

Egybites kvantumkapuk összeállítása spin qubitekhez nulla mágneses térben

Bevezetés

A kvantumszámítás új alapokra helyezi az információfeldolgozást, mivel a kvantummechanika elvei lehetővé teszik olyan számítások elvégzését, amelyek a klasszikus számítógépek számára gyakorlatilag megoldhatatlanok. A kvantuminformációt qubitok hordozzák, amelyek képesek egyszerre több állapotban, úgynevezett szuperpozícióban, létezni, és összefonódás révén bonyolult korrelációkat alkotni. Ez az elméleti potenciál ugyanakkor számos gyakorlati akadállyal szembesül, különösen a fizikai megvalósítás terén. Ebben a munkában spin qubitekkel foglalkozom, amelyek egyetlen elektron spinjére épülnek, és kvantumdotban lokalizálódnak.

Spin-alapú Kvantumszámítás

A spin qubitek kvantumdotokban lokalizált elektronok vagy lyukak spinállapotait használják információ tárolására és manipulálására. A két alapvető spinállapot – fel $|\uparrow\rangle$ és le $|\downarrow\rangle$ – alkotja a kvantuminformáció hordozóját. A vezérlésük hagyományosan homogén mágneses teret igényel, amely meghatározza a spinállapotok közötti energiahasadást és lehetővé teszi a rezonáns vezérlést. Vannak olyan, kísérletileg is demonstrált információvesztési folyamatok, amelyek a statikus mágneses tér csökkentésével lecsökkenthetők, így növelve a qubit koherenciaidejét. Ezért kutatásomban egy mágneses tér nélküli megvalósításra fókuszálok, ami megőrzi a spin qubitek vezérelhetőségét.

A spin-pálya kölcsönhatás (SOC) kulcsfontosságú szerepet játszik ebben a megközelítésben, mivel lehetővé teszi, hogy a spinállapotok vezérlését elektromos mezőkkel végezzük. Az SOC segítségével geometriai fázisokat halmozunk fel, amelyek robusztusak bizonyos környezeti zajokkal szemben, így ideálisak logikai kapuk létrehozására.

Holonomikus Kvantumszámítás

A kutatásomban vizsgált módszer a holonomikus kvantumszámítás, amely geometriai fázisokon alapul. Ezek a fázisok zárt hurkok mentén alakulnak ki, és időfüggetlenek, vagyis kevésbé érzékenyek a sebességbeli eltérésekre vagy zajokra. Ez az eljárás különösen robusztus kvantumkapuk létrehozását teszi lehetővé, amelyek stabilok a környezeti zajokkal szemben.

Ha a spin qubitet a félvezetőben egy zárt hurok mentén lassan körbeviszünk, akkor a spin-pálya-kölcsönhatás miatt zérus mágneses térben is megváltozik az állapota. Erre a jelenségre "geometriai fázisként" vagy "nem-Ábeli Berry-fázisként" is szokás hivatkozni. Ezek a fázisok biztosítják a szükséges kvantumlogikai műveleteket mágneses tér alkalmazása nélkül, miközben az elektromos vezérlés minimalizálja a koherenciavesztést.

Shuttling-Alapú Holonomikus Kvantumszámítás

Ezeket a transzformációkat véletlen qubit-forgatásoknak fogjuk fel, mert az őket meghatározó mikroszkopikus mechanizmusokban fontos szerepet játszanak a qubitet definiáló nanoszerkezet véletlen tulajdonságai (kristályhibák, elektródák pontatlan kivitelezése, inhomogén mechanikai feszültségprofil, stb.).

A kutatás során azt vizsgáltam, hogy két random, a kvantumdot hurkok által generált, erőforrás kapupár segítségével mennyire közelíthető meg egy cél kapu, ha az erőforrás kapukat, vagy azok inverzeit, csak véges sokszor (szekvenciahossz) lehet alkalmazni. Az erőforrás kapukat egyenletes eloszlással

generáltam a Haar-mérték szerint, cél kapuknak a Hadamard és az S fázis kapukat választottam. A Bloch-Gömb A dolgozatomban során több matematikai eszközt is használtam. A Bloch-gömb egy geometriai eszköz, amely segít a kvantumállapotok és transzformációk vizualizálásában. A kvantumállapotokat a gömb felületén lévő pontokként ábrázoljuk, míg a kvantumkapuk a Bloch-gömb forgatásaként interpretálhatók

Hűség és Hibák Mérése

A kutatás során a kvantumkapuk pontosságát a hűséggel (fidelity) mértem, amely a kívánt és a tényleges állapot közötti átfedés mértéke. A hibamértéke a hűtlenség ($1 - \text{fidelity}$) volt és ez alapján értékeltem a megközelítések minőségét, és az eredmények alapján elemeztem, hogy milyen szekvenciahosszra van szükség a kívánt pontosság eléréséhez.

