

Quantum Teleportation

Introduzione

Il teletrasporto quantistico costituisce uno dei protocolli fondamentali dell'informazione quantistica. Questo processo consente la trasmissione di uno stato quantistico arbitrario utilizzando una coppia di particelle entangled e un canale di comunicazione classico.

Il protocollo rappresenta un'applicazione pratica dei principi fondamentali della meccanica quantistica, in particolare dell'entanglement, e fornisce una soluzione al problema della trasmissione di informazione quantistica nel rispetto del teorema del no-cloning. Questo teorema, dimostrato da Wootters e Zurek nel 1982, stabilisce che è impossibile creare una copia esatta di uno stato quantistico arbitrario sconosciuto, ponendo così una sfida fondamentale per la trasmissione di informazione quantistica. Il teletrasporto quantistico supera questa limitazione attraverso l'utilizzo dell'entanglement, permettendo di trasferire lo stato quantistico senza violare il teorema. Usando il protocollo di teletrasporto quantistico, l'informazione quantistica viene distrutta in un punto e una copia esatta viene creata in un altro punto.

In questo lavoro ho implementato il protocollo di teletrasporto quantistico utilizzando IBM Qiskit, concentrandomi su:

- La costruzione del circuito quantistico
- L'analisi delle prestazioni mediante simulazione
- Il confronto tra risultati simulati e quelli ottenuti su dispositivi reali
- L'implementazione di una versione del protocollo con controllo classico

Teoria del Protocollo di Teletrasporto Quantistico

Il protocollo di teletrasporto quantistico può essere descritto attraverso una sequenza di passaggi fondamentali:

1. Creazione della Coppia di Bell

- Alice e Bob creano una coppia di qubit entangled (coppia di Bell)
- Questo viene realizzato applicando una porta Hadamard seguita da una porta CNOT sui loro qubit

2. Operazioni di Alice

- Alice esegue una serie di operazioni quantistiche tra il qubit che contiene lo stato $|\psi\rangle$ da teletrasportare e la sua metà della coppia di Bell

3. Misura e Comunicazione

- Alice effettua la misura di entrambi i suoi qubit:

Il qubit che contiene lo stato $|\psi\rangle$

Il qubit della sua metà della coppia di Bell

- I risultati di queste misure vengono comunicati a Bob tramite un canale di comunicazione classico. È importante sottolineare che il trasferimento di queste informazioni richiede un canale classico, il che implica che il teletrasporto non è più veloce della luce.

4. Operazioni di Bob

- In base ai risultati ricevuti da Alice, Bob applica specifiche operazioni al suo qubit della coppia di Bell

5. Completamento del Teletrasporto

- Al termine di queste operazioni, lo stato $|\psi\rangle$ viene ricreato nel qubit di Bob
- Questo processo non viola il teorema del no-cloning, poiché lo stato originario di Alice viene distrutto durante la misura, garantendo che non esistano copie identiche dello stato quantistico.

Implementazione del Controllo

Esistono due modalità per implementare le operazioni di Bob:

1. Controllo diretto sui qubit

- Le operazioni di Bob sono controllate direttamente dai qubit misurati di Alice
- Questo metodo è più semplice da implementare
- È adatto per dimostrazioni su piccola scala

2. Controllo basato sui risultati classici

- Le operazioni di Bob sono controllate dai risultati classici delle misure di Alice
- Questo metodo è più complesso ma consente il teletrasporto su lunghe distanze
- È l'approccio utilizzato nelle implementazioni pratiche

Implementazione del circuito

L'implementazione del protocollo di teletrasporto quantistico è stata realizzata utilizzando IBM Qiskit, suddividendo il circuito in componenti funzionali distinte. (codice visibile nel notebook jupyter).

