



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0033506
(43) 공개일자 2020년03월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06N 99/00 (2019.01) B82Y 10/00 (2017.01)
(52) CPC특허분류
G06N 10/00 (2019.01)
B82Y 10/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0112848
(22) 출원일자 2018년09월20일
심사청구일자 2018년09월20일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
신현동
경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호(영통동, 벽산삼익아파트)
정영민
경기도 성남시 분당구 양현로 507, 313동 305호(야탑동, 매화마을주공3단지아파트)
파커 자만
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 경희대학교 국제캠퍼스 전자정보관559호
(74) 대리인
김홍석

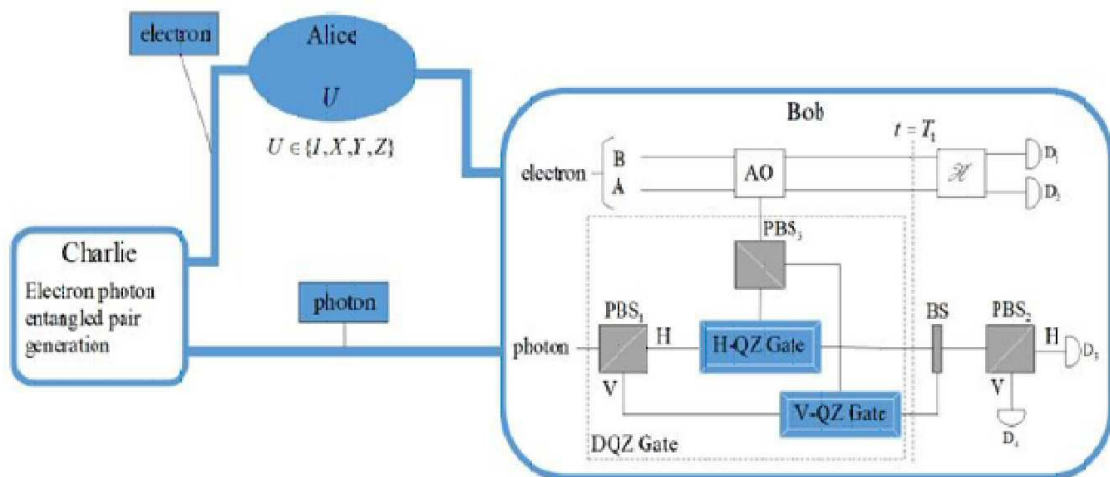
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 양자 집적 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 통신 시스템

(57) 요약

본 발명에 따른 양자 집적코딩을 수행하는 방법이 제공된다. 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고, 전자 및 광자 쌍 (pair of electron and photon) 정보 중 전자 쌍 정보를 수신하는 전자쌍 정보 수신 단계; 및 상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산(unitary operation)을 수행하여, 일반 정보(classical information)를 인코딩하는 유니터리 연산 수행 단계를 포함하고, 이상적인 데이터 레이트에 근접한 높은 데이터 레이트를 갖는 벨-상태 분석에 기반한 양자 집적 코딩 방법을 제공할 수 있다.

대표도 - 도4



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2016R1A2B2014462
 부처명 미래과학창조부
 연구관리전문기관 한국연구재단
 연구사업명 개인연구지원사업(중견연구)
 연구과제명 양자 초업힘을 이용한 하이브리드 양자통신 핵심기술 연구
 기 여 율 4/10
 주관기관 경희대학교 산학협력단
 연구기간 2018.04.01 ~ 2019.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2018R1D1A1B07050584
 부처명 미래과학창조부
 연구관리전문기관 한국연구재단
 연구사업명 이공분야기초연구사업/이공학개인기초연구지원사업
 연구과제명 반사실적 통신 핵심기술 연구
 기 여 율 3/10
 주관기관 경희대학교 산학협력단
 연구기간 2018.06.01 ~ 2019.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 R0190-15-2030
 부처명 미래과학창조부
 연구관리전문기관 정보통신기술진흥센터
 연구사업명 정보통신방송연구개발사업
 연구과제명 비밀성증폭 후처리 기술개발
 기 여 율 3/10
 주관기관 경희대학교 산학협력단
 연구기간 2018.05.01 ~ 2019.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

양자 집적코딩을 수행하는 방법에 있어서, 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고, 전자 및 광자 쌍 (pair of electron and photon) 정보 중 전자 쌍 정보를 수신하는 전자쌍 정보 수신 단계; 및 상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산(unitary operation)을 수행하여, 일반 정보(classical information)을 인코딩하는 유니터리 연산 수행 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는, 양자 집적코딩 수행 방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신 기기인 제2기기로 전송하는 얽힘 입자 정보 전송 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는, 양자 집적코딩 수행 방법.

청구항 3

제1 항에 있어서, 상기 유니터리 연산 수행 단계는, 상기 제1 기기가 송신하고자 하는 일반 비트(classical bits)에 대응하는 I , σ_A^x , σ_A^y 및 σ_A^z 연산자 중 하나를 이용하여,

$$\begin{aligned} 00 &\rightarrow (I_A \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Phi^+\rangle, \\ 01 &\rightarrow (\sigma_A^x \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Psi^+\rangle, \\ 10 &\rightarrow (\sigma_A^z \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Phi^-\rangle, \\ 11 &\rightarrow (\sigma_A^y \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Psi^-\rangle. \end{aligned}$$

에 해당하는 4개의 유니터리 연산 수행하는 것을 특징으로 하는, 양자 집적코딩 수행 방법.

청구항 4

제2 항에 있어서, 상기 유니터리 연산 수행 단계는, 4개의 벨 상태(Bell states)를 구분하기 위해, 얽힘 입자에 하다마드 게이트(Hadamard gate) 연산을 수행하고, 상기 전자 쌍의 경로를 측정하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는, 양자 집적코딩 수행 방법.

청구항 5

제4항에 있어서, 상기 얽힘 입자 정보 전송 단계는, 상기 제1 기기와 수신 기기인 제2 기기 간의 채널을 통해 상기 제2 기기에게 제2 일반 정보(classical information)를 전송하도록 제어하는 단계를 포함하고, 상기 제2 일반 정보는 상기 얽힘 입자에 관한 정보와 상기 전자 쌍의 경로에 관한 정보를 포함하는 것을 특징으로 하는, 양자 집적코딩 수행 방법.

청구항 6

양자 집적코딩을 수행하는 방법에 있어서, 상기 방법은 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되고,
전자 및 광자 쌍(pair of electron and photon) 정보 중 광자 쌍 정보를 수신하는 광자 쌍 정보 수신 단계;
송신 기기인 제1 기기로부터 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신하는 전자 쌍 정보 수신 단계를 포함하고,
상기 얽힘 입자 정보는 상기 제1 기기가 인코딩한 일반 정보(classical information)를 포함하는 것을 특징으로 하는, 양자 집적코딩 수행 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,
이중 양자 제노 게이트(Dual Quantum Zeno Gate)에 기반하여 벨-상태(Bell-state) 분석을 수행하여 상기 일반 정보를 디코딩하는 벨-상태 분석 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는, 양자 집적코딩 수행 방법.

청구항 8

제7 항에 있어서,
상기 벨-상태 분석 단계는,
상기 제2 기기가 4개의 초기 상태(Initial State) $|\Phi^{\pm}\rangle$ 및 $|\Psi^{\pm}\rangle$ 간의 구분을 가능하게 하는 광자 쌍의 편광(polarization)을 분석하고,
상기 $|\Phi^{-}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|0\rangle_A |1\rangle_A$ 이고 상기 편광이 수직(V)인 경우이고, 상기 $|\Phi^{+}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_A |0\rangle_A$ 이고 상기 편광이 수직(V)인 경우이고, 상기 $|\Psi^{-}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|0\rangle_B |1\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우이고, 상기 $|\Psi^{+}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_B |0\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우인 것을 특징으로 하는, 양자 집적코딩 수행 방법.

