换后的数 3、3.5）



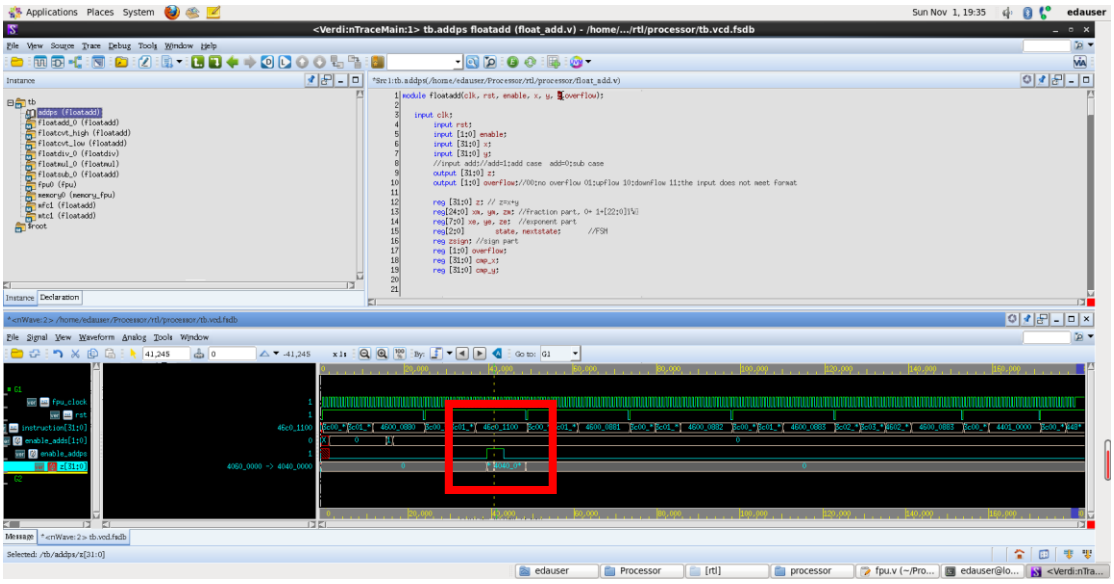
3.2.6 MFC1



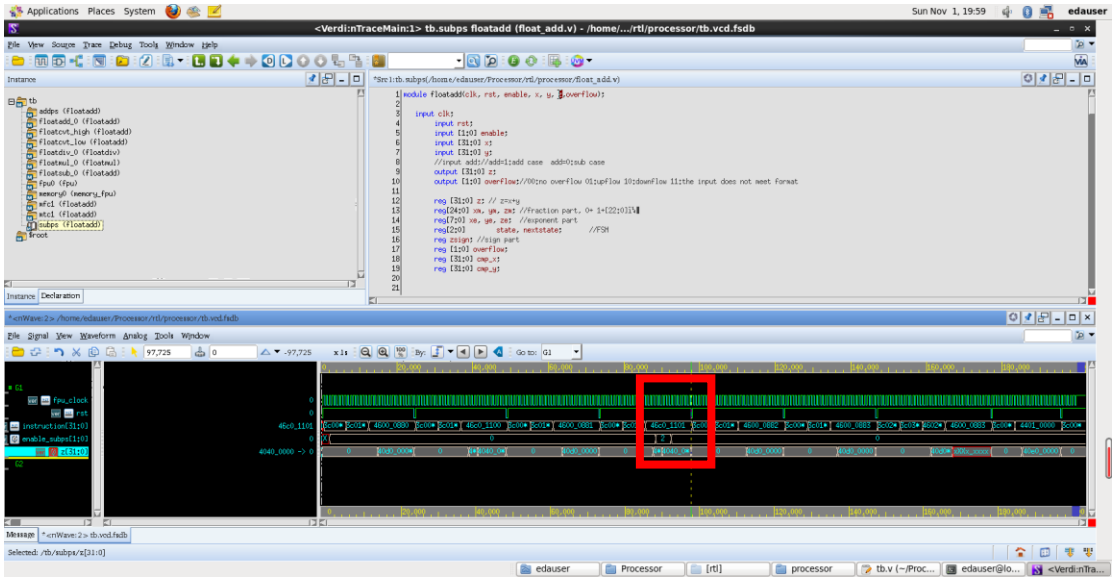
3.2.7 MTC1



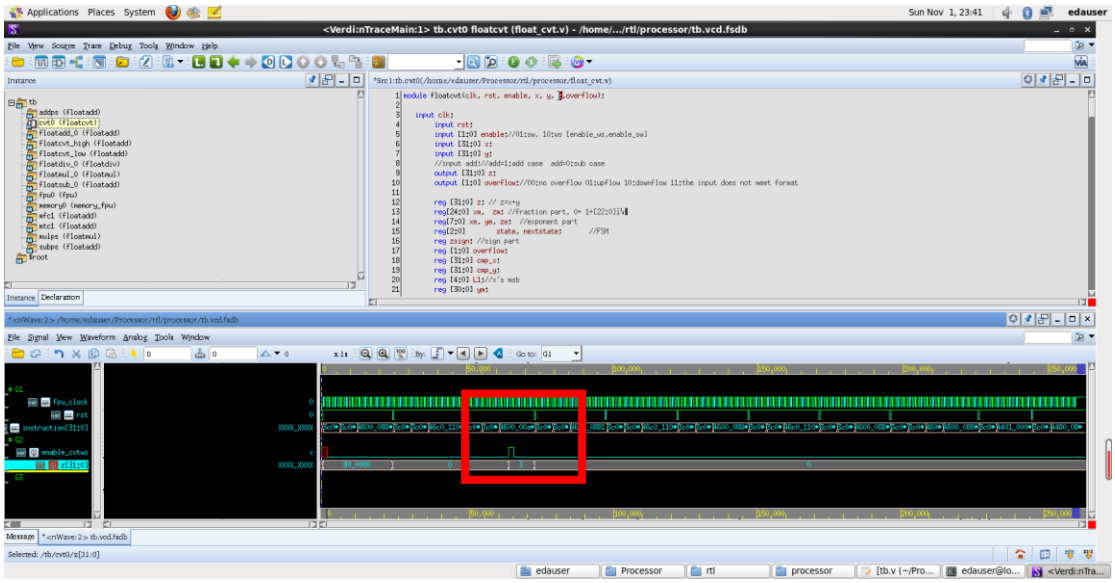
3.2.8 ADD.PS (Z 的时间点显示从第一对的加法输出到第二对的加法输出)