- q0: qubit contenente lo stato da teletrasportare
- q1: qubit di Alice della coppia di Bell
- q2: qubit di Bob della coppia di Bell (destinazione)



- Maggiore leggibilità del codice
- Facilità di manutenzione e debugging
- Possibilità di riutilizzo dei componenti
- Chiara separazione delle responsabilità di ogni parte del protocollo

Analisi delle prestazioni

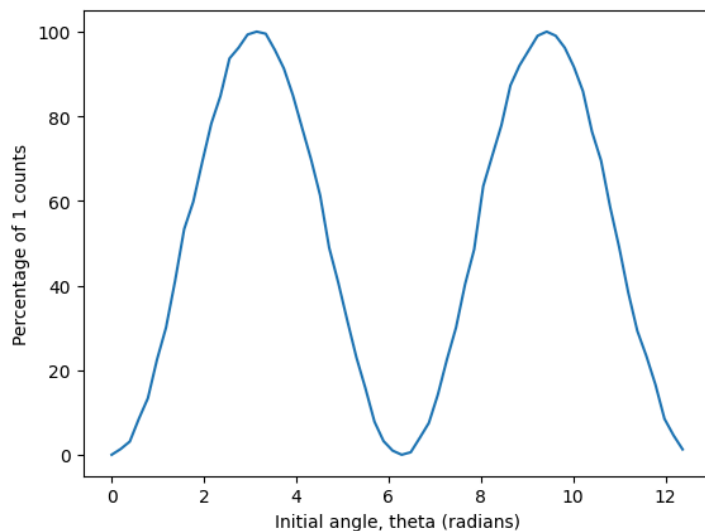
Simulazione Base

Configuration	Quasi-probability
100	0.287
101	0.237
110	0.239
111	0.236

Questa simulazione base ha permesso di verificare il corretto funzionamento del protocollo in condizioni ideali, senza errori quantistici o decoerenza.

Analisi Parametrica

Per comprendere meglio il comportamento del protocollo, è stata condotta un'analisi variando l'angolo θ dello stato iniziale. Questo ci permette di osservare come il protocollo gestisce diversi stati quantistici.

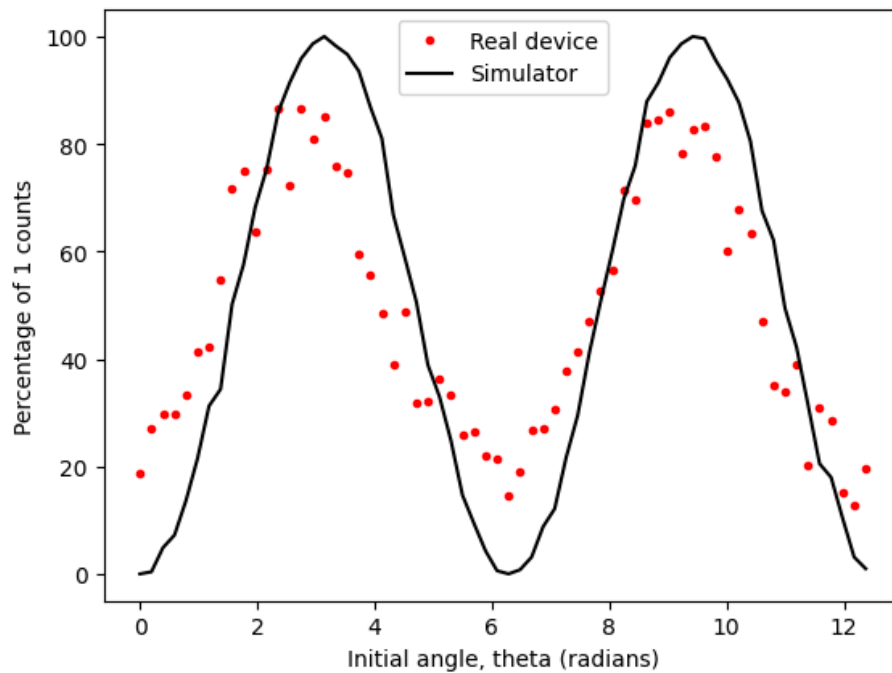


I risultati mostrano un andamento sinusoidale della probabilità di misurare $|1\rangle$ in funzione dell'angolo θ , confermando che:

- Il protocollo preserva l'informazione di fase dello stato quantistico
- L'ampiezza costante indica la conservazione dell'informazione quantistica

Confronto con Hardware Reale

Il confronto tra simulazione e implementazione su hardware reale è cruciale per valutare l'efficacia pratica del protocollo.



