

Iskanje procesne platforme prihodnosti

Miha Mraz

Jesen 2015

Kazalo

Predgovor	iii
1 Razširjeni kvantni celularni avtomati	1
1.1 Razširjena celica QCA	1
1.2 Trovrednostno procesiranje v EQCA	2
1.2.1 Dinamika v strukturi EQCA linije	3
1.2.2 Dinamika v strukturi EQCA negatorja	3
1.2.3 Dinamika v strukturi EQCA majoritetnih vrat	3
1.2.4 Nadgradnja EQCA majoritetnih vrat	6
1.3 Sklep	7

Predgovor

Življenje v prihodnosti bo nedvomno pogojeno z našo obkroženostjo z avtomatiziranimi sistemi, ki bodo zadovoljevali naše potrebe. Cena, dimenzija in hitrost teh sistemov bo neposredno pogojena s platformo na kateri bo procesiranje teklo v službi uporabnika. V pričujočem delu skušamo nakazati revolucionarne iztočnice prihodnosti, ki jim bomo na nivoju procesiranja priča ne samo kot uporabniki, temveč tudi kot snovalci sistemov.

prof.dr.Miha Mraz, Ljubljana, v septembru 2015

Poglavje 1

Razširjeni kvantni celularni avtomati

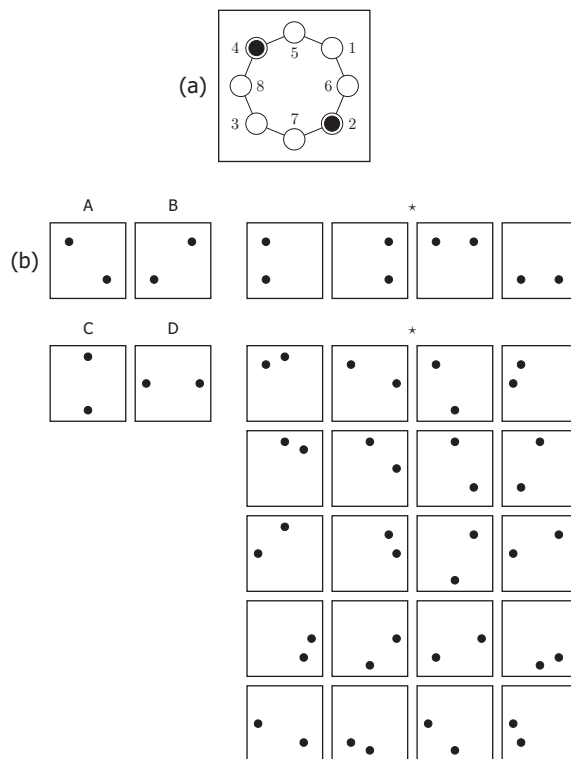
V pričujočem poglavju vpeljemo pojem *razširjene kvantne celice* (angl. *quantum-dot cellular automaton*), ki z razliko od klasične QCA celice nima več samo dveh energetsko stabilnih stanj, temveč štiri. V nadaljevanju prikažemo, da vsi predhodno naštetih logični primitivi (linija, negator in majoritetna vrata) delujejo na dvovrednostni način tudi v strukturah realiziranih z razširjenimi kvantnimi celicami. Še več, pokažemo, da je mogoče ob takšni razširitvi realizirati osnovni nabor trovrednostnih logičnih funkcij J. Łukasiewicza [1]. Vsebina pričujočega poglavja je bila objavljena v delih [2], [3] in je plod raziskav Laboratorija za računalniške strukture in sisteme Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani.

1.1 Razširjena celica QCA

Predhodno smo si že ogledali definicijo dvostanjske QCA celice s štirimi kvantnimi pikami. Njena slabost je v omejenosti na zgolj dve možni energetsko stabilni stanji. Ob predpostavki, da je z vidika realizacije na površino celice možno postaviti večje število kvantnih pik, nas zanima, kakšna bo dinamika prehajanja stanj iz nestabilnih v stabilna v tovrstni strukturi. Naša hipoteza je, da v primeru večjega števila pik pridemo tudi do večje zaloge stabilnih stanj elektronov v celici, kar bi lahko uporabili v domeni večvrednostnega procesiranja, saj bi s tem dobili ustrezne nosilce logičnih vrednosti.