청구항 9

제7 항에 있어서,
상기 벨-상태 분석 단계에서,
상기 수신된 광자 쌍 정보를 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 수평(H) 성분 및 수직(V) 성분으로 분할하고 상기 수평 성분 및 상기 수직 성분을 각각 H-QZ 게이트와 V-QZ 게이트로 공급하는 것을 특징으로 하는, 양자 집적코딩 수행 방법.

청구항 10

제9 항에 있어서,
상기 벨-상태 분석 단계에서,
상기 H-QZ 게이트 및 상기 V-QZ 게이트 내의 전환 가능한 미러(switchable mirror)를 N 사이클 동안 턴 온하여 상기 광자 쌍을 통과(pass)시키고,
편광 회전기(PR)를 이용하여 $\Theta = \pi / (2N)$ 만큼 편광을 회전시키고,
제2 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 상기 H-QZ 게이트에서는 수평(H) 성분을 통과시키고 상기 V-QZ 게이트에서는 수직(V) 성분을 통과시키는 것을 특징으로 하는, 양자 집적코딩 수행 방법.

청구항 11

양자 집적코딩을 수행하는 송신 기기에 있어서,
전자 및 광자 쌍(pair of electron and photon) 정보 중 전자 쌍 정보를 수신하는 인터페이스부; 및

상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산(unitary operation)을 수행하여, 일반 정보(classical information)을 인코딩하는 제어부를 포함하는 것을 특징으로 하는, 양자 송신 기기.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신 기기인 제2기기로 전송하도록 상기 인터페이스부를 제어하는 것을 특징으로 하는, 양자 송신 기기.

청구항 13

제11 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 제1 기기가 송신하고자 하는 일반 비트(classical bits)에 대응하는 I , σ_A^x , σ_A^y 및 σ_A^z 연산자 중 하나를 이용하여,

$$\begin{aligned} 00 &\rightarrow (I_A \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Phi^+\rangle, \\ 01 &\rightarrow (\sigma_A^X \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Psi^+\rangle, \\ 10 &\rightarrow (\sigma_A^Z \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Phi^-\rangle, \\ 11 &\rightarrow (\sigma_A^Y \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Psi^-\rangle. \end{aligned}$$

에 해당하는 4개의 유니터리 연산 수행하는 것을 특징으로 하는, 양자 송신 기기.

청구항 14

제12 항에 있어서,

상기 제어부는,

4개의 벨 상태(Bell states)를 구분하기 위해, 얽힘 입자에 하다마드 게이트(Hadamard gate) 연산을 수행하고, 상기 전자 쌍의 경로를 측정하는 것을 특징으로 하는, 양자 송신 기기.

청구항 15

제14 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 제1 기기와 수신 기기인 제2 기기 간의 채널을 통해 상기 제2 기기에 제2 일반 정보(classical information)를 전송하도록 제어하고,

상기 제2 일반 정보는 상기 얽힘 입자에 관한 정보와 상기 전자 쌍의 경로에 관한 정보를 포함하는 것을 특징으로 하는, 양자 송신 기기.

청구항 16

양자 집적코딩을 수행하는 수신 기기에 있어서,

전자 및 광자 쌍(pair of electron and photon) 정보 중 광자 쌍 정보를 수신하는 인터페이스부; 및

송신 기기인 제1 기기로부터 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신하도록 상기 인터페이스부를 제어하는 제어부를 포함하고,

상기 얽힘 입자 정보는 상기 제1 기기가 인코딩한 일반 정보(classical information)를 포함하는 것을 특징으로 하는, 양자 수신 기기.

청구항 17

제16 항에 있어서,

상기 제어부는,

이중 양자 제노 게이트(Dual Quantum Zeno Gate)에 기반하여 벨-상태(Bell-state) 분석을 수행하여 상기 일반 정보를 디코딩하는 것을 특징으로 하는, 양자 수신 기기.

청구항 18

제17 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 제2 기기가 4개의 초기 상태(Initial State) $|\Phi^{\pm}\rangle$ 및 $|\Psi^{\pm}\rangle$ 간의 구분을 가능하게 하는 광자 쌍의 편광(polarization)을 분석하고,

상기 $|\Phi^{\pm}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|0\rangle_A |1\rangle_A$ 이고 상기 편광이 수직(V)인 경우이고, 상기 $|\Phi^{\pm}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_A |0\rangle_A$ 이고 상기 편광이 수직(V)인 경우이고, 상기 $|\Psi^{\pm}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|0\rangle_B |1\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우이고, 상기 $|\Psi^{\pm}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_B |0\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우인 것을 특징으로 하는, 양자 수신 기기.

청구항 19

제17 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 수신된 광자 쌍 정보를 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 수평(H) 성분 및 수직(V) 성분으로 분할하고 상기 수평 성분 및 상기 수직 성분을 각각 H-QZ 게이트와 V-QZ 게이트로 공급하는 것을 특징으로 하는, 양자 수신 기기.

청구항 20

제19 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 H-QZ 게이트 및 상기 V-QZ 게이트 내의 전환 가능한 미러(switchable mirror)를 N 사이클 동안 턴 온하여 상기 광자 쌍을 통과(pass)시키고,

편광 회전기(PR)를 이용하여 $\Theta = \pi / (2N)$ 만큼 편광을 회전시키고,

제2 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 상기 H-QZ 게이트에서는 수평(H) 성분을 통과시키고 상기 V-QZ 게이트에서는 수직(V) 성분을 통과시키는 것을 특징으로 하는, 양자 수신 기기.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 양자 집적 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 통신 시스템에 관한 것이다. 보다 상세하게는, 이중 양자 제노 효과(Dual Quantum Zeno effect)를 이용한 양자 집적코딩 방법 및 이를 이용한 양자 통신 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 양자 통신 기술은 클라우드 컴퓨팅, 5G 통신, 사물 인터넷에서 양자 역학의 특성을 이용하여 다양한 정보 처리에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 양자 상관(quantum correlation), 예컨대 양자 얽힘(quantum

entanglement) 및 불일치(discord)는 초 압축 코딩, 양자 텔레포테이션 및 양자 암호화와 같은 다양한 잠재적인 응용에 있어 중요하게 활용 가능하다.

[0003] 한편, 양자 집적 코딩(Quantum superdense coding)은 주요한 양자 정보 처리 태스크로, 2-비트 일반 정보는 초기 공유 얽힘(initially shared entanglement)을 이용하는 2개의 공간적으로 이격된 대상 간에 전달될 수 있다. 일반적으로, 일방은 n 개의 공유된 $2n$ -GHz 상태에 의해 n 개의 큐비트를 전송하여 $2n$ 비트의 일반 비트를 전송할 수 있다. 따라서, 이미 공유된 최대 얽힘 상태는 채널의 일반 용량을 2배로 할 수 있다. 하지만, 양자 집적 코딩의 장점을 최대화하기 위해, 최대 얽힘 상태의 $2n$ 개의 다자(partite) 간 구분을 할 필요가 있다.

[0004] 이와 같이 양자 집적 코딩을 위해서 최대 얽힘 상태에서도 다자 간 구분 및 다분 시스템의 구분이 필요하다. 하지만, 이러한 양자 집적 코딩을 위한 기존의 양자 상태 분석 방법은 최대 얽힘 상태에서 완전한 상태 분석이 어렵다는 문제점이 있었다. 따라서, 다자 간 구분 및 다분 시스템의 구분이 필요한 경우에 양자 상태의 완전한 분석이 이루어지지 않아, 이론적인 최대 전송 레이트 보다 실제 전송 레이트가 크게 감소하는 문제점이 있었다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 따라서, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 양자 집적 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 시스템을 제공하는 것을 목표로 한다.

[0006] 또한, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 높은 데이터 레이트를 갖는 양자 집적 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 시스템을 제공하는 것을 목표로 한다.

