# บทที่ 5

## การใช้งานและการทดสอบโปรแกรมเอทีพีจี

โปรแกรมการให้กำเนิดรูปแบบสัญญาณทดสอบโดยอัตโนมัติ โดยใช้วิธีรายการลดทอน เขียนด้วยภาษาซี (ANSI C) ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการ UNIX Solaris Version 2.4 บนเครื่อง SUN SPRACstation 5 มีหน่วยความจำ 32 MB วงจรที่นำมาทดสอบเป็นวงจรมาตรฐานของ Benchmark Circuit ISCAS'85 วงจรประกอบ [4] ISCAS'89 วงจรลำดับ [5] สามารถรับข้อมูลวงจรได้ที่ www.cbl.ncsu.edu

### 5.1 การใช้งาน

เมื่อ Login เข้าสู่ระบบ UNIX ปรากฏเครื่องหมาย Prompt ($) มีลำดับขั้นตอนดังนี้

$ feqimpf c432.vm หรือ feqimpf s208.vm แล้วกด Enter

$ comatpg c432 หรือ seqatpg s208 แล้วกด Enter

ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลดังต่อไปนี้

| | |
|---|---|
| c432.feq | จุดเสียที่สมมูล |
| c432.impf | จุดเสียที่สมนัย |
| c432.red | รายการลดทอน |
| c432.flt | รายการผู้แทนจุดเสีย |
| c432.ufl | รายการจุดเสียที่ทดสอบไม่ได้ |
| c432.tpg | รูปแบบสัญญาณทดสอบ |
| c432.result | รายงานสรุปผลการทดสอบวงจร |

### 5.2 ผลการทดสอบโปรแกรมเอทีพีจี

ผลการทดสอบโปรแกรมเอทีพีจี โดยใช้วิธีรายการลดทอน มีวงจรประกอบที่นำมาทดสอบ จำนวน 10 วงจร และวงจรลำดับ 9 วงจร ดังแสดงในตารางที่ 5.5, 5.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของวงจรประกอบ [22]

| Cir | PI | PO | G | buff | not | and | nand | Or | nor | xor |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C17 | 5 | 2 | 6 | - | - | - | 6 | - | - | - |
| C432 | 36 | 7 | 160 | - | 40 | 4 | 79 | - | 19 | 18 |
| C499 | 41 | 32 | 202 | - | 40 | 56 | - | 2 | - | 104 |
| C1355 | 41 | 32 | 546 | 32 | 40 | 56 | 416 | 2 | - | - |
| C1908 | 33 | 25 | 880 | 162 | 277 | 63 | 377 | - | 1 | - |
| C2670 | 233 | 140 | 1193 | 196 | 321 | 333 | 254 | 77 | 12 | - |
| C3540 | 50 | 22 | 1669 | 223 | 490 | 498 | 298 | 92 | 68 | - |
| C5315 | 178 | 123 | 2307 | 313 | 581 | 718 | 254 | 214 | 27 | - |
| C6288 | 32 | 32 | 2406 | - | 32 | 256 | - | - | 2128 | - |
| C7552 | 207 | 108 | 3512 | 534 | 876 | 776 | 1028 | 244 | 54 | - |

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของวงจรประกอบ (ต่อ) [22]

| Cir | # of Node | # of Line | # of Fout | # of Fault | # of Fclass |
|---|---|---|---|---|---|
| C17 | 16 | 17 | 3 | 34 | 22 |
| C432 | 196 | 432 | 889 | 864 | 524 |
| C499 | 243 | 499 | 59 | 998 | 758 |
| C1355 | 587 | 1355 | 259 | 2710 | 1574 |
| C1908 | 913 | 1908 | 385 | 3816 | 1879 |
| C2670 | 1426 | 2670 | 454 | 5340 | 2747 |
| C3540 | 1719 | 3540 | 579 | 7080 | 3428 |
| C5315 | 2485 | 5315 | 806 | 10630 | 5350 |
| C6288 | 2448 | 6288 | 1456 | 12576 | 7744 |
| C7552 | 3719 | 7552 | 1300 | 15104 | 7550 |

ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติของวงจรลำดับ [22]

| Cir | # of PI | # of PO | # of FF | # of Gates | # of Buff | # of not | # of and | # of Nand | # of or | # of nor | # of xor |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S27 | 4 | 1 | 3 | 10 | - | 2 | 1 | 1 | 2 | 4 | - |
| S208 | 11 | 2 | 8 | 96 | - | 35 | 17 | 19 | 4 | 21 | - |
| S298 | 3 | 6 | 14 | 119 | - | 44 | 31 | 9 | 16 | 19 | - |
| S349 | 9 | 11 | 15 | 150 | - | 57 | 44 | 19 | 10 | 31 | - |
| S420 | 19 | 2 | 16 | 196 | - | 74 | 28 | 46 | 9 | 39 | - |
| S641 | 35 | 24 | 19 | 379 | - | 272 | 90 | 4 | 13 | - | - |
| S731 | 35 | 23 | 19 | 393 | - | 254 | 94 | 28 | 17 | - | - |
| S838 | 35 | 2 | 32 | 390 | - | 149 | 58 | 89 | 16 | 78 | - |
| S1196 | 14 | 14 | 18 | 529 | - | 141 | 118 | 119 | 101 | 112 | - |

PI: Primary Inputs, PO:Primary Outputs, FF:Flip-Flops

ตารางที่ 5.4 คุณสมบัติของวงจรลำดับ (ต่อ) [22]

| Cir | # of Node | # of Line | # of Fout | # of fault | # of Fclass |
|---|---|---|---|---|---|
| S27 | 25 | 26 | 4 | 52 | 32 |
| S208 | 157 | 208 | 32 | 416 | 215 |
| S298 | 190 | 298 | 34 | 596 | 308 |
| S349 | 252 | 340 | 41 | 680 | 350 |
| S420 | 315 | 420 | 66 | 840 | 430 |
| S641 | 533 | 639 | 57 | 1278 | 467 |
| S731 | 569 | 713 | 80 | 1426 | 581 |
| S838 | 625 | 838 | 134 | 1676 | 857 |
| S1196 | 748 | 1196 | 155 | 2392 | 1242 |

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองทดสอบวงจรประกอบ

| วงจร | จำนวนจุดเสีย | | | ค่าครอบคลุมจุดเสีย | จำนวนรูปแบบทดสอบ | เวลา |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ที่ทดสอบ | ทดสอบได้ | ทดสอบไม่ได้ | | | |
| C17 | 16 | 16 | - | 100.00% | 6 | 0.000s |
| C432 | 449 | 445 | 4 | 99.11% | 50 | 0.100s |
| C499 | 706 | 698 | 8 | 98.87% | 52 | 0.000s |
| C1355 | 1210 | 1202 | 8 | 99.34% | 85 | 0.017s |
| C1908 | 1566 | 1557 | 9 | 99.43% | 119 | 0.183s |
| ***C2670*** | ***2317*** | ***2204*** | ***113*** | ***95.12%*** | ***107*** | ***6.483s*** |
| C3540 | 2786 | 2657 | 129 | 95.37% | 154 | 0.517s |
| C5315 | 4492 | 4433 | 59 | 98.69% | 122 | 0.333s |
| C6288 | 5824 | 5790 | 34 | 99.42% | 32 | 0.183s |
| ***C7552*** | ***6132*** | ***6000*** | ***132*** | ***97.85%*** | ***205*** | ***32.13s*** |

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองทดสอบวงจรลำดับ

| วงจร | จำนวนจุดเสีย | | | ค่าครอบคลุมจุดเสีย | จำนวนรูปแบบทดสอบ | เวลา |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ที่ทดสอบ | ทดสอบได้ | ทดสอบไม่ได้ | | | |
| S27 | 32 | 32 | - | 100.00% | 16 | 1.35s |
| S208 | 215 | 134 | 81 | 62.33% | 101 | 42.71s |
| S298 | 308 | 262 | 46 | 85.06% | 116 | 59.13s |
| S349 | 350 | 333 | 17 | 95.14% | 97 | 79.56s |
| ***S420*** | ***430*** | ***176*** | ***254*** | ***40.93%*** | ***107*** | ***119.00s*** |
| S641 | 467 | 404 | 63 | 86.51% | 167 | 146.80s |
| S731 | 581 | 476 | 105 | 81.93% | 136 | 159.31s |
| ***S838*** | ***931*** | ***41*** | ***890*** | ***4.40%*** | ***69*** | ***750.58s*** |
| S1196 | 1242 | 1228 | 14 | 98.87% | 359 | 331.55s |