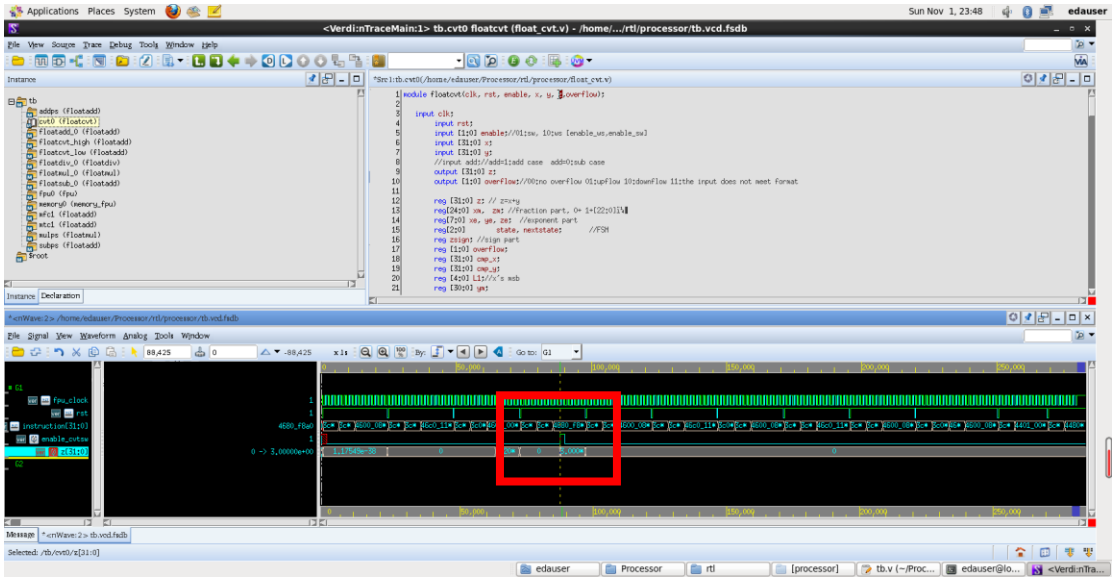
3.2.9 SUB.PS（同样是 z 的变化）



3.2.10 CVT.W.S（3 的转换，下同）

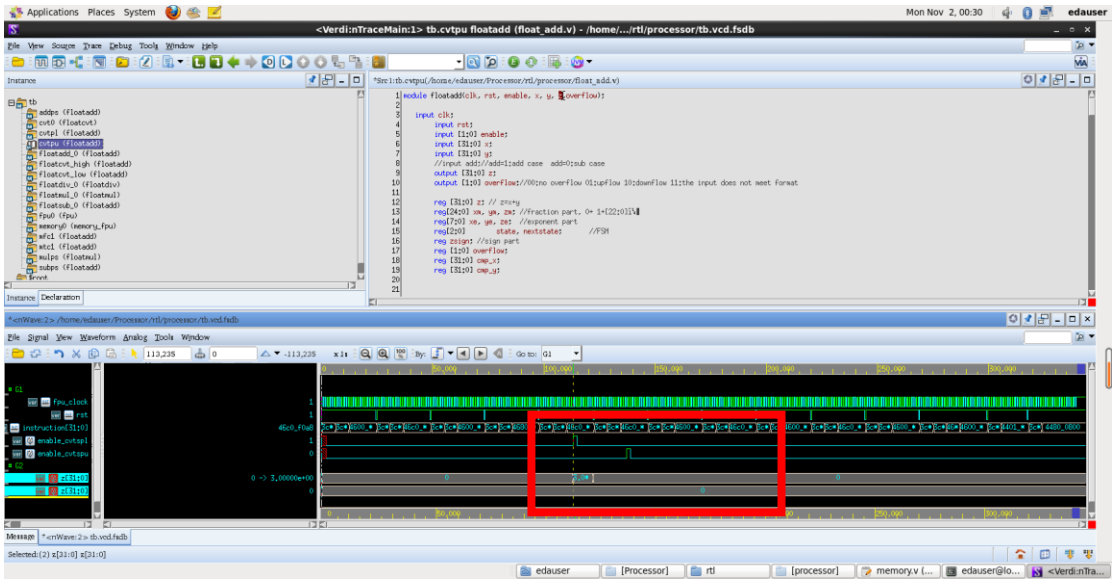


3.2.11 CVT.S.W（3 的转换，同上）



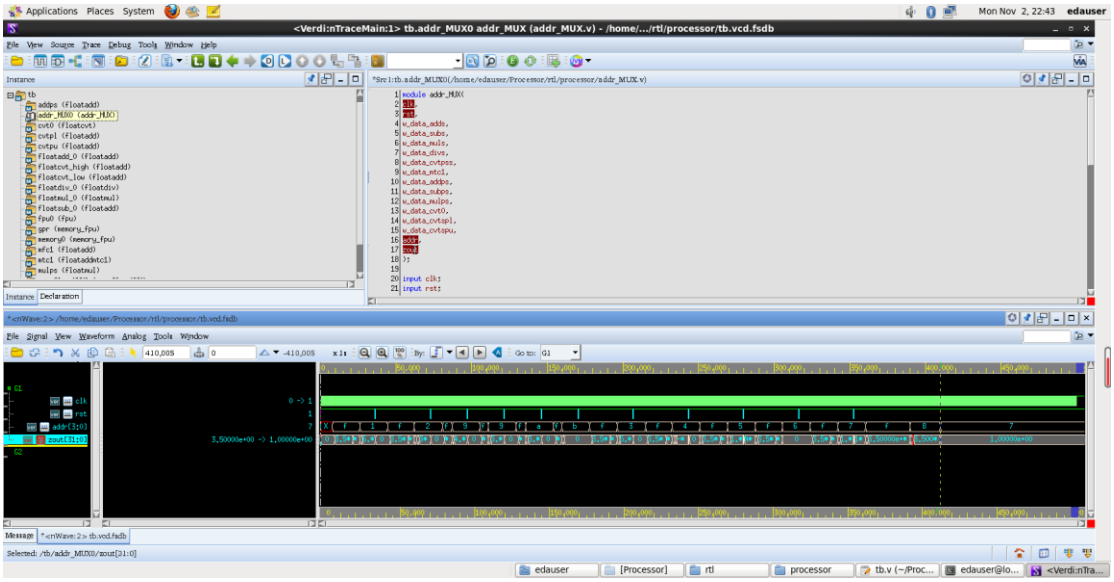