과제의 해결 수단

[0007] 상기와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명에 따른 양자 집적코딩을 수행하는 방법이 제공된다. 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고, 전자 및 광자 쌍(pair of electron and photon) 정보 중 전자 쌍 정보를 수신하는 전자쌍 정보 수신 단계; 및 상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산(unitary operation)을 수행하여, 일반 정보(classical information)를 인코딩하는 유니터리 연산 수행 단계를 포함하고, 이상적인 데이터 레이트에 근접한 높은 데이터 레이트를 갖는 벨-상태 분석에 기반한 양자 집적 코딩 방법을 제공할 수 있다.

[0008] 일 실시 예에서, 상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신 기기인 제2기기로 전송할 수 있다.

[0009] 일 실시 예에서, 상기 유니터리 연산 수행 단계는, 상기 제1 기기가 송신하고자 하는 일반 비트(classical bits)에 대응하는 I , σ_A^x , σ_A^y 및 σ_A^z 연산자 중 하나를 이용하여, 수학적 7에 해당하는 4개의 유니터리 연산 수행하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0010] 일 실시 예에서, 상기 유니터리 연산 수행 단계는, 4개의 벨 상태(Bell states)를 구분하기 위해, 얽힘 입자에 하다마드 게이트(Hadamard gate) 연산을 수행하고, 상기 전자 쌍의 경로를 측정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0011] 일 실시 예에서, 상기 얽힘 입자 정보 전송 단계는, 상기 제1 기기와 수신 기기인 제2 기기 간의 채널을 통해 상기 제2 기기에게 제2 일반 정보(classical information)를 전송하도록 제어할 수 있다. 이때, 상기 제2 일반 정보는 상기 얽힘 입자에 관한 정보와 상기 전자 쌍의 경로에 관한 정보를 포함할 수 있다.

[0012] 본 발명의 다른 측면에 따른 양자 집적코딩을 수행하는 방법이 제공된다. 상기 방법은 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되고, 전자 및 광자 쌍(pair of electron and photon) 정보 중 광자 쌍 정보를 수신하는 광자 쌍 정보 수신 단계; 및 송신 기기인 제1 기기로부터 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신하는 전자 쌍 정보 수신 단계를 포함한다. 한편, 상기 얽힘 입자 정보는 상기 제1 기기가 인코딩한 일반 정보(classical information)를 포함한다.

[0013] 일 실시 예에서, 이중 양자 제노 게이트(Dual Quantum Zeno Gate)에 기반하여 벨-상태(Bell-state) 분석을 수행하여 상기 일반 정보를 디코딩하는 벨-상태 분석 단계를 더 포함할 수 있다.

[0014] 일 실시 예에서, 상기 벨-상태 분석 단계는, 상기 제2 기기가 4개의 초기 상태(Initial State) $|\Phi^{\pm}\rangle$ 및 $|\Psi^{\pm}\rangle$ 간의 구분을 가능하게 하는 광자 쌍의 편광(polarization)을 분석할 수 있다. 이때, 상기 $|\Phi^{\pm}\rangle$ 는 상기 전자 쌍

상태가 $|0\rangle_A |1\rangle_A$ 이고 상기 편광이 수직(V)인 경우이고, 상기 $|\Phi^+\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_A |0\rangle_A$ 이고 상기 편광이 수직(V)인 경우이고, 상기 $|\Psi^-\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|0\rangle_B |1\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우이고, 상기 $|\Psi^+\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_B |0\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우인 것을 특징으로 한다.

- [0015] 일 실시 예에서, 상기 벨-상태 분석 단계에서, 상기 수신된 광자 쌍 정보를 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 수평(H) 성분 및 수직(V) 성분으로 분할하고 상기 수평 성분 및 상기 수직 성분을 각각 H-QZ 게이트와 V-QZ 게이트로 공급하는 것을 특징으로 한다.
- [0016] 일 실시 예에서, 상기 벨-상태 분석 단계에서, 상기 H-QZ 게이트 및 상기 V-QZ 게이트 내의 전환 가능한 미러(switchable mirror)를 N 사이클 동안 턴 온하여 상기 광자 쌍을 통과(pass)시키고, 편광 회전기(PR)를 이용하여 $\Theta = \pi/(2N)$ 만큼 편광을 회전시키고, 제2 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 상기 H-QZ 게이트에서는 수평(H) 성분을 통과시키고 상기 V-QZ 게이트에서는 수직(V) 성분을 통과시키는 것을 특징으로 한다.
- [0017] 본 발명의 또 다른 측면에 따른, 양자 집적코딩을 수행하는 양자 송신 기기가 제공된다. 상기 양자 송신 기기는, 전자 및 광자 쌍(pair of electron and photon) 정보 중 전자 쌍 정보를 수신하는 인터페이스부; 및 상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산(unitary operation)을 수행하여, 일반 정보(classical information)을 인코딩하는 제어부를 포함한다.
- [0018] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신 기기인 제2기기로 전송하도록 상기 인터페이스부를 제어할 수 있다.
- [0019] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 제1 기기가 송신하고자 하는 일반 비트(classical bits)에 대응하는 I , σ_A^x , σ_A^y 및 σ_A^z 연산자 중 하나를 이용하여, 수학적 7에 해당하는 4개의 유니터리 연산 수행하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0020] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 4개의 벨 상태(Bell states)를 구분하기 위해, 얽힘 입자에 하다마드 게이트(Hadamard gate) 연산을 수행하고, 상기 전자 쌍의 경로를 측정하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0021] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 제1 기기와 수신 기기인 제2 기기 간의 채널을 통해 상기 제2 기기에 제2 일반 정보(classical information)를 전송하도록 제어할 수 있다. 이때, 상기 제2 일반 정보는 상기 얽힘 입자에 관한 정보와 상기 전자 쌍의 경로에 관한 정보를 포함할 수 있다.
- [0022] 본 발명의 또 다른 측면에 따른 양자 집적코딩을 수행하는 양자 수신 기기가 제공된다. 상기 양자 수신 기기는, 전자 및 광자 쌍(pair of electron and photon) 정보 중 광자 쌍 정보를 수신하는 인터페이스부; 및 송신 기기인 제1 기기로부터 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신하도록 상기 인터페이스부를 제어하는 제어부를 포함한다. 한편, 상기 얽힘 입자 정보는 상기 제1 기기가 인코딩한 일반 정보(classical information)를 포함한다.
- [0023] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 이중 양자 제노 게이트(Dual Quantum Zeno Gate)에 기반하여 벨-상태(Bell-state) 분석을 수행하여 상기 일반 정보를 디코딩하는 것을 특징으로 한다.
- [0024] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 제2 기기가 4개의 초기 상태(Initial State) $|\Phi^+\rangle$ 및 $|\Psi^+\rangle$ 간의 구분을 가능하게 하는 광자 쌍의 편광(polarization)을 분석할 수 있다. 이때, 상기 $|\Phi^-\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|0\rangle_A |1\rangle_A$ 이고 상기 편광이 수직(V)인 경우이고, 상기 $|\Phi^+\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_A |0\rangle_A$ 이고 상기 편광이 수직(V)인 경우이고, 상기 $|\Psi^-\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|0\rangle_B |1\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우이고, 상기 $|\Psi^+\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_B |0\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우인 것을 특징으로 한다.
- [0025] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 수신된 광자 쌍 정보를 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 수평(H) 성분 및 수직(V) 성분으로 분할하고 상기 수평 성분 및 상기 수직 성분을 각각 H-QZ 게이트와 V-QZ 게이트로 공급하는 것을 특징으로 한다.
- [0026] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 H-QZ 게이트 및 상기 V-QZ 게이트 내의 전환 가능한 미러(switchable mirror)를 N 사이클 동안 턴 온하여 상기 광자 쌍을 통과(pass)시키고, 편광 회전기(PR)를 이용하여 $\Theta = \pi/(2$

N)만큼 편광을 회전시키고, 제2 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 상기 H-QZ 게이트에서는 수평 (H) 성분을 통과시키고 상기 V-QZ 게이트에서는 수직(V) 성분을 통과시키는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0027] 본 발명의 적어도 일 실시예에 따르면, 벨-상태 분석에 기반한 양자 집적 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 시스템을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

[0028] 또한, 본 발명의 적어도 일 실시예에 따르면, 이상적인 데이터 레이트에 근접한 높은 데이터 레이트를 갖는 양자 집적 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 시스템을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0029] 도 1은 본 발명에 따른 이중 양자 제노 효과를 이용한 집적코딩 방법을 수행하는 양자 시스템을 도시한다.