Predpostavimo, da definiramo celico z osmimi pozitivno nabitimi kvantnimi pikami, ki so enakomerno razporejene v krogu, premer kroga pa sovpada z razdaljami stranic kvadrata, v katerega so vpete klasične QCA celice. Med sosednjimi pikami predpostavimo obstoj tunelov, katerih funkcija je enaka kot pri klasičnih QCA, v celico pa zopet uvrstimo dva elektrona. Shema omenjene celice je predstavljena na sliki 1.1a. Definirano razširjeno kvantno celico smo proglasili za osnovno entiteto razširjenih kvantnih celularnih avtomatov (ang. *extended*

quantum-dot cellular automata - EQCA), poimenovali pa jo bomo za tQCA (angl. *ternary quantum-dot cellular automaton*). Vse fizikalne zakonitosti izračunavanja stabilnih leg elektronov smo povzeli po predhodno že predstavljenem načinu izračunavanja, ki smo ga spoznali v poglavju o klasičnih QCA. Na sliki 1.1b so z A, B, C in D tako označena vsa možna *stabilna stanja*, z \star pa *nestabilna stanja*, katerih nestabilnost povzroča prevlada medsebojnih odbojnih sil med elektronoma v posamezni celici. Stabilni stanji A in B po vrsti sovpadata z logičnimi vrednostmi 0 in 1, kot jih je definiral Lent, novi pridobljeni stabilni stanji pa sta C in D.



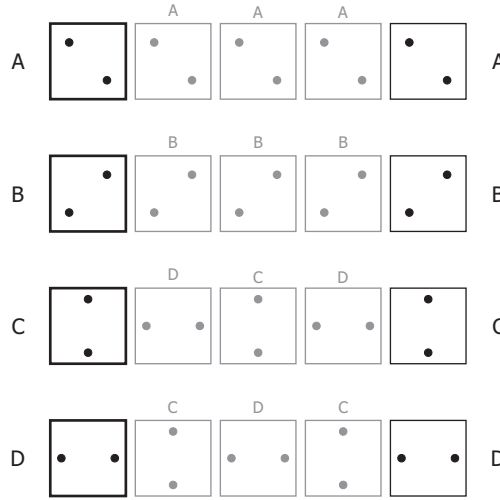
Slika 1.1: Shema EQCA celice z osmimi pikami in dvema elektronoma (a) in zaloga vrednosti vseh stabilnih ter nestabilnih stanj v EQCA celici (b).

1.2 Trovrednostno procesiranje v EQCA

Po definiciji razširjene kvantne celice kot primarnega elementa struktur EQCA smo začeli testirati logično delovanje nam že poznanih logičnih primitivov kot so *linija*, *negator* in *majoritetna vrata*.

1.2.1 Dinamika v strukturi EQCA linije

Na sliki 1.2 je predstavljena dinamika linije, pri čemer so odebeljene celice na levi *gonilniki* (angl. *drivers*), sive vmesne celice *notranje* celice in normalno očrtane celice na desni *izhodne* celice. Iz slike je razvidno, da se stabilni stanji A in B prenašata pravilno, stanji C in D pa alternirajoče. To pomeni, da bi morali za zagotavljanje pravilnega prenosa poljubnega stabilnega stanja (logične vrdnosti) v implementacijskem pogledu uporabljati lihe dolžine linij.



Slika 1.2: Dinamika v strukturi EQCA linije.

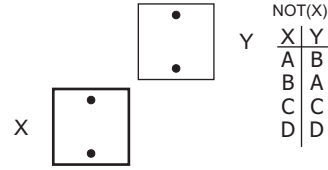
1.2.2 Dinamika v strukturi EQCA negatorja

Na sliki 1.3 je predstavljena dinamika negatorja. Celica X predstavlja gonilnik, celica Y pa izhod. Iz izračunane prehajalne tabele na sliki je razvidno, da se stabilni stanji A in B negirata pravilno ($A \rightarrow B \equiv 0 \rightarrow 1$, $B \rightarrow A \equiv 1 \rightarrow 0$), stanji C in D pa se v tem negatorju ohranjata. V primeru, da stanji C in D na tem mestu izenačimo z logično vrednostjo $\frac{1}{2}$, smo zadostili pravilnosti tabeli negacije po Łukasiewiczu, ki predvideva, da se negacija logične vrednosti $\frac{1}{2}$ izvede po izrazu

$$x = \frac{1}{2} \rightarrow \bar{x} = \frac{1}{2}. \quad (1.1)$$

1.2.3 Dinamika v strukturi EQCA majoritetnih vrat

Do sedaj smo ugotovili, da v EQCA celici z osmimi kvantnimi pikami, ki so enakomerno razporejene v krogu, obstajajo štiri stabilna stanja $\{A, B, C, D\}$. Ob