3.2.12 CVT.S.PL

3.2.13 CVT.S.PU



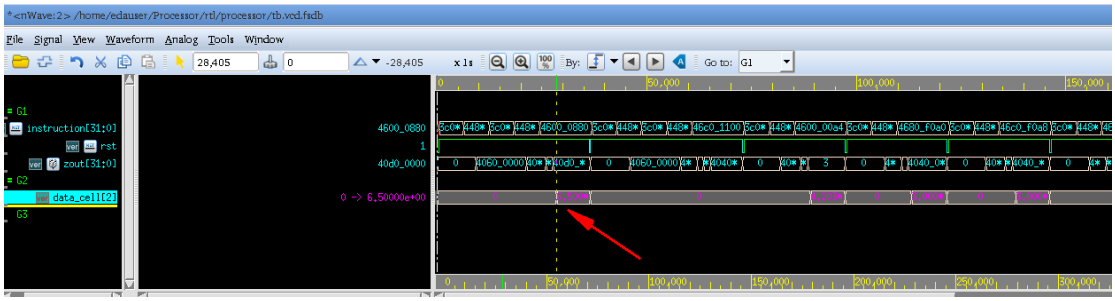
3.3 综合样例

在 tb.v 中，按顺序输入了 12 个周期的指令，遍历了所有操作（前 12 个周期除了如下所示外，使用了 lui 和 mtc1，最后一个周期多使用了 ori 和 mfc1，且经过寄存器波形查看，均正确）

