

Uočavanje i ispravljanje pogrešaka

Kvantna računala (SI)

siječanj 2023.

Pogreške

Pogreške pri obradi informacije pojavljuju se u klasičnim i u kvantnim računalima, a kako bi ta računala bila korisna, ona moraju biti opremljena procedurama za uočavanje i ispravljanje pogrešaka.

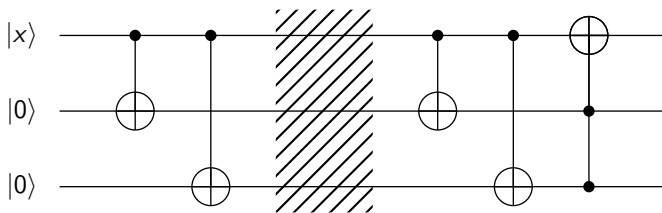
U klasičnom računalu pogreške se najčešće uočavaju korištenjem redundancije. Npr. bit vrijednosti 0 prikazujemo kao 000. Izmjerimo li vrijednost 010 pretpostavljamo da je veća vjerojatnost pogreške na jednom nego na dva bita te u skladu s time ispravljamo vrijednost na 000 (kažemo da poštujemo “glas većine”).

U slučaju kvantnog računala situacija je složenija ponajprije zbog sljedećeg:

- Fizičke realizacije kvantnih bitova znatno su osjetljivije na utjecaj okoline od klasičnih (makroskopskih) bitova.
- Pogreška u sustavu kvantnih bitova (računalu) osim jednostavnih bit-flipova uključuje i promjene faznih odnosa na razini čitavog sustava (računala).
- Unutar sustava kvantnih bitova (računala) ne postoji mogućnost kopiranja informacije (teorem o nemogućnosti kloniranja kvantnog stanja).
- Svako mjerenje stanja kvantnih bitova mijenja stanje sustava (računala).

U nastavku se bavimo skicama najjednostavnijih kvantnih logičkih krugova za ispravljanje pogrešaka.

Primjer: Reverzibilni kod za popravku bit-flipa koji ne koristi kopiranje informacije (redundanciju). Gornji bit u logičkom krugu je podatkovni bit, a donja dva su pomoćni bitovi.



Dogodi li se u iscrtkanom području logičkog kruga na slici pogreška u obliku jednostavnog “bit-flipa” bilo kojeg od tri bita, ovaj kod je automatski popravlja.

Primjer: Kod za uklanjanje jednostavnog bit-flipa korištenjem kodne riječi s 3 kvantna bita

- Stanja $|0\rangle$ i $|1\rangle$ prikazujemo stanjima triju kvantnih bitova,

$$|0_{\ell 3}\rangle = |000\rangle, \quad |1_{\ell 3}\rangle = |111\rangle.$$

- Superpoziciju $|0\rangle$ i $|1\rangle$ prikazujemo s

$$\alpha |0_{\ell 3}\rangle + \beta |1_{\ell 3}\rangle = \alpha |000\rangle + \beta |111\rangle.$$

- Uvodimo par operatora koji djeluju na sva tri kvantna bita,

$$ZZI = Z \otimes Z \otimes I, \quad IZZ = I \otimes Z \otimes Z.$$

- Superpozicije oblika $\alpha |000\rangle + \beta |111\rangle$ svojstvena su stanja operatora ZZI i IZZ sa svojstvenom vrijednošću $+1$.

- Dogodi li se u superpoziciji oblika $\alpha |000\rangle + \beta |111\rangle$ jednostavan bit-flip na prvom kvantnom bitu, djelovanje operatora ZZI i IZZ daje nam:

$$ZZI(\alpha |100\rangle + \beta |011\rangle) = -(\alpha |100\rangle + \beta |011\rangle)$$

$$IZZ(\alpha |100\rangle + \beta |011\rangle) = +(\alpha |100\rangle + \beta |011\rangle)$$

- Bit-flip na drugom kvantnom bitu:

$$ZZI(\alpha |010\rangle + \beta |101\rangle) = -(\alpha |010\rangle + \beta |101\rangle)$$

$$IZZ(\alpha |010\rangle + \beta |101\rangle) = -(\alpha |010\rangle + \beta |101\rangle)$$

- Bit-flip na trećem kvantnom bitu:

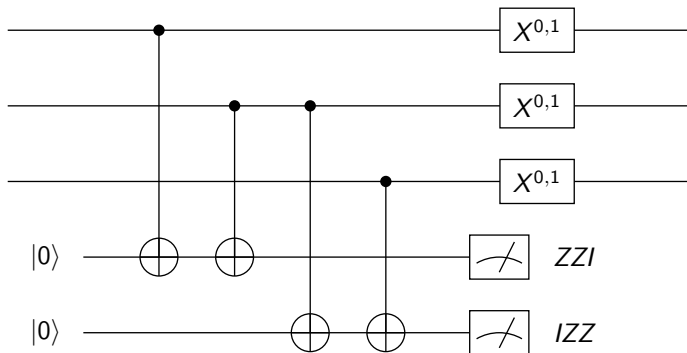
$$ZZI(\alpha |001\rangle + \beta |110\rangle) = +(\alpha |001\rangle + \beta |110\rangle)$$

$$IZZ(\alpha |001\rangle + \beta |110\rangle) = -(\alpha |001\rangle + \beta |110\rangle)$$

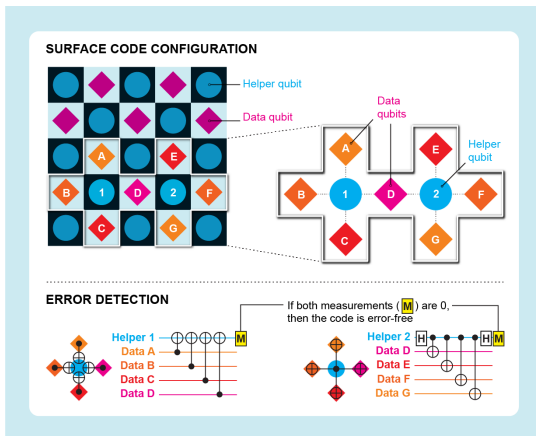
Mjerenjem veličina ZZI i IZZ dobivamo vrijednosti \pm na osnovi kojih zaključujemo je li se dogodio bit-flip ili nije, te ako jest, na kojem od tri kvantna bita se on dogodio. Popravak pogreške provodi se djelovanjem operatora X na kvanti bit na kojem je uočen bit-flip.

- Slučaj $ZZI = IZZ = +1$: bit-flip se nije dogodio
- Slučaj $ZZI = -1, IZZ = +1$: popravak operatorom $X \otimes I \otimes I$
- Slučaj $ZZI = -1, IZZ = -1$: popravak operatorom $I \otimes X \otimes I$
- Slučaj $ZZI = +1, IZZ = -1$: popravak operatorom $I \otimes I \otimes X$

Logički krug:



Primjer: tzv. “površinski kod” na pravokutnoj rešetki



Izvor: *Sci. Am.* Vol. 326, Nr. 5, pp. 23–29 (May 2022)