UNIUNEA EUROPEANĂ
GUVERNUL ROMÂNIEI
Instrumente Structurale
2007-2013

Platformă de e-learning și curriculă e-content pentru învățământul superior tehnic

Testarea Sistemelor

21. Generarea vectorilor de test pentru BIST

GENERAREA VECTORILOR DE TEST PENTRU BIST

În aceasta secţiune vor fi descrise câteva structuri de GVT. Vom presupune că unitatea aflată în test este un circuit combinaţional cu *n* intrări şi *m* ieşiri. Diverse forme de testare si TPG-urile corespunzătoare sunt date mai jos.

- Testarea exhaustivă:
    - Generatoare exhaustive de vectori de test.
- Testarea pseudoaleatoare:
    - Generatoare ponderate de vectori test.
    - Generatoare adaptive de vectori test.
- Testarea pseudo-exhaustivă:
    - Numărător specific pentru sindrom.
    - Numărător cu pondere constantă.
    - *RDRL* combinat şi registru de deplasare.
    - *RDRL* combinat cu porţi XOR.
    - *RDRL* condensat.
    - *RDRL* ciclic.

Testarea exhaustivă

Testarea exhaustivă are drept caracteristică testarea unui circuit combinațional cu *n* intrări prin toţi cei 2^n vectori de intrare. Se poate folosi un numărător binar ca *GVT*. Dacă este folosit un *RDRL* cu lungime maximă autonom, atunci structura sa poate fi modificată pentru a include starea de zero peste tot. Un astfel de *RDRL* este numit *RDRL complet.*

Testarea exhaustivă garantează că toate erorile detectabile care pot genera o comportare secvențială vor fi sesizate. Depinzând de frecvenţa semnalului de ceas, această soluţie, în general, este aplicabila daca *n* este mai mic decât 22. Conceptul de testare exhaustivă nu este, în mod obișnuit, folosit pentru circuitele secvențiale.

Testarea pseudoaleatoare

Testarea pseudoaleatoare se aplică la testarea unui circuit prin vectori de test care au multe caracteristici ale vectorilor generați aleator dar unde vectorii sunt generaţi deterministic, fiind astfel repetabili. Vectorii pseudo-aleatori pot fi generaţi cu sau fără re-aparaţie. Generarea cu reapariţie implică faptul că un vector de test poate fi generat de mai multe ori. Generarea fără reapariţie garantează că fiecare vector va fi unic generat. Nu toate cei 2^n vectori de test sunt generaţi. Vectorii de test pseudo-aleatori fără re-apariţie pot fi generaţi cu un *RDRL* autonom. Testarea pseudoaleatoare este aplicabilă atât circuitelor combinaţionale cât şi secvenţiale. Acoperirea defectelor poate fi determinată prin tehnicile de simularea ale defectelor. Din nefericire anumite circuite conţin erori greu detectabile cu vectori aleatori şi, din acest motiv, acestea necesită teste lungi pentru asigurarea unei bune detecţii a defectelor. Metodele de estimare a probabilității de detectare a defectelor sunt atribute ale analizei testării circuitelor digitale prin vectori de test generaţi aleator.

Atributele inerente ale unui *RDRL* fac ca acesta să producă vectori de test având un număr egal de 0 şi 1 pe fiecare linie de ieşire. Pentru multe circuite este mai bine, însă, să se modifice distribuţia de 0 si 1 pe o linie de ieşire, pentru obţinerea unei mai mari acoperiri a defectelor cu mai puţini vectori de test. Se consideră, spre exemplu, o poartă SI-NU cu 4 intrări. Atunci când se aplică vectori generaţi pseudo-aleator aleatoare nemodificaţi, probabilitatea să existe cel puţin un 0 pe oricare intrare este de 15/16. Un 0 pe oricare intrare face imposibilă testarea unor alte intrări pentru care există blocaje de tipul *b-l*-0 sau *b-l*-1. Astfel este necesar sa fie posibila generarea de vectori de test având diferite distribuţii pentru valorile 0 şi 1.