도 2는 본 발명에 따른 양자 기기의 상세 구성을 도시한다.

도 3은 인터랙션-프리 측정의 구성을 나타낸 개념도이다.

도 4는 본 발명에 따른 다수의 양자 기기 간에 이중 양자 제노(Dual Quantum Zeno) 고집적 코딩의 개념을 나타낸 구성도이다.

도 5는 본 발명에 따른 H(V)-QZ 게이트의 마이켈슨 버전의 구성도를 나타낸다.

도 6은 본 발명에 따른 DQZ 게이트에 기반하여 수행되는 벨-상태 분석에 대하여 사이클의 수 N의 함수로서 데이터 레이트 R_b 를 나타낸다.

도 7은 본 발명에 따른 반-대응적 사실 벨-상태 분석을 위한 구성도를 나타낸다.

도 8은 본 발명에 따른 송신 기기인 제1 기기에서의 양자 집적코딩을 수행하는 방법의 흐름도를 나타낸다.

도 9는 본 발명에 따른 수신 기기인 제2 기기에서의 양자 집적코딩을 수행하는 방법의 흐름도를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0030] 상술한 본 발명의 특징 및 효과는 첨부된 도면과 관련한 다음의 상세한 설명을 통하여 보다 분명해 질 것이며, 그에 따라 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 본 발명의 기술적 사상을 용이하게 실시할 수 있을 것이다. 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있는바, 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 본문에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 개시형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예들을 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다.

[0031] 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용한다.

[0032] 제1, 제2등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다.

[0033] 예를 들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다. "및/또는"이라는 용어는 복수의 관련된 기재된 항목들의 조합 또는 복수의 관련된 기재된 항목들 중의 어느 항목을 포함한다.

[0034] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미가 있다.

[0035] 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않아야 한다.

[0036] 이하의 설명에서 사용되는 구성요소에 대한 접미사 "모듈", "블록" 및 "부"는 명세서 작성의 용이함만이 고려되

어 부여되거나 혼용되는 것으로서, 그 자체로 서로 구별되는 의미 또는 역할을 갖는 것은 아니다.

- [0037] 이하, 본 발명의 바람직한 실시 예를 첨부한 도면을 참조하여 당해 분야에 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 설명한다. 하기에서 본 발명의 실시 예를 설명함에 있어, 관련된 공지 기능 또는 공지의 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략한다.
- [0038] 이하, 본 발명에 따른 이중 양자 채널 효과를 이용한 집적코딩 방법 및 양자 통신 시스템에 대해 살펴보기로 하자.
- [0039] 이와 관련하여, 도 1은 본 발명에 따른 이중 양자 채널 효과를 이용한 집적코딩 방법을 수행하는 양자 시스템을 도시한다. 도 1에 도시된 바와 같이, 양자 시스템은 복수의 서브 시스템을 포함하고, 편의상 제1 서브 시스템(100)과 제2 서브 시스템(200)이 포함된 것으로 표현할 수 있다. 하지만, 상기 제1 및 제2 서브 시스템(100, 200)에만 한정되는 것이 아니라, 임의의 개수의 서브 시스템 간에도 적용될 수 있다. 한편, 상기 제1 내지 제3 서브 시스템(100, 200, 300)은 임의의 양자 기기일 수 있다. 이와 관련하여, 제1 및 제2 서브 시스템(100, 200)은 각각 송신 기기인 제1(양자) 기기와 수신 기기인 제2(양자) 기기일 수 있다. 한편, 상기 제1(양자) 기기(100)와 제2(양자) 기기(200)는 어느 한 기기가 송신 기기이면 나머지 기기는 수신 기기일 수 있다. 한편, 상기 제1(양자) 기기(100)가 복수의 제2(양자) 기기(200)들을 제어하는 제어국(또는 기지국, 서버)인 경우도 포함된다.
- [0040] 한편, 제3 서브 시스템(300)은 양자 통신의 양 당사자가 아닌 제3자에 해당하는 제3(양자) 기기이다. 또한, 제3(양자) 기기(300)가 제1(양자) 기기(100)와 제2(양자) 기기(200) 간의 양자 통신을 매개 및/또는 제어하는 제어국(또는 기지국, 서버)인 경우도 포함된다. 대안적으로, 제1(양자) 기기(100)와 제2(양자) 기기(200) 중 어느 하나가 제3(양자) 기기(300)의 역할을 수행하는 것도 가능하다.
- [0041] 도 2는 본 발명에 따른 양자 기기의 상세 구성을 도시한다. 편의상, 송신 기기를 제1 기기(100)로, 그리고 수신 기기를 제2 기기(200)로 지칭할 수 있다. 하지만, 이에 한정되는 것은 아니고, 전송된 바와 같이 그 역도 성립하고, 또한 송신/수신 기기로 동시에 동작할 수 있다. 한편, 제3 기기(300)는 제1 기기(100)와 제2 기기(200) 간의 양자 통신을 매개 및/또는 제어하는 기기일 수 있다.
- [0042] 제1 기기(100)는 제어부(110), 인터페이스부(120) 및 메모리(130)를 포함한다. 마찬가지로, 제2 기기(200)도 제어부(210), 인터페이스부(220) 및 메모리(230)를 포함한다. 여기서, 인터페이스부(120, 220)는 양자 채널을 통해 양자 데이터를 송수신하므로 양자 인터페이스부라고 지칭될 수 있다. 또한, 인터페이스부(120, 220)는 일부 제어 데이터 또는 관련된 정보를 일반 채널(classical channel)을 통해 송수신할 수 있으므로, 일반 인터페이스부로도 지칭될 수 있다. 즉, 인터페이스부(120, 220)는 물리적으로 구분된 양자 인터페이스부와 일반 인터페이스부를 구비하거나, 또는 논리적으로 구분된 양자 인터페이스부와 일반 인터페이스부를 구비할 수 있다.
- [0043] 도 2를 참조하여, 본 발명에 따른 양자 집적코딩을 수행하는 송신 기기(제1 기기, 100)의 구체적인 동작에 대해 살펴보면 다음과 같다. 인터페이스부(120)는 전자 및 광자 쌍(pair of electron and photon) 정보 중 전자 쌍 정보를 제3 기기(300)로부터 수신한다. 한편, 제어부(110)는 상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산(unitary operation)을 수행하도록 구성된다. 이러한 유니터리 연산에 따라, 일반 정보(classical information)를 인코딩하도록 구성된다. 한편, 메모리(130)는 양자 정보 및/또는 일반 정보를 저장하도록 구성된다.
- [0044] 한편, 제어부(110)는 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신 기기인 제2기기(200)로 전송하도록 인터페이스부(120)를 제어할 수 있다.
- [0045] 한편, 제어부(110)는 제1 기기(100)가 송신하고자 하는 일반 비트(classical bits)에 대응하는 I , σ_A^x , σ_A^y 및 σ_A^z 연산자 중 하나를 이용하여, 4개의 유니터리 연산을 수행할 수 있다.
- [0046] 한편, 제어부(110)는 4개의 벨 상태(Bell states)를 구분하기 위해, 얽힘 입자에 하다마드 게이트(Hadamard gate) 연산을 수행하고, 상기 전자 쌍의 경로를 측정할 수 있다.
- [0047] 한편, 제어부(110)는 제1 기기(100)와 수신 기기인 제2 기기(200) 간의 채널을 통해 상기 제2 기기에게 제2 일반 정보(classical information)를 전송하도록 제어할 수 있다. 이때, 제2 일반 정보는 상기 얽힘 입자에 관한 정보와 상기 전자 쌍의 경로에 관한 정보를 포함할 수 있다.