L'analisi dei risultati rivela:

1. Differenze tra Simulazione e Hardware:

- La simulazione mostra un comportamento ideale con una curva sinusoidale perfetta
- I risultati hardware mostrano deviazioni dalla curva ideale
- Le differenze sono attribuibili a vari fattori di rumore quantistico

2. Fonti di Errore:

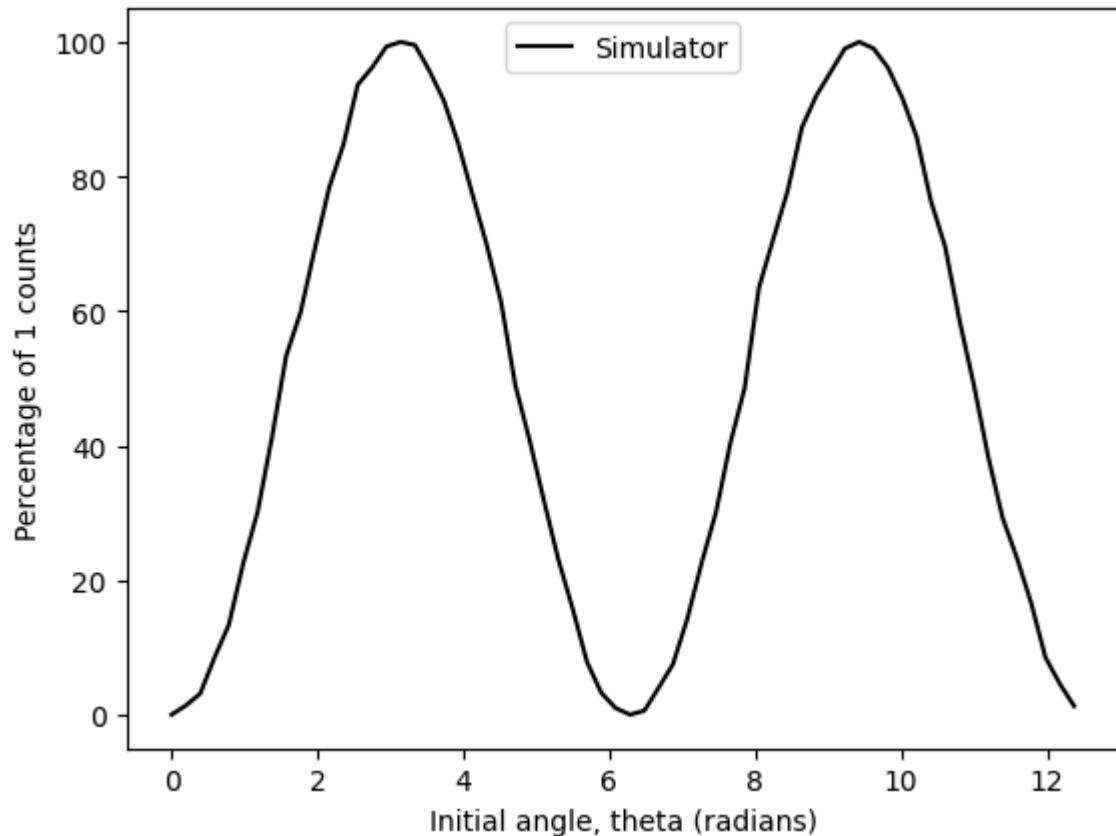
- Decoerenza quantistica
- Errori nelle porte quantistiche
- Imperfezioni nelle misure
- Rumore ambientale

3. Prestazioni Complessive:

- Il protocollo mantiene la sua funzionalità essenziale anche in presenza di rumore
- La fedeltà del teletrasporto diminuisce con la complessità del circuito
- Gli errori si accumulano con l'aumentare della profondità del circuito

Implementazione con Controllo Classico

È stata anche realizzata una versione del protocollo che utilizza il controllo classico per le operazioni di Bob.