Generarea unor vectori de test neuniform distribuiţi

Un generator de test neuniform este un *GVT* unde distribuţia de 0 şi 1 produsă pe liniile de ieşire nu este în mod obligatoriu uniformă. Un astfel de generator poate fi construit folosind un *RDRL* autonom şi un circuit combinaţional.

O distribuție de probabilitate de 0.5 pentru valoarea 1 care este în mod normal generata de un *RDRL* cu lungimea maxima, spre exemplu, poate fi uşor modificata la 0.25 sau 0.75 pentru a creşte acoperirea defectelor.

Când se testează un circuit folosind un generator de teste neuniform distribuite, o rutina de preprocesare este executata pentru determinarea unor seturi de probabilităţi. Anumite părți ale unui circuit pot fi testate mai eficient decât altele prin vectori pseudo-aleatori având diverse distribuţii. Odată ce aceste probabilităţi sunt determinate, *GVT* corespunzător poate fi proiectat pentru generarea pseudoaleatoare a unor vectori având distribuţiile dorite.

Generarea unor vectori de test adaptaţi

Generarea de teste adaptate necesită deasemenea un generator de vectori de test pseudo-aleatori. Pentru aceasta tehnică rezultatele simulării defectelor sunt folosite pentru modificarea probabilităţilor. Din această cauză sunt necesare mai multe distribuţii de probabilitate pentru vectorii de test. Odată ce aceste distribuţii sunt stabilite se poate proiecta un GVT adecvat.

Testele generate de un astfel de dispozitiv tind sa fie foarte eficiente în termeni de lungime a testului; în acest caz circuitele utilizate pentru generarea vectorilor de test poate fi mai complex.

Testarea pseudoexhaustivă

Testarea pseudoexhaustivă aduce multe din beneficiile testării exhaustive dar, în general, necesită mult mai puţini vectori de test. Această tehnică se bazează pe segmentarea circuitului şi pe testarea fiecărui segment de circuit în mod exhaustiv. Datorită faptului că există multe detalii de luat în consideraţie în cadrul testării pseudo-exhaustive, se vor discuta, pe scurt, principalele concepte din aceasta abordare.
Un segment este un sub-circuit al unui circuit C. Segmentele nu sunt necesar să fie disjuncte. Există mai multe forme de segmentare, unele dintre ele fiind enumerate în continuare:

1. Segmentarea logică:
    a. Segmentarea prin conuri tranzitive (testare de verificare).
    b. Segmentarea prin căi sensitivizate.
2. Segmentarea fizică.

Atunci când se execută un test pseudo-exhaustiv asupra unui circuit cu *n* intrări, este posibil (în general) să se reconfigureze liniile de test pentru producerea de vectori de test cu numai *m* ranguri, unde $m < n$, şi aceste *m* linii de test pot să comande cele *n* linii de test ale circuitului testat. Aceste *m* semnale vor fi numite semnale de test. În cele ce urmează va fi descrisă o procedură pentru identificarea celor *m* linii de test.

Testarea pseudoexhaustivă poate fi adeseori realizată prin folosirea unor vectori de test cu probabilităţi constante. Vor fi prezentate anumite rezultate teoretice despre astfel de vectori. De asemenea vor fi descrise diverse structuri de circuite care generează aceşti vectori precum si alte șabloane folosite in testarea pseudo-exhaustiva.

Segmentarea logică

În aceasta secțiune vor fi descrise pe scurt tehnici de segmentare logică.

Segmentarea prin conuri tranzitive

In cadrul tehnicii de segmentare prin conuri tranzitive un circuit cu *k* linii de ieşire este segmentat in *k* conuri, fiecare con fiind constituit din toata logica asociata tranzitiv către liniile de intrare cu ieşirea corespunzătoare. Fiecare con este testat exhaustiv, şi toate conurile sunt testate concurent. Aceasta forma de testare a fost iniţial sugerată de profesorul McCluskey în1984 şi mai este numită şi *testare de verificare*.