Slika 1.3: EQCA shema in izračunana prehajalna tabela za negator EQCA.

predhodni obravnavi EQCA linije smo pristali na omejitev uporabe prenašalnih linij lihe dolžine. Dodatno omejitev nam prinese EQCA negator, ki zahteva predpostavljeno logično izenačitev nosilcev stanj C in D. Odtod hipotetično predpostavimo naslednje:

- stanje A sovpada z logično vrednostjo 0, stanje B pa z logično vrednostjo 1; stanji C in D sovpadata z logično vrednostjo $\frac{1}{2}$; s tem predpostavljamo, da imamo za eno logično vrednost dva različna možna nosilca (dve različni stanji nosilca);
- v poljubno enostavno ali kompleksnejšo EQCA logično strukturo ne bo mogla niti vstopati, niti izstopati vrednost D logične spremenljivke; omenjena vrednost logične spremenljivke bo dovoljena le v delovnih notranjih celicah; ugotovimo lahko, da linija in generator, v katera ne vstopa logična vrednost D, omenjeni kriterij izpolnjujeta;

Glede na podane predpostavljene omejitve s tem pristajamo na zalogo logičnih vrednosti $\{0, 1, \frac{1}{2}\}$, z vidika nosilca vhodnih in izhodnih vrednosti logičnih spremenljivk na zalogo stanj $\{A, B, C\}$, z vidika nosilca vrednosti logičnih spremenljivk notranjih celic pa na zalogo stanj $\{A, B, C, D\}$.

Na sliki 1.4 je predstavljena izračunana prevajalna tabela za EQCA majoritetna logična vrata. Glede na to, da vstopna logična spremenljivka S predstavlja le stikalo, ki izbira med logičnima funkcijama AND in OR, nas zanimajo le tisti izhodi, pri katerih je vhodna vrednost stikala $S = A = 0$ (izbira AND funkcije) ali $S = B = 1$ (izbira OR funkcije). Omenjene vrednosti se nahajajo v prvih dveh levih stolpcih prevajalne tabele na sliki. Istočasno iz opazovanja izpustimo vse tiste izhodne vrednosti, pri katerih je x_1 ali x_2 po vrednosti D, ker smo se tej vrednosti vhodne logične spremenljivke predhodno že odpovedali. Tako so za analizo delovanja majoritetnih EQCA vrat relevantni le vhodni vektorji in izhodne vrednosti, podani v zasenčenih segmentih prvih dveh stolpcev na levem delu slike 1.4.

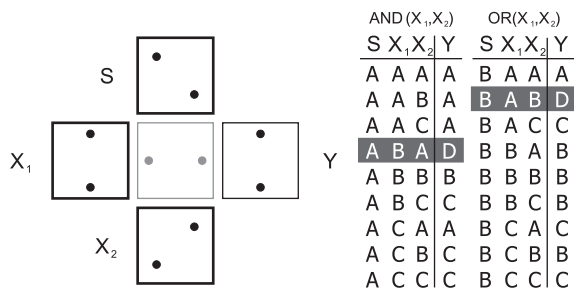
Na sliki 1.5 je predstavljena shema EQCA majoritetnih vrat in njena izračunana prehajalna tabela dinamike za primera, kjer je S krmilni vhod izbire funkcije, x_1 in x_2 pa vhodni spremenljivki. Funkcijo krmilnega vhoda lahko zapišemo z izrazoma