Questa implementazione:

- È più realistica per applicazioni pratiche
- Permette il teletrasporto su lunghe distanze
- Mostra prestazioni comparabili alla versione con controllo quantistico
- Richiede comunicazione classica tra Alice e Bob

Applicazioni Future del Teletrasporto Quantistico

Il teletrasporto quantistico apre le porte a potenziali applicazioni rivoluzionarie in diversi campi. Nel settore delle comunicazioni, potrebbe garantire canali ultra-sicuri tra due parti grazie alla crittografia quantistica, poiché qualsiasi tentativo di intercettazione altererebbe lo stato quantistico, rendendo evidente la presenza di un intruso. Questo principio potrebbe essere particolarmente rilevante per la trasmissione di dati sensibili, ad esempio in ambito governativo, bancario e militare, garantendo standard di sicurezza mai raggiunti prima.

Inoltre, il teletrasporto quantistico è fondamentale per lo sviluppo di un Internet quantistico, una rete globale che utilizza qubit per trasmettere informazioni, garantendo maggiore velocità e sicurezza rispetto alle reti tradizionali. Questa rete consentirebbe non solo comunicazioni ultra-sicure, ma anche l'elaborazione distribuita di informazioni, aprendo la strada al calcolo quantistico distribuito. In un tale sistema, computer quantistici separati potrebbero collaborare per risolvere problemi complessi, superando i limiti dei singoli

dispositivi. Inoltre, un Internet quantistico potrebbe favorire applicazioni come la sincronizzazione precisa di orologi quantistici e la condivisione sicura di risorse computazionali.

Un'ulteriore applicazione del teletrasporto quantistico è il suo utilizzo nello sviluppo di sensori altamente sensibili per varie applicazioni, come la rilevazione di onde gravitazionali e altri fattori ambientali. In questo caso, il teletrasporto quantico consente il trasporto di stati quantistici da un luogo all'altro senza esporli a disturbi ambientali, migliorando la precisione e l'affidabilità delle misurazioni. Questi sensori potrebbero trovare applicazione anche in campo medico, per imaging avanzato e diagnosi più accurate, o nell'ambito della ricerca geofisica e climatica.

Infine, il teletrasporto quantistico potrebbe avere implicazioni nella collaborazione scientifica globale. Grazie alla sua capacità di trasferire informazioni quantistiche in modo sicuro e istantaneo, potrebbe facilitare la condivisione di dati tra laboratori remoti e promuovere la cooperazione internazionale su progetti di ricerca avanzati. A lungo termine, il teletrasporto quantistico potrebbe rivoluzionare settori ancora inesplorati, come la biologia quantistica, la navigazione di precisione e le missioni spaziali, aprendo nuovi orizzonti per l'umanità.

Conclusioni

L'implementazione del protocollo di teletrasporto quantistico mediante IBM Qiskit ha consentito di verificarne il funzionamento sia in ambiente simulato che su hardware reale.

L'analisi dei risultati ottenuti tramite simulazione ha mostrato l'andamento sinusoidale atteso, confermando la corretta preservazione dell'informazione quantistica durante il processo di teletrasporto. La successiva verifica su hardware quantistico ha evidenziato come il rumore e la decoerenza influenzano le prestazioni del protocollo, pur mantenendo la funzionalità di base.

L'implementazione della versione con controllo classico ha dimostrato la fattibilità del teletrasporto su lunghe distanze, elemento essenziale per le future applicazioni in reti quantistiche. I risultati ottenuti suggeriscono che il miglioramento dell'hardware quantistico e l'implementazione di tecniche di correzione degli errori più efficaci potrebbero consentire prestazioni sempre più vicine al comportamento ideale del protocollo.