Se consideră un circuit combinaţional *C* cu intrările $X=\{x_1,x_2, \dots , x_n\}$ şi ieşirile $Y=\{y_1,y_2, \dots , y_m\}$. Fie $y_i = f_i(X_i)$ unde $X_i \subseteq X$. Fie $w = \max_i\{|X_i|\}$. O formă a testului de verificare produce toţi cei 2^w vectori de intrare pe toate subseturile (calculate prin combinaţii de *n* luate câte *w*) cu intrări *w* ale circuitului *C*. Circuitul de testat este numit *(n,w)*-CAT, unde $w<n$. Daca $w=n$, atunci testarea pseudo-exhaustiva devine testare exhaustiva. Figura 3 arata un astfel de CAT.

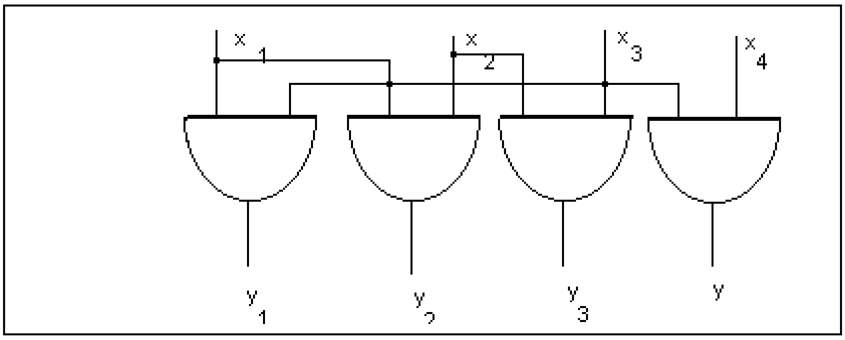

Fig. 3 Un (4,2)-CUT

Segmentarea prin căi sensitivizate

Anumite circuite pot fi segmentate pe baza conceptului de descompunere după căi. Un exemplu foarte simplu este indicat in figura 4. Pentru a testa C_1 exhaustiv, sunt aplicaţi 2^{n1} vectori de test pe liniile de intrare A în timp ce liniile de intrare B sunt poziţionate la o valoare astfel încât D=1. Astfel o cale sensitivizată este stabilită de la C la F. Sub-circuitul C_2 este testat în aceiaşi manieră. Prin acest proces poarta ŞI este astfel complet testată. In acest mod, acest circuit poate fi testat folosind numai 2^{n1} + 2^{n2} +1 vectori de test în loc de 2^{n1+n2} vectori de test.

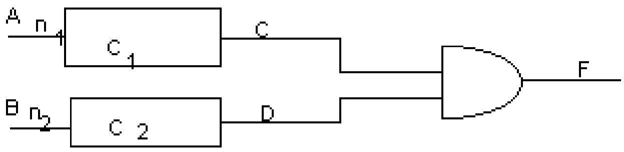

Fig. 4.

Vectori cu probabilitate constantă

Se consideră doi întregi pozitivi n si k, unde $k \leq n$. Fie T un set de n-uple binare. Se spune că *T acoperă exhaustiv toate k-subspaţiile* dacă pentru toate subseturile de k biţi, fiecare din cei 2^k vectori apare cel puţin o dată în cele $|T|$ n-tuple. Spre exemplu, setul T de mai jos acoperă exhaustiv toate 2-spaţiile.

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Daca $|T|_{min}$ este cea mai mica dimensiune pentru un astfel de set, atunci evident $2^k \leq [T]_{min} \leq 2^n$.

Un n-uplu binar este considerat a fi de pondere k dacă conţine exact k biţi 1. Există combinaţii de n luate câte k de n-upluri binare având ponderea k.