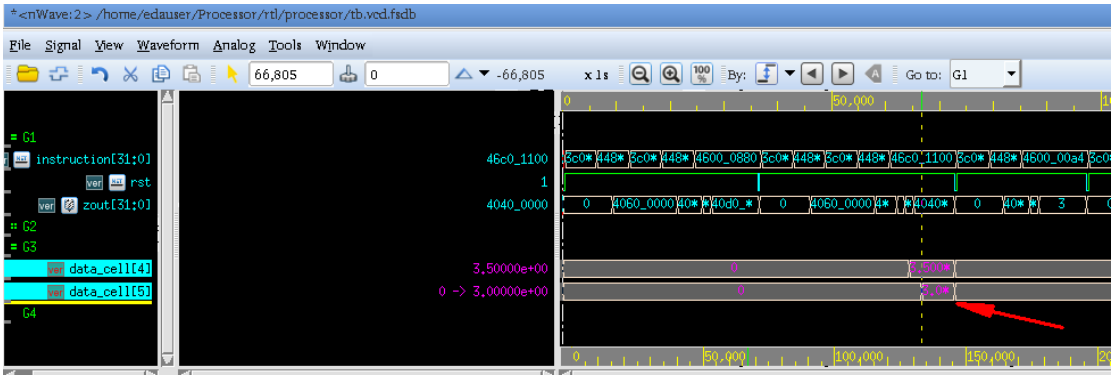


以下分别详细说明

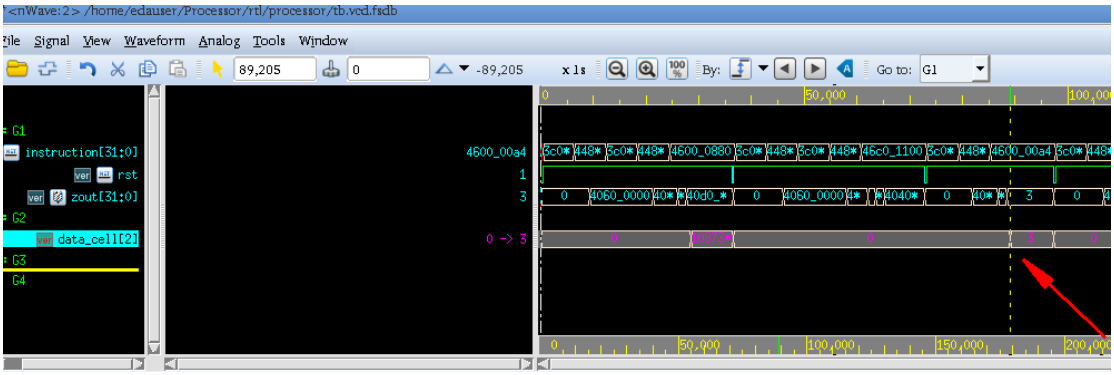
3.3.1 ADD.S



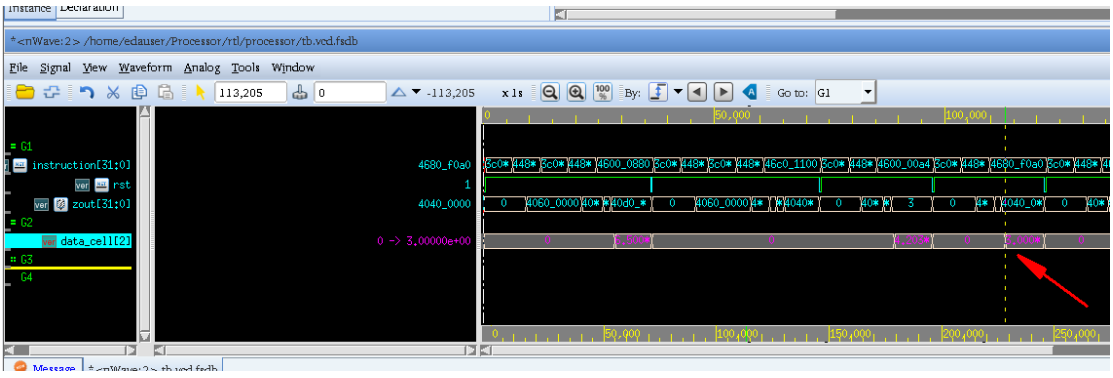
3.3.2 ADD.PS



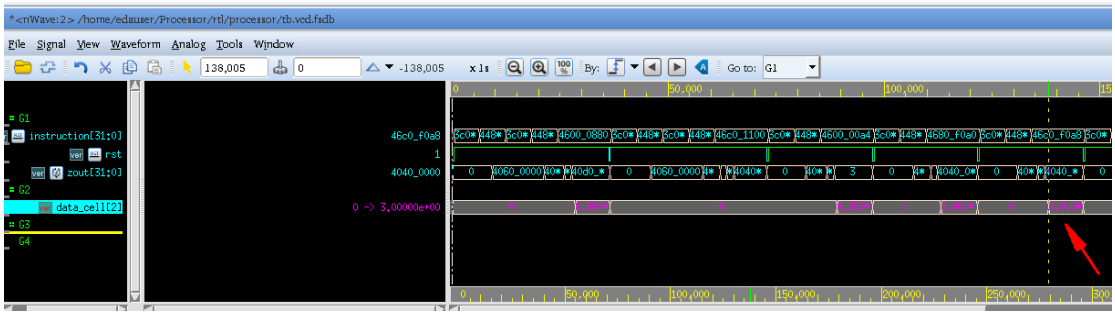
3.3.3 CVT.W.S



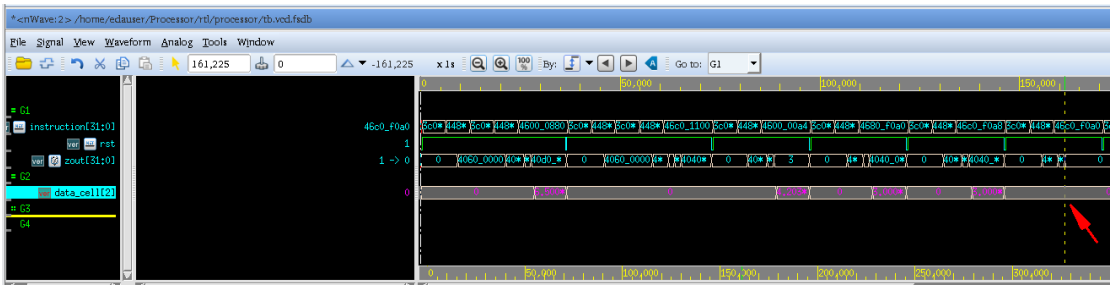
3.3.4 CVT.S.W