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบวงจรประกอบ

| Circuit | GA-based TG (1994) | | | ATOM (1998) | | | RedList | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Vec | Cov | Time | Vec | Cov | Time | Vec | Cov | Time |
| C432 | 42 | 100.00% | 43.40s | 110 | 99.23% | 0.10s | 50 | 99.11% | 0.10s |
| C499 | 52 | 100.00% | 38.400s | 127 | 98.94% | 0.30s | 52 | 98.87% | 0.00s |
| C1355 | 84 | 100.00% | 1.97m | 192 | 99.49% | 2.00s | 85 | 99.34% | 0.017s |
| C1908 | 115 | 99.89% | 4.57m | 210 | 99.52% | 0.80s | 119 | 99.43% | 0.183s |
| C2670 | 62 | 96.04% | 16.1m | 242 | 95.74% | 1.10s | 107 | 95.12% | 6.483s |
| C3540 | 121 | 99.90% | 17.7m | 264 | 96.00% | 1.90s | 154 | 95.37% | 0.517s |
| C5315 | 83 | 100.00% | 21.4m | 216 | 98.89% | 1.20s | 122 | 98.69% | 0.333s |
| C6288 | 17 | 100.00% | 6.38m | 64 | 99.56% | 1.30s | 32 | 99.42% | 0.183s |
| C7552 | 133 | 99.15% | 55.5m | 393 | 98.26% | 4.60s | 205 | 97.85% | 32.133s |

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบวงจรลำดับ

| Circuit | STPG (1997) | | | ATOM (1998) | | | RedList | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Vec | Cov | Time | Vec | Cov | Time | Vec | Cov | Time |
| S208 | 140 | 63.72% | 6.68s | 65 | 100.00% | 0.000s | 101 | 62.33% | 42.716s |
| S298 | 230 | 86.03% | 18.30s | 52 | 100.00% | 0.000s | 116 | 85.06% | 59.133s |
| S349 | 116 | 95.71% | 70.26s | 65 | 99.42% | 0.000s | 97 | 95.14% | 79.566s |
| S420 | 169 | 41.62% | 25.18s | 98 | 100.00% | 0.100s | 107 | 40.93% | 119.00s |
| S641 | 420 | 86.50% | 931.6s | 99 | 100.00% | 0.100s | 167 | 86.51% | 146.800s |
| S731 | 359 | 81.92% | 879.3s | 100 | 93.45% | 0.100s | 136 | 81.93% | 159.316s |
| S838 | 200 | 29.63% | 101.8s | 183 | 100.00% | 0.200s | 69 | 4.40% | 750.583s |
| S1196 | 345 | 99.75% | 15.60s | 227 | 100.00% | 0.400s | 359 | 98.87% | 331.550s |

Vec : Test Vectors

Cov : Fault Coverage

ผลการทดสอบวงจรประกอบ ในตารางที่ 5.5 มีเพียงวงจรเดียวที่มีค่าครอบคลุม (Fault Coverage) ครบ 100% คือ วงจร C17 และมีอยู่ 2 วงจรที่ใช้เวลามากในการทดสอบวงจรคือ วงจร C7552 ใช้เวลา 32.133 วินาที และวงจร C2670 ใช้เวลา 6.4 วินาที ซึ่งมีจำนวนเส้นของวงจรมากที่สุด ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นซึ่งใช้หลักวิธี PODEM เป็นพื้นฐาน แสดงในตารางที่ 5.7 GA-base TG [20] ปี ค.ศ. 1994 เขียนด้วยภาษา C++ ทำงานบนเครื่อง SUN SPARCstation II หน่วยความจำ 32 MB กับ ATOM [7] ปี ค.ศ. 1998 เขียนด้วยภาษา C++ (GNU CC Version 2.8) บนระบบปฏิบัติการ LINUX 2.0.0 บนเครื่อง PC Pentium Pro หน่วยความจำ 128 MB และ RedList เป็นผลการทดสอบโดยใช้วิธีรายการลดทอน

หลักวิธีรายการลดทอน กับ ATOM มีค่าครอบคลุมจุดเสียไม่ครบ 100% กับเวลาที่ใช้ทดสอบใกล้เคียงกันแต่ ATOM จะมีจำนวนรูปแบบสัญญาณทดสอบมากกว่า ส่วนของ GA-base TG มีค่าครอบคลุมจุดเสียครบ 100% ถึง 6 วงจร และมีจำนวนรูปแบบสัญญาณทดสอบน้อยกว่าแต่ใช้เวลาในการทดสอบมากกว่า ATOM และรายการลดทอน

ผลการทดสอบวงจรลำดับ ในตารางที่ 5.6 วงจร S838 มีค่าครอบคลุมจุดเสียเพียง 4.40% และเป็นวงจรที่ใช้เวลามากที่สุด 750.583 วินาที เพราะว่าวงจรนี้มีจำนวนฟลิปฟลอปมากกว่าวงจรอื่นๆ ซึ่งมีจำนวนฟลิปฟลอปถึง 32 ตัว ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นที่ใช้หลักวิธี PODEM เป็นพื้นฐานในการให้กำเนิดรูปแบบสัญญาณทดสอบ แสดงในตารางที่ 5.8 STPG [11] ปี ค.ศ.1997 เขียนด้วยภาษา C++ บนระบบปฏิบัติการ LINUX บนเครื่อง PC Pentium Pro 200MHz หน่วยความจำ 128 MB กับ ATOM และ RedList ใช้วิธีรายการลดทอน