- [0048] 다음으로, 수신 기기인 제2 기기(200)의 동작에 대해 상세하게 살펴보면 다음과 같다. 인터페이스부(220)는 전자 및 광자 쌍(pair of electron and photon) 정보 중 광자 쌍 정보를 제3 기기(300)로부터 수신한다. 한편, 제어부(210)는 송신 기기인 제1 기기(100)로부터 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신하도록 인터페이스부(220)를 제어한다. 한편, 메모리(130)는 양자 정보 및/또는 일반 정보를 저장하도록 구성된다.
- [0049] 한편, 제어부(210)는 이중 양자 제노 게이트(Dual Quantum Zeno Gate)에 기반하여 벨-상태(Bell-state) 분석을 수행하여 일반 정보를 디코딩할 수 있다.
- [0050] 한편, 제어부(210)는 제2 기기(200)가 4개의 초기 상태(Initial State) $|\Phi^{\pm}\rangle$ 및 $|\Psi^{\pm}\rangle$ 간의 구분을 가능하게 하는 광자 쌍의 편광(polarization)을 분석할 수 있다. 이와 관련하여, 상기 $|\Phi^{\pm}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|0\rangle_A |1\rangle_A$ 이고 상기 편광이 수직(V)인 경우이고, 상기 $|\Phi^{\pm}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_A |0\rangle_A$ 이고 상기 편광이 수직(V)인 경우이다. 또한, 상기 $|\Psi^{\pm}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|0\rangle_B |1\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우이고, 상기 $|\Psi^{\pm}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_B |0\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우에 해당한다.
- [0051] 한편, 제어부(210)는 수신된 광자 쌍 정보를 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 수평(H) 성분 및 수직(V) 성분으로 분할하고 상기 수평 성분 및 상기 수직 성분을 각각 H-QZ 게이트와 V-QZ 게이트로 공급할 수 있다.
- [0052] 한편, 제어부(210)는 H-QZ 게이트 및 V-QZ 게이트 내의 전환 가능한 미러(switchable mirror)를 N 사이클 동안 턴 온하여 상기 광자 쌍을 통과(pass)시킬 수 있다. 또한, 제어부(210)는 편광 회전기(PR)를 이용하여 $\theta = \pi/(2N)$ 만큼 편광을 회전시킬 수 있다. 또한, 제어부(210)는 제2 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 상기 H-QZ 게이트에서는 수평(H) 성분을 통과시키고 상기 V-QZ 게이트에서는 수직(V) 성분을 통과시킬 수 있다.
- [0053] 이상에서는, 본 발명에 따른 양자 집적코딩을 수행하는 송신 기기와 수신 기기의 주요 동작에 대해 살펴보았다. 이하에서는, 본 발명에 따른 양자 집적코딩을 수행하는 방법 및 이를 이용하는 양자 시스템과 관련하여, 구체적인 동작원리에 대해 살펴보기로 한다.
- [0054] 한편, 본 발명과 관련하여 인터랙션-프리 측정(IFM: interaction free measurement)에 대해 살펴보면 다음과 같다. 기본적인 아이디어는 상호 간에 인터랙션 없이 흡수체(absorptive object)의 존재 여부를 추론하는 것이다. 이와 관련하여, 도 3은 인터랙션-프리 측정의 구성을 나타낸 개념도이다. 여기서, BS는 불균형 빔 스플리터(unbalanced beam splitter)를 나타낸다. 경로 b에서 흡수체의 존재 여부는 N 사이클 이후의 광자(photon)의 상태를 정의한다. 흡수체가 존재하지 않는 경우, 광자는 경로 b에서 소멸될 것이다. 흡수체가 존재하는 경우, 광자는 경로 a에서 소멸될 것이다.
- [0055] 한편, 도 3과 같이 N개의 불균형 빔 스플리터 BS로 구성된 간섭계(interferometer)를 고려할 수 있다. 이때, 상부 경로를 경로 b로 하부 경로를 경로 a로 표시할 수 있다. 한편, 도 3의 불균형 빔 스플리터(BS)는 아래의 수학적 식 1과 같이 동작할 수 있다.

수학적 식 1

$$\begin{aligned} |1\rangle_a |0\rangle_b &\rightarrow \cos \theta |1\rangle_a |0\rangle_b + \sin \theta |0\rangle_a |1\rangle_b \\ |0\rangle_a |1\rangle_b &\rightarrow \cos \theta |0\rangle_a |1\rangle_b - \sin \theta |1\rangle_a |0\rangle_b \end{aligned}$$

[0056]

- [0057] 여기서, $\theta = \pi/(2N)$ 이고, $|1\rangle_a |0\rangle_b$ 는 광자가 경로 a에 있는 상태이고, $|0\rangle_a |1\rangle_b$ 는 광자가 경로 b에 있는 상태이다. 본 발명의 일 실시예에서는 초기 상태가 $|1\rangle_a |0\rangle_b$ 임을 고려한다. 경로 b에서 흡수체가 없다면, n(< N) 사이클 이후에 광자의 상태는 아래의 수학적 식 2에 의해 표현될 수 있다.

수학식 2

[0058]

$$|1\rangle_a |0\rangle_b \rightarrow \cos n\theta |1\rangle_a |0\rangle_b + \sin n\theta |0\rangle_a |1\rangle_b$$

[0059]

수학식 2를 참조하면, 광자는 N 사이클 이후에 결국 상태 $|0\rangle_a |1\rangle_b$ 가 될 것이다. 흡수체가 존재하는 경우, $n(< N)$ 사이클 이후의 광자의 상태는 아래의 수학식 3에 의해 표현될 것이다.

수학식 3

[0060]

$$|1\rangle_a |0\rangle_b \rightarrow \cos^{(n-1)} \theta (\cos \theta |1\rangle_a |0\rangle_b + \sin \theta |0\rangle_a |1\rangle_b)$$

[0061]

N 사이클 이후, 광자가 흡수체에 의해 흡수되지 않을 한, 광자는 결국 상태 $|1\rangle_a |0\rangle_b$ 가 될 것이다. 이상의 논의를 통해, 흡수체가 존재하면 광자는 1의 확률로 결국 상태 $|0\rangle_a |1\rangle_b$ 가 될 것이라고 결론내릴 수 있다. 흡수체가 존재하는 경우, 광자가 흡수체에 의해 흡수되지 않을 확률은 $\cos^{2N} \theta$ 이고, 기존 광자는 결국 상태 $|1\rangle_a |0\rangle_b$ 가 될 것이다.

[0062]

일반성을 유지하면서, Alice (제1 기기)와 Bob (제2 기기)는 이분 최대 얽힘 상태(bipartite maximally entangled state)를 공유한다. 여기서 Alice는 양자 고집적 코딩(quantum superdense coding)을 이용하여 Bob에게 일반 메시지(classical message)를 전송하고자 한다.

[0063]

본 발명에서 균일 분포의 일반 비트, 즉 00,01,10,11를 고려하는 경우, 양자 고집적 코딩에 대한 데이터 레이트는 2-큐비트 IFM Bell-상태 분석기를 이용하여, 아래의 수학식 4에 의해 표현될 것이다.