$$S = A = 0 \rightarrow AND(x_1, x_2), \quad (1.2)$$

$$S = B = 1 \rightarrow OR(x_1, x_2). \quad (1.3)$$

S	X ₁	X ₂	Y	S	X ₁	X ₂	Y	S	X ₁	X ₂	Y	S	X ₁	X ₂	Y	
A	A	A	A	B	A	A	A	C	A	A	A	D	A	A	A	D
A	A	B	A	B	A	B	D	C	A	B	C	D	A	B	A	D
A	A	C	A	B	A	C	C	C	A	C	C	D	A	C	A	A
A	A	D	D	B	A	D	D	C	A	D	A	D	A	D	A	D
A	B	A	D	B	B	A	B	C	B	A	C	D	B	A	A	D
A	B	B	B	B	B	B	B	C	B	B	B	D	B	B	B	D
A	B	C	C	B	B	C	B	C	B	C	C	D	B	C	B	B
A	B	D	D	B	B	D	D	C	B	D	B	D	B	D	B	D
A	C	A	A	B	C	A	C	C	C	A	C	D	C	A	A	D
A	C	B	C	B	C	B	B	C	C	B	C	D	C	B	B	D
A	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C	D	C	C	C	C
A	C	D	D	B	C	D	D	C	C	D	C	D	C	D	D	D
A	D	A	D	B	D	A	D	C	D	A	A	D	D	A	A	D
A	D	B	D	B	D	B	D	C	D	B	B	D	D	B	B	D
A	D	C	A	B	D	C	B	C	D	C	C	D	D	C	D	D
A	D	D	D	B	D	D	D	C	D	D	D	D	D	D	D	D

Slika 1.4: Izračunana prevajalna tabela za EQCA majoritetna logična vrata.



Slika 1.5: EQCA shema in izračunana pravilnostna tabela za EQCA majoritetna logična vrata.

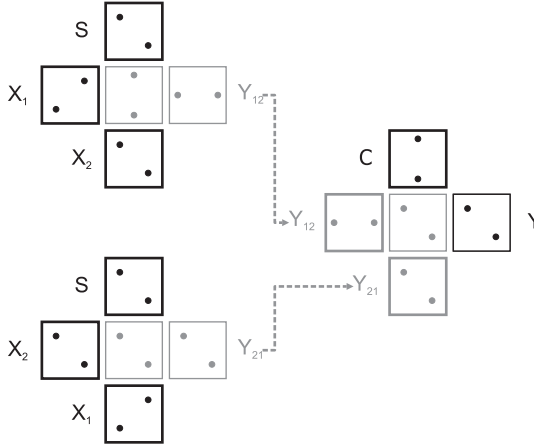
V izračunanih prevajalnih tabelah operatorjev AND in OR na sliki 1.5 so glede na predhodne omejitve povzeti iz prevajalne tabele iz slike 1.4 le izhodi tistih vhodnih vektorjev (glej osenčene primere iz omenjene slike), ki so za naš primer relevantni. Ugotovimo lahko, da se trovrednostna majoritetna funkcija pri večini vhodnih vektorjev odziva ustrezno (po Łukasiewiczzevih pravilnostnih tabelah), v dveh primerih (glej osenčene vhodne in izhodne vrednosti na sliki 1.5) pa pride do polarizacije v stabilna stanja, ki ne sovpadajo s pravilnostnimi tabelami po Łukasiewiczzevi trovrednostni logiki. Prvi napačni odziv dobimo pri izvajanju operacije AND pri vhodnih vrednostih 1 in 0 ($S = 0 = A, x_1 = B = 1, x_2 = A = 0, y = D = \frac{1}{2}$), drugega pa pri izvajanju operacije OR pri vhodnih vrednostih 0 in 1 ($S = 1 = B, x_1 = A = 0, x_2 = B = 1, y = D = \frac{1}{2}$). V obeh primerih napačnega odziva dobimo na izhod vrednost D, ki smo jo predhodno že izključili iz množice možnih stanj vhodnih in izhodnih celic (ne pa možnih stanj notranjih celic). S tem se nam je podrla predpostavka, da bomo v tQCA celicah lahko vršili običajne dvovrednostne funkcije in s tem posledično tudi predpostavka o možnosti izvajanja preklopne logike po Łukasiewiczzevi trovrednostni logiki.