Următorul rezultat a fost dedus de Tang şi Woo în 1983 şi va fi prezentat aici fără demonstraţie.

<u>*Teorema* 1</u>*:* Fiind date n si k, atunci T acoperă exhaustiv toate k-subspaţiile binare dacă conţine toate n-uplele binare de pondere w astfel încât $w = c$ modulo(n-k+1) pentru o valoare constantă întreagă c, unde $0 \leq c \leq n$-k.

Fie T setul care este generat utilizând teorema 1 pentru o anumita valoare c.

<u>*Exemplul* 1</u>: n = 20, k = 2, n-k+1 = 19.

Cazul 1*: c=0*

Alegând w = 0 mod19 se generează w = 0 şi 19. Astfel T_0 este format din toate şabloanele 0 şi toate şabloanele 20 cu ponderea 19. Deci, se va considera:

$\left|T_0\right| = \begin{bmatrix} 20 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 20 \\ 19 \end{bmatrix} = 1 + 20 = 21$ (unde prin paranteze drepte s-a notat combinări de 20 luate câte 0 şi respective câte 19).
iar

$$T_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & & & \\ & 0 & & \\ & & . & 1 \\ & & & . \\ & 1 & & . \\ & & & 0 \end{bmatrix}$$

Cazul 2*: c* = 1
Dacă w =1 mod 19 rezulta în w = 1, 20. De aceea

$$\left|T_1\right| = \begin{bmatrix} 20 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 20 \\ 20 \end{bmatrix} = 20 + 1 = 21$$

şi

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & . & 0 \\ & & & . \\ & 0 & & . \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

Cazul 3*:* $2 \le c \le 18$

Pentru $2 \le c \le 18$*,* $w = c$ mod 19 implică că $w = c$. Astfel în fiecare caz T_c este format din toate n-uplele binare de pondere c şi $\left|T_c\right| = \begin{bmatrix} n \\ c \end{bmatrix}$. Se are în vedere că T_0 şi T_1 sunt cele mai mici seturi din seturile de 19; de fapt T_0 şi T_1 sunt complementare.

<u>*Exemplul 2:*</u> n = 0 mod18, w=0 şi 18.
Astfel,

$$\left|T_0\right| = \begin{bmatrix} 20 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 20 \\ 18 \end{bmatrix} = 1 + 190 = 191 .$$

Cazul 2: c = 1

Pentru w=1 mod18, w=0 si 19 si $\left|T_1\right| = \begin{bmatrix} 20 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 20 \\ 19 \end{bmatrix} = 20 + 20 = 40$

Cazul 3: c = 2

Pentru w = 2 mod18, w = 2, 20 şi T_2 este complementul lui T_0.

Cazul 4: $3 \le c \le 17$

Pentru $w = c$ mod 8, $3 \le c \le 17$, va rezulta $w = c$.

Pentru ambele exemple, pentru orice valoare a lui *w*, $0 \le w \le 20$, toate *n*-uplele de pondere *w* exista doar în cazul considerat.

Situația generală este dată de următorul corolar.

Corolar 1: Există *(n-k+1)* seturi T_i de soluții, $0 \le i \le n-k$ obținute din teorema 1 şi aceste seturi de soluții sunt disjuncte şi împart setul tuturor celor 2^n *n*-uple în clase disjuncte.

Deoarece există (*n-k+1*) seturi de soluții care împart setul de 2^n *n*-uple distincte in *(n-k+1)* seturi disjuncte, si cel mai mic set nu poate fi mai mare decit setul de dimensiune medie, atunci o limita maxima a dimensiunii lui $|T|_{min}$ este :

$$|T|_{min} \le \frac{2^n}{n-k+1} = B_n .$$

Teorema 2 : Fie T_c un set generat conform teoremei 11.1. Atunci T_c este minimal; spre exemplu, nici un subset al lui T_c de asemenea nu va acoperi exhaustiv toate k-subspațiile, dacă $c \le k$ sau $c = n - k$.