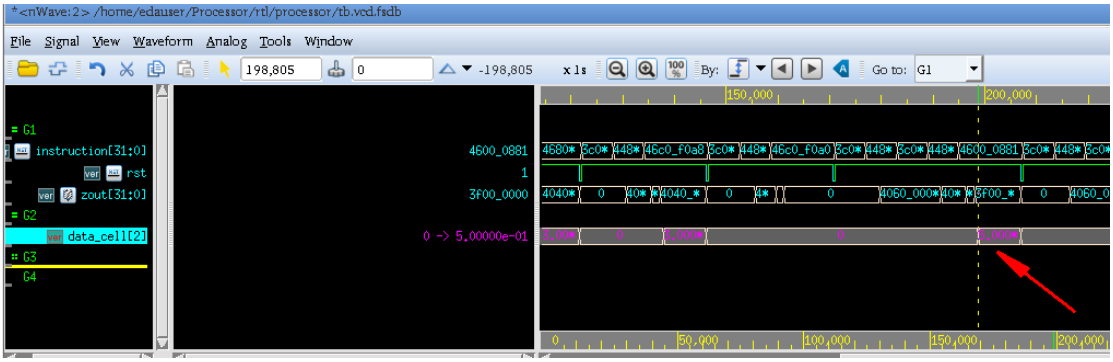
3.3.5 CVT.S.PL



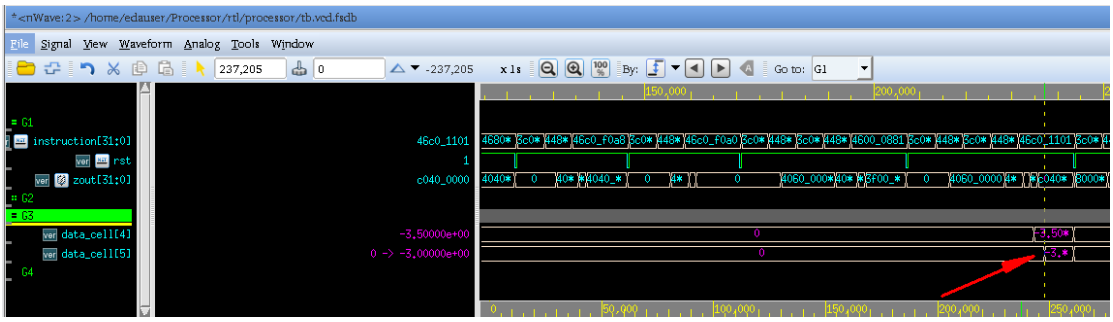
3.3.6 CVT.S.PU



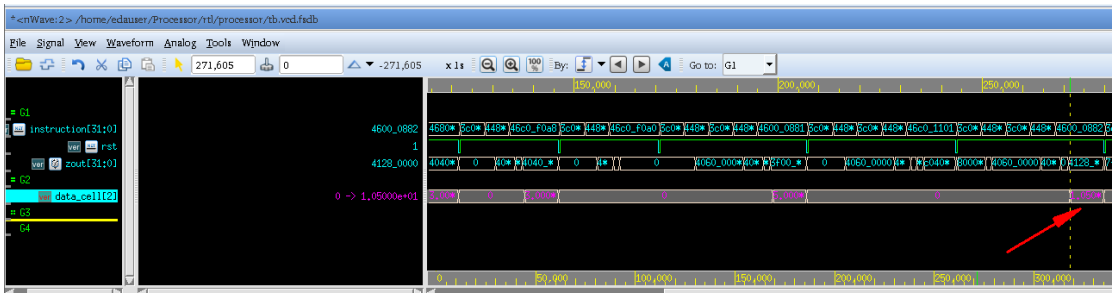
3.3.7 SUB.S



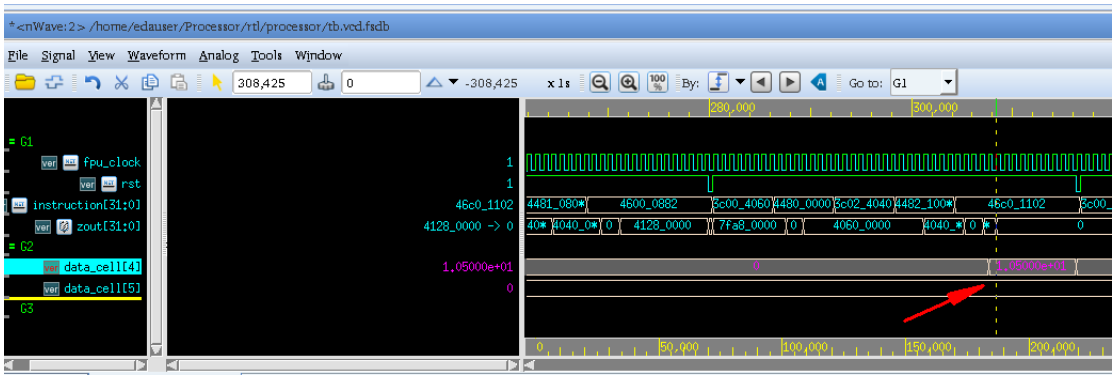
3.3.8 SUB.PS



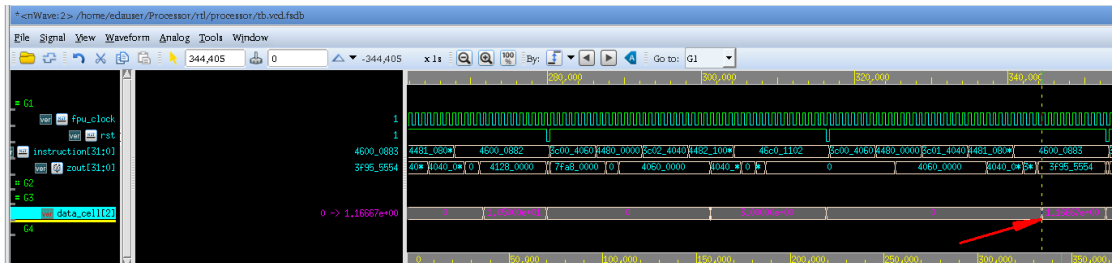
3.3.9 MUL.S



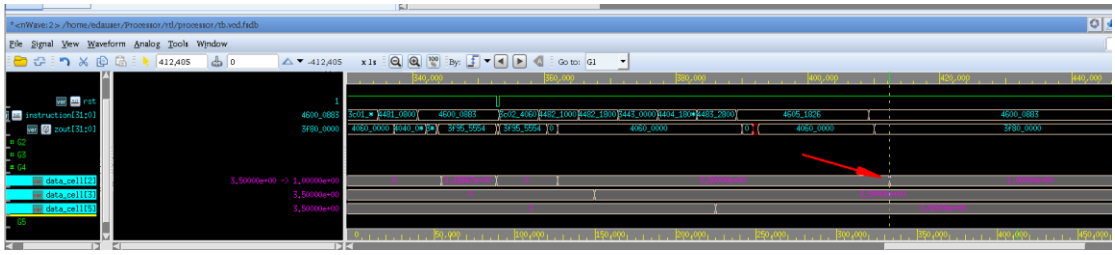
3.3.10 MUL.PS



3.3.11 DIV.S



3.3.12 CVT.PS.S


File Signal View Waveform Analog Tools Window
rst
instruction[31:0]
zout[31:0]
data_cell[2]
data_cell[3]
data_cell[5]

四、调试

4.1 调试技巧

（1）在命令行中可以用方向键快速切换之前的命令，不用重新输入；

（2）可以用 file.f 集成想要的所有文件名，以便统一操作；

（3）想要重新跑一次时，可以直接在命令行中 ctrl+c 来终止目前的前台进程（verdi），再用方向键重新操作一次；

（4）在 waveform 窗口中可以通过修改 radix 来切换进制；

（5）在 verdi 代码窗口中通过双击或者右键，可以跳转到其被引用的地方；

（6）可以通过 ok—continue 查看内存中的波形。

4.2 调试过程与结果

（1）调试过程见日志，调试结果前文已经给出；

（2）代码覆盖率大约占到 70%~80%，缺失的部分：

add 的 NORMALIZE 中，自我循环时判断的是 zm，而没有判断指数，可能出现中途溢出；

div 为 OVER 状态时，指数运算 xe - ye 可能溢出；