수학식 4

[0064]

$$R_1 = \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta\right)^{3N} + \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta\right)^N$$

[0065]

이후, QZ 게이트와 보조(ancillary) 광자가 제시된다. 본 발명에서는 양자 흡수체로 타겟 비트와 제어 비트를 모두 고려한다. 4개의 벨-상태 간의 구분을 위해, 보조 광자는 흡수체에 의해 흡수되지 않을 필요가 있다. 보조 광자가 흡수체에 의해 흡수되지 않을 확률 P와 양자 고집적 코딩에 대한 데이터 레이트 R_2 는 아래의 수학식 5와 6과 같이 표현된다.

수학식 5

[0066]

$$P = \left(1 - \frac{3}{4} \sin^2 \phi\right)^N$$

수학식 6

[0067]

$$R_2 = 2 \times P,$$

[0068] 여기서, $\varphi = \pi/N$ 이고 $N > 1$ 이다. 그러나 QZ 게이트에 기반한 벨-상태 분석은 자원 효율의 향상을 위해 양자 고집적 코딩에 대한 데이터 레이트를 희생시킬 수 있다. 본 발명에서는, 다중 2-큐비트 IFM 게이트를 사용하는 대신에 단지 하나의 DQZ 게이트를 사용하여 양자 고집적 코딩에 대한 데이터 레이트를 향상시킨다. 이러한 DQZ 게이트의 사용은 공간적으로 이격된 대상들 간에 반-대응적 사실 방식(semi-counterfactual way)으로 벨-상태 분석을 수행하는 것을 가능하게 한다.

[0069] 도 4는 본 발명에 따른 다수의 양자 기기 간에 이중 양자 제노(Dual Quantum Zeno) 고집적 코딩의 개념을 나타낸 구성도이다. 여기서, X, Y, 및 Z는 각각 파울리 연산자(Pauli operators) σ^x , σ^y , 및 σ^z 를 나타낸다. A0는 흡수체를 나타내고, H 및 V는 광자의 수직 및 수평 편광을 나타낸다. 초기에, Alice 및 Bob은 전자 및 광자의 얽힘 쌍을 수신한다. Alice는 얽힌 입자에 관한 4개의 유니터리 연산 중 하나를 수행하게 되고, 2비트의 일반 정보(classical information)를 인코딩한다. Alice는 Bob에게 얽힌 입자를 전송하고, Bob은 완전한 벨-상태 분석을 수행한다. Bob은 편광 빔 스플리터(PBS1)를 향해 광자를 전송하여 H 및 V 성분을 분리하고 이들을 대응하는 QZ 게이트로 제공한다.

[0070] 한편, 도 3은 본 발명에 따른 QZ 게이트의 전반적인 동작을 나타낸다. DQZ 게이트 이후, Bob은 기존 광자의 편광을 측정할 것이고, 이는 Bob으로 하여금 $|\Phi^+\rangle$ 및 $|\Psi^+\rangle$ 간의 구분을 가능하게 한다. 2비트의 일반 정보를 디코딩하기 위해, Bob은 전자(electron)에 대하여 하다마드 게이트(Hadamard gate) H를 수행하고, 전자의 경로를 측정한다. 표 1은 클릭된 검출기에 대응하는 일반 메시지를 나타낸다.

표 1

After Hadamard gate				
Photon Polarization State	State of the Electron	Detectors Click	Estimated Initial State	Classical Message
V	$ 0\rangle_A 1\rangle_B$	$D_1 D_4$	$ \Phi^-\rangle$	10
	$ 1\rangle_A 0\rangle_B$	$D_2 D_4$	$ \Phi^+\rangle$	00
H	$ 0\rangle_A 1\rangle_B$	$D_1 D_3$	$ \Psi^-\rangle$	11
	$ 1\rangle_A 0\rangle_B$	$D_2 D_3$	$ \Psi^+\rangle$	01

[0071]

[0072] 한편, 본 발명에 따른 양자 고집적 코딩(Quantum Superdense Coding)은 비잡음 양자 채널을 통해 전송될 수 있는 정보의 레이트를 증가시키기 위해 공유 양자 얽힘을 이용하는 방법이다. 단일 큐비트를 두 대상 간에 잡음없이 전송하여, 큐비트 당 하나의 비트의 최대 레이트의 통신(maximum rate of communication of one bit per qubit)을 제공한다. 전송측의 큐비트가 수신기의 큐비트와 최대 얽힘 상태이면, 양자 고집적 코딩은 최대 레이트를 큐비트 당 두 비트로 증가시킨다.

[0073] 한편, 본 발명에서는 제3 기기(Charlie)가 전자 및 광자의 얽힘 쌍 ($|\Phi^+\rangle$)을 생성하고 전자를 Alice (전송측)에게 전송하고 광자를 Bob (수신기)에게 각각 전송하는 것을 고려한다. Alice는 4개의 유니터리 연산, 즉 I , σ_A^x , σ_A^y 및 σ_A^z 연산자 중 하나를 수행할 것이다. 이는 아래의 수학적식 7과 같이 자신이 전송하고자 하는 일반 비트에 대응하는 4개의 유니터리 연산 중 하나이다.

수학적식 7

$$\begin{aligned}
 00 &\rightarrow (I_A \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Phi^+\rangle, \\
 01 &\rightarrow (\sigma_A^x \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Psi^+\rangle, \\
 10 &\rightarrow (\sigma_A^z \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Phi^-\rangle, \\
 11 &\rightarrow (\sigma_A^y \otimes I_B) |\Phi^+\rangle = |\Psi^-\rangle.
 \end{aligned}$$

[0074]

[0075] 도 5는 본 발명에 따른 H(V)-QZ 게이트의 마이켈슨 버전의 구성도를 나타낸다. 전환 가능한 미러(SM:switchable mirror)는 초기에 턴 오프되어 광자의 통과를 허용하고, 일단 광자가 통과(pass)되면 나머지 N 사이클 동안 턴 온 될 것이다.

[0076] N 사이클 이후에, SM이 다시 턴 오프되어, 광자 차단(photon out)을 가능하게 한다. 편광 회전기(PR:Polarizing Rotator)는 $\Theta = \pi/(2N)$ 만큼 편광을 회전시킨다. 편광 빔 스플리터 $PBS^{H(V)}$ 는 H(V) 광자를 통과시키고 V(H) 광자를 반사시킨다. $PR^{H(V)}$ 와 $PBS^{H(V)}$ 의 결합 동작은 도 3의 BS의 기능을 달성한다. MR은 미러를 나타내고, OD는 광학 지연(optical delay)을 나타내고, ψ 는 양자 흡수체의 상태를 나타낸다. 큰 값의 N에 대해, 광자가 흡수체에 의해 흡수될 확률은 사실상 0이다. H(V)-QZ 게이트의 전반적인 동작은 아래의 표 2에 표현된 바와 같다.

표 2

Input	Output
$ 0\rangle_{\psi} 0\rangle_p$	$ 0\rangle_{\psi} 0\rangle_p$
$ pass\rangle_{\psi} I\rangle_p$	$ pass\rangle_{\psi} I^{\perp}\rangle_p$
$ pass\rangle_{\psi} I^{\perp}\rangle_p$	$ pass\rangle_{\psi} I\rangle_p$
$ block\rangle_{\psi} I\rangle_p$	$ block\rangle_{\psi} I\rangle_p$
$ block\rangle_{\psi} I^{\perp}\rangle_p$	$ block\rangle_{\psi} 0\rangle_p$

[0077]

[0078] 결과적으로, 초기 얽힘 쌍은 4개의 직교정규(orthonormal) 벨 상태 중 하나로 변경된다. 이후, Alice는 얽힘 쌍을 Bob에게 전송하고, Bob은 DQZ 게이트에 기반하여 벨-상태 분석을 수행하여, 도 4에 도시된 일반 메시지를 디코딩한다. 벨 상태는 아래의 수학적식 8 및 9에 의해 표현된다.