<u>*Exemplul 3 :*</u> *n* = 6, *k* =2, *n* – *k* + 1 = 5

Pentru *c* = 3, *w* = 3mod5, astfel *w*=3 şi $|T_3| = \begin{bmatrix} 6 \\ 3 \end{bmatrix} = 20$. Un subset al lui T_3 care acoperă exhaustiv toate 2-subspatiile este arătat mai jos ca T'_3.

$$T_3' = \begin{bmatrix} 1\,1\,0\,0\,1\,0 \\ 1\,0\,1\,1\,0\,0 \\ 1\,0\,0\,1\,0\,1 \\ 0\,1\,1\,0\,0\,1 \\ 0\,1\,0\,1\,1\,0 \\ 0\,0\,1\,0\,1\,1 \end{bmatrix}$$

T_3' este minimal si $|T_3'| = 6$.

Limita superioară a lui $|T_{min}| \le B_n$ este apropiată de B_n când k este apropiat de n şi mai mică atunci când *k* este mic. B_n creşte exponenţial cu creşterea lui *n*, independent de valoarea lui *k*.

Pentru $k \le n/2$, mărimea setului minim de test se obţine când $w = \lfloor k/2 \rfloor$ şi $\lfloor k/2 \rfloor + (n-k+1)$, având ca rezultat

$$|T_{min}| = \begin{bmatrix} n \\ \lfloor k/2 \rfloor \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n \\ k - \lfloor k/2 \rfloor - 1 \end{bmatrix}$$

Se vor considera acum doua cazuri speciale:

Cazul 1: n=k

În acest caz w=0 mod 1, deci w = 0, 1 , 2, …. , n. Astfel T_0 este format din toate seturile din toate cele 2^n n-uple binare.

Cazul 2: n = k + 1

In acest caz $w = c$ mod 0, şi T_0 este format din setul tuturor n-uplelor binare având paritate impară, şi T_1 este format din setul tuturor n-uplelor având paritate pară. Aceasta situație este arătată mai jos pentru cazul când n = 4 si k=3.

$$T_0 = \left.\begin{bmatrix} 0\,0\,0\,0 \\ 0\,0\,1\,1 \\ 0\,1\,0\,1 \\ 1\,0\,0\,1 \\ 0\,1\,1\,0 \\ 1\,0\,1\,0 \\ 1\,1\,0\,0 \\ 1\,1\,1\,1 \end{bmatrix}\right\}\text{ paritate impară} \qquad T_1 = \left.\begin{bmatrix} 1\,0\,0\,0 \\ 0\,1\,0\,0 \\ 0\,0\,1\,0 \\ 0\,0\,0\,1 \\ 1\,1\,1\,0 \\ 1\,1\,0\,1 \\ 1\,0\,1\,1 \\ 0\,1\,1\,1 \end{bmatrix}\right\}\text{ paritate impară.}$$

Următoarea teorema verifica corectitudinea în acest din urmă caz.

Teorema 3: Intr-o matrice cu 2^k linii distincte de (k+1) valori binare, unde fiecare linie are aceiaşi paritate, fiecare set de k coloane are toate cele 2^k combinaţii ale valorilor k.

Demonstrație : Un set de k coloane este obținut prin ștergerea unei coloane din matrice. Vrem sa demonstram ca cele 2^k linii ale matricei ramase sunt distincte. Sa presupunem ca, din contra, exista doua coloane - sa spunem I si j - sunt identice Din cauza ca am presupus o paritate constanta, urmează ca biții coloanei șterse in liniile I si j ale metricii trebuie sa fie egali. De aici rezulta ca liniile I si j ale metricii originale sunt deasemenea identice,fapt care contrazice presupunerea ca toate cele 2^k linii de (k+1) biți sunt distincte. Rezulta ca fiecare set de k coloane are toate cele 2^k combinații ale valorilor k.
◊