หลักวิธีรายการลดทอน กับ STPG มีค่าครอบคลุมจุดเสียใกล้เคียงกัน หลักวิธีรายการลดทอนมีจำนวนรูปแบบสัญญาณทดสอบน้อยกว่า แต่ใช้เวลาในการทดสอบมากกว่า ส่วน ATOM ค่าครอบคลุมจุดเสียครบ 100% ถึง 6 วงจร มีจำนวนรูปแบบสัญญาณทดสอบและเวลาที่ใช้ทดสอบน้อยกว่า STPG และหลักวิธีรายการลดทอน

ในตารางที่ 5.9, 5.10 แสดงผลการทดสอบโปรแกรมจำลองการทำงานจุดเสีย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมการเอทีพีจี โดยนำรูปแบบสัญญาณทดสอบของ ATOM (วงจรประกอบจำนวน 10 วงจร) กับ HITEC [14] (วงจรลำดับ จำนวน 8 วงจร) มาจำลองการทำงาน เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานจุดเสีย มี 4 ส่วน คือ จำนวนจุดเสียที่ทดสอบได้ จำนวนจุดเสียที่ทดสอบไม่ได้ จำนวนรูปแบบสัญญาณทดสอบ และค่าครอบคลุมจุดเสีย ผลจำลองการทำงานจุดเสียของวงจรประกอบได้เท่ากันดังตารางที่ 5.9 ส่วนวงจรลำดับแสดงในตารางที่ 5.10 ผลลัพธ์ที่ได้จำนวนจุดเสียที่ทดสอบได้กับไม่ได้มีค่าเท่ากัน ค่าครอบคลุมจุดเสียมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบโปรแกรมจำลองการทำงานจุดเสียวงจรประกอบ

| Cir | ATOM | | | | My Fault Simulation | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Det Faults | UnDet Faults | Test Vectors | Fault Coverage | Det Faults | UnDet Faults | Test Vectors | Fault Coverage |
| C432 | 520 | 4 | 110 | 99.23% | 520 | 4 | 110 | 99.23% |
| C499 | 750 | 8 | 127 | 98.94% | 750 | 8 | 127 | 98.94% |
| C880 | 942 | - | 133 | 100.00% | 942 | - | 133 | 100.00% |
| C1355 | 1566 | 8 | 192 | 99.49% | 1566 | 8 | 192 | 99.49% |
| C1908 | 1870 | 9 | 210 | 99.52% | 1870 | 9 | 210 | 99.52% |
| C2670 | 2630 | 117 | 242 | 95.74% | 2630 | 117 | 242 | 95.74% |
| C3540 | 3291 | 137 | 264 | 96.00% | 3291 | 137 | 264 | 96.00% |
| C5315 | 5291 | 59 | 216 | 98.89% | 5291 | 59 | 216 | 98.89% |
| C6288 | 7710 | 34 | 64 | 99.56% | 7710 | 34 | 64 | 99.56% |
| C7552 | 7419 | 131 | 393 | 98.26% | 7419 | 131 | 393 | 98.26% |

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบโปรแกรมจำลองการทำงานจุดเสียวงจรลำดับ

| Cir | HITEC | | | | My Fault Simulation | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Det Faults | UnDet Faults | Test Vectors | Fault Coverage | Det Faults | UnDet Faults | Test Vectors | Fault Coverage |
| S349 | 335 | 13 | 137 | 95.7% | 334 | 16 | 134 | 95.42% |
| S386 | 314 | 70 | 311 | 81.7% | 314 | 70 | 286 | 81.77% |
| S641 | 404 | 62 | 242 | 86.5% | 404 | 63 | 209 | 86.51% |
| S713 | 476 | 105 | 253 | 81.9% | 476 | 105 | 173 | 81.92% |
| S832 | 815 | 47 | 1316 | 93.6% | 817 | 53 | 1137 | 93.90% |
| S1196 | 1239 | 3 | 480 | 99.7% | 1239 | 3 | 435 | 99.75% |
| S1494 | 1453 | 53 | 1407 | 96.4% | 1453 | 53 | 1245 | 96.48% |
| S35932 | 34697 | 3984 | 1000 | 88.8% | 34901 | 4193 | 496 | 89.27% |