수학적식 8

$$|\Phi^{\pm}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|block\rangle_e |V\rangle_p \pm |pass\rangle_e |H\rangle_p \right)$$

[0079]

수학적식 9

$$|\Psi^{\pm}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|block\rangle_e |H\rangle_p \pm |pass\rangle_e |V\rangle_p \right)$$

[0080]

[0081] 여기서, $|H\rangle_p = |1\rangle_p$, $|V\rangle_p = |0\rangle_p$, $|pass\rangle_e = |1\rangle_e = |0\rangle_A |1\rangle_B$ 및 $|block\rangle_e = |0\rangle_e = |1\rangle_A |0\rangle_B$ 를 나타낸다. 한편, 첨자 e 및 p는 전자 및 광자를 나타낸다. 도 4에서, A 및 B는 각각 하부 및 상부 경로를 나타낸다. 전자가 경로 A에 있으면, 이는 흡수체 (전자)의 존재를 나타낸다. 반면에, 전자가 경로 B에 있으면, 이는 흡수체 (전자)의 부존재를 나타낸다.

[0082] Bob은 PBS_1 으로 광자를 전송하기 시작하고 H 및 V 성분을 분리하고 이를 대응하는 H(V)-QZ 게이트로 제공한다. 도 5에 도시된 QZ 게이트의 마이켈슨 버전은 전자의 존재 여부에 대응하여 광자의 편광이 어떻게 변환되는지에 관한 원리를 나타낸다.

[0083] 초기에, 전환 가능한 미러(SM)는 턴 오프되어 광자의 통과를 허용하고, 일단이 광자가 통과되면, 나머지 N 사이클 동안 턴 온 될 것이다. N 사이클 이후에 다시 턴 오프될 것이고, 이는 광자 차단(photon out)을 가능하게 한

다. Bob의 광자에 대한 편광 회전기 $PR^{H(V)}$ 의 동작은 아래의 수학식 10 및 11과 같다.

수학식 10

$$PR^H \begin{cases} |H\rangle \rightarrow \cos \theta |H\rangle + \sin \theta |V\rangle \\ |V\rangle \rightarrow \cos \theta |V\rangle - \sin \theta |H\rangle \end{cases}$$

수학식 11

$$PR^V \begin{cases} |V\rangle \rightarrow \cos \theta |V\rangle + \sin \theta |H\rangle, \\ |H\rangle \rightarrow \cos \theta |H\rangle - \sin \theta |V\rangle. \end{cases}$$

도 6은 본 발명에 따른 DQZ 게이트에 기반하여 수행되는 벨-상태 분석에 대하여 사이클의 수 N의 함수로서 데이터 레이트 R_b 를 나타낸다. 비교를 위해, IFM 및 QZ 게이트에 기반하여 수행되는 벨-상태 분석에 대한 데이터 레이트 R_1 및 R_2 를 각각 함께 도시하였다.

수학식 2 및 3과 유사한 변형에 의해, 초기 상태가 $|\Psi^\pm\rangle$ 이면 광자는 수평 편광될 것이다. 초기 상태 $|\Phi^\pm\rangle$ 에 대하여, $t = T_1$ 에서 광자는 수직 편광될 것이다. 수학식 8 및 9의 상태는 N의 근사 한계(asymptotic limits)하에서 전자 및 광자의 결합 상태로 변환된다.

수학식 12

$$|\Phi^\pm\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} |V\rangle_p (|block\rangle_e \pm |pass\rangle_e)$$

수학식 13

$$|\Psi^\pm\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} |H\rangle_p (|block\rangle_e \pm |pass\rangle_e)$$

$t = T_1$ 에서 광자 편광에 대한 지식은 1 비트의 일반 메시지를 디코딩하는 것을 가능하게 한다. 2 비트의 일반 메시지를 디코딩하기 위해, Bob은 전자에 대해 하다마드 게이트를 적용한다. Bob은 전자의 경로와 여기 광자의 편광을 측정하여, 확실성을 갖는 벨 상태로 인코딩된 일반 정보를 디코딩하기 위해 초기 상태를 예측한다.

표 1은 전자 및 광자의 상태에 대응하는 예측된 일반 메시지를 나타낸다. N의 근사 한계 하에서, 고집적 코딩에 대한 데이터 레이트는 2에 근접한다. N의 유한 값을 갖는 양자 고집적 코딩에 대한 데이터 레이트 R_b 는 아래의 수학식 14로 표현된다.

수학식 14

$$R_b = 2 \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta \right)^N$$

[0092]

[0093]

도 6은 DQZ 게이트, IFM 및 QZ 게이트 각각에 기반하여 완전한 벨-상태 분석의 이점을 이용하는 N의 함수로서의 양자 고집적 코딩에 대한 데이터 레이트를 나타낸다. 도 6을 참조하면, DQZ 게이트에 기반한 벨-상태 분석이 $N > 1$ 인 유한한 수의 사이클에 대한 기존의 양자 고집적 코딩보다 더 높은 데이터 레이트를 달성할 수 있음을 알 수 있다. 특히, $N = 12$ 의 유한한 사이클에 대해 데이터 레이트 $R_b > 1.8$ 을 달성할 수 있다.

[0094]

반-대응적 사실 벨-상태 분석(Semi-Counterfactual Bell-State Analysis)

[0095]

도 7은 본 발명에 따른 반-대응적 사실 벨-상태 분석을 위한 구성도를 나타낸다. 초기에, 전자 및 광자는 전자가 DQZ 게이트에 대해 양자 흡수체로서 동작하는 최대 얽힘 상태에 있다. 양자 흡수체 (전자)의 존재 또는 부재 여부는 각각 $|1\rangle_A |0\rangle_B$ and $|0\rangle_A |1\rangle_B$ 로 표현되고, 여기서 첨자 A 및 B는 각각 하부 및 상부 경로를 나타낸다.

[0096]

Bob은 DQZ 게이트를 향해 광자를 전송하여 프로토콜을 시작한다. DQZ 게이트의 출력에서, 광자의 편광은 초기 상태가 $|\Phi^+\rangle$ 또는 $|\Psi^+\rangle$ 임을 판단한다. 4개의 벨 상태를 구분하기 위해, Alice는 자신의 얽힌 입자에 하다마드 게이트를 수행하고 전자의 경로를 측정한다.

[0097]

Alice는 대응적 사실 양자 통신을 이용하여 일반 정보를 Bob에게 전송한다. 표 1은 전자 및 기존 광자의 상태에 대응하여 예측된 초기 상태를 나타낸다.

[0098]

한편, 반-대응적 사실 벨 상태 분석을 수행하기 위하여, 본 발명에서는 Alice와 Bob이 전자 및 광자의 얽힘 쌍을 가지고, Alice의 입자는 양자 흡수체로서 동작한다 (수학식 8 및 9 참조).

[0099]

Bob은 도 5에 도시된 바와 같이 광자를 PBS₁을 향해 전송하여 프로토콜을 시작한다. DQZ 게이트에서, 전자의 부재 ($|\text{pass}\rangle_e |x\rangle_p$, 여기서, $x \in H, V$)시에, 광자는 확률 1로 전송 채널에서 발견되고 이는 본 발명의 반-대응적 사실을 가능하게 한다. 전자의 존재 ($|\text{block}\rangle_e |x\rangle_p$)시에, 광자가 전송 채널에서 발견되면, 광자는 전자에 의해 흡수될 것이다. N 사이클 이후, 전자 및 광자의 결합 상태는 수학식 15 및 16에 의해 표현된다.