1.2.4 Nadgradnja EQCA majoritetnih vrat

V prejšnjem razdelku smo predstavili delno pravilno izvajanje logičnih funkcij AND in OR v EQCA majoritetni funkciji. Cilj pričujočega razdelka je najti ustrezno dopolnitev ali alternativno strukturo za EQCA realizacijo majoritetnih vrat, ki bi delovala po Łukasiewiczovi trovrednostni logiki. Za slednjo vemo, da ima pri vstopajočih vrednostih A in B značilnosti dinamike dvovrednostne logike.

Postopka dopolnitve EQCA strukture majoritetnih vrat se polotimo na osnovi naslednjega razmisleka. Iz izračunane prehajalne tabele na desnem delu slike 1.5 lahko razberemo, da je težava z napačno izračunano izhodno vrednostjo odvisna od vrstnega reda vrednosti vhodnih spremenljivk. Povedano drugače, do napačnega rezultata (v obeh primerih je to rezultat D) pride le v primerih $AND(1, 0)$ (torej ko je $(S, X_1, X_2) = (A, B, A)$) in $OR(0, 1)$ (ko je $(S, X_1, X_2) = (B, A, B)$), medtem ko je v primerih $AND(0, 1)$ ($(S, X_1, X_2) = (A, A, B)$) in $OR(1, 0)$ ($(S, X_1, X_2) = (B, B, A)$) rezultat pravilen. Omenjeno dejstvo je možno preprosto izkoristiti za pridobitev EQCA strukture, na osnovi katere bi bil izračun tabel željenih logičnih funkcij pravilen.

Rešitev bomo zasnovali na strukturi treh povezanih EQCA majoritetnih funkcij, kot je to predstavljeno na sliki 1.6. V funkcijo Y_{12} bosta vstopali vre-



Slika 1.6: Shema nadgradnje EQCA majoritetnih logičnih vrat.

dnosti prvotnih vhodnih spremenljivk x_1 in x_2 , v funkcijo Y_{21} pa vrednosti istih spremenljivk v zamenjanem vrstnem redu. Omenjeni par majoritetnih funkcij nam bo zaradi simetričnosti izhodov pri večini vhodnih kombinacij vrnil enaki izhodni vrednosti. Iz izračunane prevajalne tabele na sliki 1.5 je namreč razvidno, da veljajo izrazi

$$AND(A, A) = A, AND(B, B) = B, AND(C, C) = C, \quad (1.4)$$

$$AND(C, A) = AND(A, C) = A, \quad (1.5)$$

$$AND(C, B) = AND(B, C) = C, \quad (1.6)$$

$$OR(A, A) = A, OR(B, B) = B, OR(C, C) = C, \quad (1.7)$$

$$OR(C, A) = OR(A, C) = C, \quad (1.8)$$

$$OR(C, B) = AND(B, C) = B. \quad (1.9)$$

Na osnovi predhodnih matematičnih izrazov tako lahko predvidevamo, da bo tretja EQCA majoritetna funkcija Y enake vhode ohranjala tudi na izhodu, kar nam z vidika pravilnosti delovanja celotnega trojčka EQCA majoritetnih funkcij ustreza.

Sedaj moramo preveriti še odziv funkcije Y na preostalih dveh prvotnih problematičnih vhodnih vektorjih ($AND(1, 0)$ in $OR(0, 1)$). V prvem primeru bo tretja majoritetna funkcija na vhod prejela kombinacijo stanj $AND(1, 0) = D$ in $AND(0, 1) = A$ in $OR(1, 0) = B$ in $OR(0, 1) = D$. V tem primeru pričakujemo od funkcije Y , da na izhod posreduje pravilni decizijski vrednosti, ki sta za AND vrata A in OR vrata B . Posplošeno lahko majoritetni funkciji v primeru razlikovanja vrednosti vhodnih spremenljivk pripišemo funkcijo prevajanja vrednosti x , če na vhodu nastopi par vrednosti (x, D) ali (D, x) . Ob temeljitejšem pregledu izračunane prevajalne tabele na sliki 1.5, ugotovimo, da ima takšni karakteristiki prenosa enakih vhodnih vrednosti (ohranjanje paroma vstopajočih enakih vrednosti) in eliminacije vrednosti D v različnih vstopajočih parih (kjer vrednost D nastopa) majoritetna funkcija v tretjem stolpcu z leve, kjer je stikalna vrednost fiksirana na vrednost C . S tem ugotovimo, da mora v strukturi treh majoritetnih vrat funkcijo Y vršiti EQCA majoritetna struktura s fiksnim gonilnikom z vrednostjo C .