Brute Force Keresés Eredményei

Az első módszerem a brute force keresés volt, amely során minden lehetséges kapuszekvenciát amit a 2 erőforrás kapuk és annak inverzeiből létre lehet hozni végig próbáltam 10-es hosszú, hogy meghatározzam a legpontosabb approximációkat a Hadamard- és a fáziskapukhoz. Ez a megközelítés garantálja, hogy adott szekvenciahosszon belül a lehető legjobb eredményt találja meg.

1000 random erőforrás kapupárt vizsgáltam és a sikeres megközelítésnek 0,01 hibaérték alatt számítottam. Az eredmények szerint a brute force módszerrel generált 10 kapus szekvenciák 85%-a 0,01 alatti hibát mutatott, ami 99%-os hűségnek felel meg. Ez azt jelentette, hogy a legtöbb esetben rövidebb szekvenciák is képesek voltak pontos approximációkat adni. A maradék 15%-nál azonban a hibák meghaladták a 0,01-et, amik nem használhatók számítási célokra. Ezek az esetek kiugró eredményeknek számítottak, és alaposabb vizsgálatot igényeltek.

A szekvenciahossz növelésével a hibák exponenciálisan csökkentek. Ez a tendencia azt mutatta, hogy a brute force módszer kísérleti megvalósítások során is alkalmazható lehet.

A Hadamard-kapu approximációja azonban nehezebbnek bizonyult, mint a fáziskapué. A 10 kapus szekvenciák esetében a fáziskapuhoz 96%-ban 0,01 alatti hibát sikerült elérni, míg a Hadamard-kapuknál csak 85%-ban sikerült 0,01 alá szorítani a hibát. Ez a különbség arra utalt, hogy a forgatási szögek nagysága befolyásolta az approximáció hatékonyságát.

Egy másik fontos megfigyelés az volt, hogy bizonyos szekvenciák kiugróan nagy hibákat produkáltak. A kiugró hibák javítására kísérleteket végeztem az erőforráskapuk kis mértékű módosításával. Például a Bloch-gömbön történő apró eltolásokkal próbáltam javítani a közelítést, de ez a módszer csak mérsékelt eredményeket hozott. A hibák javulása általában alig haladta meg az 0,1 értéket, ami arra utalt, hogy ezek a problémák alapvetően a kapuszerkezetekből eredtek, és nem egyszerűen a paraméterek finomhangolásával oldhatók meg.

Solovay-Kitaev Algoritmus Eredményei

A Solovay-Kitaev algoritmus rekurzív módon készít megközelítéseket, ezt a folyamatot részleteztem a dolgozatomban. Ismét lefuttattam 1000 keresést.

A Solovay-Kitaev algoritmus eredményei azt mutatták, hogy a hiba exponenciálisan csökkent a szekvenciahossz növelésével, hasonlóan a brute force módszerhez. Ugyanakkor a kívánt pontosság eléréséhez hosszabb szekvenciákra volt szükség. Azokat a hibaértékeket, melyeket a brute force elért, a Solovay-Kitaev algoritmus közel sem érte el, 0,05 körül végzett a legtöbb keresés, 25-26-os szekvenciahosszal.

Összehasonlítás és Következtetések

A Solovay-Kitaev algoritmus legnagyobb előnye a számítási idő drasztikus csökkenése volt. Míg a brute force keresés átlagosan 15 másodpercet vett igénybe szekvenciaként, a Solovay-Kitaev algoritmus kevesebb mint 0,02 másodperc alatt végzett.

A két módszer eredményeinek összehasonlítása rávilágított a pontosság és a számítási idő közötti kompromisszumokra. A brute force módszer pontosabb volt rövidebb szekvenciák esetén, különösen akkor, ha a célkapu kisebb forgatási szöget igényelt, mint például a fáziskapu. A Hadamard-kapu esetében mindkét módszer nagyobb szekvenciahosszt igényelt, de a brute force gyorsabban érte el a kívánt pontosságot.

Jövőbeli Irányok

Jelenlegi adatok alapján egy kvantumkapu végrehajtása kísérleti eszközökön átlagosan 20-50 nanoszekundumot vesz igénybe, míg a tipikus koherenciaidő elérheti a 10-20 microszekundumot. Ez lehetővé teszi, hogy akár 200-1000- darab, 10 kapuból álló szekvencia is végrehajtható legyen a koherenciaidő korlátain belül, ami különösen ígéretes a fault-tolerant kvantumszámítás számára.

A további kutatások során érdemes megvizsgálni a hibás kapuk okait és azok javítási lehetőségeit, különös tekintettel a geometriai fázisok pontos kontrolljára. Ezen kívül fontos lenne kísérleti eljárásokat javasolni a decoherencia-dinamikák feltérképezésére, például Ramsey-típusú mérésekkel és kvantumállapot-tomográfiával. Ezek az eszközök segíthetnek a spin qubitok viselkedésének jobb megértésében nulla mágneses térben, ahol a rezonáns vezérlés helyett holonomikus kapuk alkalmazhatók.