Na koncu podajamo še izračunano prevajalno tabelo popravljene majoritetne funkcije Y . Nahaja se na sliki 1.7. Popravljen struktura deluje logično pravilno v domeni Łukasiewiczove trovrednostne logike, je pa z logičnim načinom razširjave postala prostorsko obsežnejša. Problema iskanja ustreznih EQCA majoritetnih logičnih vrat bi se lahko lotili tudi na drugačne načine. Eden od možnih bi bil npr. *popolno preiskovanje prostora* razporeditve EQCA celic, ali *preiskovanje prostora z genetskimi algoritmi*. V delih [4], [5] in [6] najdemo nekaj drugačnih pristopov k reševanju omenjenega problema.

1.3 Sklep

V pričujočem poglavju smo predstavili razširjeno kvantno celico tQCA in delovanje struktur EQCA, ki temeljijo na tQCA celici. Z modelom smo potrdili hipotezo, da povečanje števila kvantnih pik, med katerimi je mogoče tuneliranje, omogoča ne samo dvostanjsko, temveč tudi večstanjsko procesiranje. Za primer realizacije procesiranja v prostoru večstanjske logike smo se naslonili na Łukasiewiczove postulate trivrednostne logike. Z vidika računalništva, ki temelji na procesiranju, prenašanju in pomnjenju, so predstavljene strukture EQCA zmožne ostrega (ang. *crisp*) procesiranja, prenosa in hranjenja podatkov v tristanjanskem okolju.

$S X_1 X_2$	$S X_1 X_2 Y_{10}$	$S X_2 X_1 Y_{10}$	$C Y_{10} Y_{11} Y$	Y
0 0 0	A A A A	A A A A	C A A A	0
0 0 1/2	A A C A	A C A A	C A A A	0
0 0 1	A A B A	A B A D	C A D A	0
0 1/2 0	A C A A	A A C A	C A A A	0
0 1/2 1/2	A C C C	A C C C	C C C C	1/2
0 1/2 1	A C B C	A B C C	C C C C	1/2
0 1 0	A B A D	A A B A	C D A A	0
0 1 1/2	A B C C	A C B C	C C C C	1/2
0 1 1	A B B B	A B B B	C B B B	1
1 0 0	B A A A	B A A A	C A A A	0
1 0 1/2	B A C C	B C A C	C C C C	1/2
1 0 1	B A B D	B B A B	C D B B	1
1 1/2 0	B C A C	B A C C	C C C C	1/2
1 1/2 1/2	B C C C	B C C C	C C C C	1/2
1 1/2 1	B C B B	B B C B	C B B B	1
1 1 0	B B A B	B A B D	C B D B	1
1 1 1/2	B B C B	B C B B	C B B B	1
1 1 1	B B B B	B B B B	C B B B	1

Slika 1.7: Shema izračuna prevajalne funkcije za nadgrajena EQCA majoritetna logična vrata.

Literatura

- [1] L. Borkowski, *Jan Łukasiewicz Selected works*. North-Holland Publishing Company, 1970.
- [2] I. L. Bajec, N. Zimic, and M. Mraz, "Towards the bottom-up concept : extended quantum-dot cellular automata," *Microelectronic engineering*, vol. 83, no. 4/9, 2006.
- [3] I. L. Bajec, N. Zimic, and M. Mraz, "The ternary quantum-dot cell and ternary logic," *Nanotechnology*, vol. 17, no. 8, 2006.
- [4] P. Pečar, "Uporaba adiabatnega pristopa pri realizaciji trojiškega procesiranja na osnovi kvantnih celičnih avtomatov," Master's thesis, Faculty of computer and Information science, University of Ljubljana, 2007.
- [5] P. Pečar, M. Mraz, N. Zimic, and I. L. Bajec, "Solving the ternary quantum-dot cellular automata logic gate problem by means of adiabatic switching," *Japanese journal of applied physics*, vol. 47, no. 6, 2008.
- [6] P. Pečar, A. Ramšak, N. Zimic, M. Mraz, and I. L. Bajec, "Adiabatic pipelining : a key to ternary computing with quantum dots," *Nanotechnology*, vol. 19, no. 49, 2008.