수학식 15

$$|\Phi^\pm\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} |V\rangle_p (\cos^N \theta |\text{block}\rangle_e \pm |\text{pass}\rangle_e)$$

[0100]

수학식 16

$$|\Psi^\pm\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} |H\rangle_p (\cos^N \theta |\text{block}\rangle_e \pm |\text{pass}\rangle_e)$$

[0101]

[0102]

N의 근사 한계하에서, 수학식 15 및 16은 각각 수학식 12 및 13과 정확히 동일하다. 광자가 전자에 의해 흡수되는 비-제로 확률이 존재하기 때문에 수학식 15 및 16은 정규화되지 않는다. 임의의 입력 벨 상태에 대해 광자가 전자에 의해 흡수되지 않을 확률 P_s 는 수학식 17로 표현된다.

수학식 17

$$P_s = \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta\right)^N$$

[0103]

[0104] DQZ 게이트 이후, Bob은 기존 광자의 편광을 측정한다. 광자의 편광은 Bob으로 하여금 $|\Phi^{\pm}\rangle$ 또는 $|\Psi^{\pm}\rangle$ 간의 구별을 가능하게 한다. 4개의 벨 상태 간의 구분을 위하여, Alice는 전자에 대해 하다마드 게이트를 수행하고 전자의 경로를 측정한다.

[0105] Alice는 대응적 사실 양자 통신을 이용하여 Bob에게 일반 정보를 전송하여 Bob이 완전한 벨-상태 분석을 수행하는 것을 가능하게 한다. Bob은 기존 광자의 편광 및 전자의 상태에 대응하는 확실성을 이용하여 초기 상태를 예측할 것이다 (표 1 참조).

[0106] 이상에서는 본 발명에 따른 양자 집적코딩을 수행하는 송신 기기 및 수신 기기와 이를 포함하는 양자 시스템에 대해 살펴보았다. 이하에서는 본 발명에 따른 양자 집적코딩을 수행하는 방법의 구체적인 알고리즘에 대해 살펴보기로 한다.

[0107] 이와 관련하여, 도 8은 본 발명에 따른 송신 기기인 제1 기기에서의 양자 집적코딩을 수행하는 방법의 흐름도를 나타낸다. 한편, 도 9는 본 발명에 따른 수신 기기인 제2 기기에서의 양자 집적코딩을 수행하는 방법의 흐름도를 나타낸다.

[0108] 도 8을 참조하면, 양자 집적코딩 수행 방법은 전자 쌍 정보 수신 단계(S110), 유니터리 연산 수행 단계(S120) 및 얽힘 입자 정보 전송 단계(S130)를 포함한다.

[0109] 전자 쌍 정보 수신 단계(S110)에서, 전자 및 광자 쌍 (pair of electron and photon) 정보 중 전자 쌍 정보를 제3 기기로부터 수신한다. 한편, 유니터리 연산 수행 단계(S120)에서, 상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 (unitary operation)을 수행하여, 일반 정보(classical information)를 인코딩한다. 또한, 얽힘 입자 정보 전송 단계(S130)에서, 상기 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신 기기인 제2기기로 전송한다.

[0110] 구체적으로, 유니터리 연산 수행 단계(S120)에서, 상기 제1 기기가 송신하고자 하는 일반 비트(classical bit s)에 대응하는 I , σ_A^x , σ_A^y 및 σ_A^z 연산자 중 하나를 이용하여, 수학식 7에 해당하는 4개의 유니터리 연산을 수행할 수 있다.

[0111] 또한, 유니터리 연산 수행 단계(S120)에서, 4개의 벨 상태(Bell states)를 구분하기 위해, 얽힘 입자에 하다마드 게이트(Hadamard gate) 연산을 수행하고, 상기 전자 쌍의 경로를 측정하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0112] 한편, 얽힘 입자 정보 전송 단계(S130)와 관련하여, 상기 제1 기기와 수신 기기인 제2 기기 간의 채널을 통해 상기 제2 기기에게 제2 일반 정보(classical information)를 전송할 수 있다. 이때, 상기 제2 일반 정보는 상기 얽힘 입자에 관한 정보와 상기 전자 쌍의 경로에 관한 정보를 포함할 수 있다.

[0113] 한편, 도 9를 참조하면, 양자 집적코딩 수행 방법은 광자 쌍 정보 수신 단계(S210), 전자 쌍 정보 수신 단계(S220) 및 벨-상태 분석 단계(S230)를 포함한다.

[0114] 광자 쌍 정보 수신 단계(S210)에서, 전자 및 광자 쌍 (pair of electron and photon) 정보 중 광자 쌍 정보를 수신한다. 한편, 전자 쌍 정보 수신 단계(S220)에서, 송신 기기인 제1 기기로부터 전자 쌍에 대한 유니터리 연산 수행 결과인 얽힘 입자(entangled particle) 정보를 수신한다. 이때, 상기 얽힘 입자 정보는 상기 제1 기기가 인코딩한 일반 정보(classical information)를 포함한다.

[0115] 또한, 벨-상태 분석 단계(S230)에서, 이중 양자 제노 게이트(Dual Quantum Zeno Gate)에 기반하여 벨-상태 (Bell-state) 분석을 수행하여 상기 일반 정보를 디코딩한다. 구체적으로, 벨-상태 분석 단계(S230)에서, 상기 제2 기기가 4개의 초기 상태(Initial State) $|\Phi^{\pm}\rangle$ 및 $|\Psi^{\pm}\rangle$ 간의 구분을 가능하게 하는 광자 쌍의 편광 (polarization)을 분석할 수 있다. 이와 관련하여, 상기 $|\Phi^{\pm}\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|0\rangle_A |1\rangle_A$ 이고 상기 편광

이 수직(V)인 경우이고, 상기 $|\Phi^+\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_A |0\rangle_A$ 이고 상기 편광이 수직(V)인 경우이다. 반면에, 상기 $|\Psi^-\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|0\rangle_B |1\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우이고, 상기 $|\Psi^+\rangle$ 는 상기 전자 쌍 상태가 $|1\rangle_B |0\rangle_B$ 이고 상기 편광이 수평(H)인 경우이다.

[0116] 또한, 벨-상태 분석 단계(S230)에서, 상기 수신된 광자 쌍 정보를 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 수평(H) 성분 및 수직(V) 성분으로 분할하고 상기 수평 성분 및 상기 수직 성분을 각각 H-QZ 게이트와 V-QZ 게이트로 공급할 수 있다.

[0117] 또한, 벨-상태 분석 단계(S230)에서, 상기 H-QZ 게이트 및 상기 V-QZ 게이트 내의 전환 가능한 미러(switchable mirror)를 N 사이클 동안 턴 온하여 상기 광자 쌍을 통과(pass)시킬 수 있다. 또한, 벨-상태 분석 단계(S230)에서, 편광 회전기(PR)를 이용하여 $\Theta = \pi/(2N)$ 만큼 편광을 회전시킬 수 있다. 또한, 벨-상태 분석 단계(S230)에서, 제2 편광 빔 스플리터(PBS)를 이용하여 상기 H-QZ 게이트에서는 수평(H) 성분을 통과시키고 상기 V-QZ 게이트에서는 수직(V) 성분을 통과시킬 수 있다.

[0118] 본 발명에서는 DQZ 게이트 및 고집적 코딩에 기반하는 벨-상태 분석에 대한 새로운 방식을 제안하였다. DQZ 게이트에 기반하는 벨-상태 분석은 i) 광자가 폐기(discard)되지 않을 높을 확률로 구현될 수 있고; ii) 보조적 자유도 또는 보조 광자를 이용하지 않고 제한된 자원하에서 양자 고집적 코딩에 대해 데이터 레이트를 증가시킬 수 있고; iii) 반-대응적 사실 방식으로 확실성을 갖는 4개의 벨 상태를 구분할 수 있다.

[0119] 한편, 본 발명의 적어도 일 실시예에 따르면, 벨-상태 분석에 기반한 양자 집적 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 시스템을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

[0120] 또한, 본 발명의 적어도 일 실시예에 따르면, 이상적인 데이터 레이트에 근접한 높은 데이터 레이트를 갖는 양자 집적 코딩 방법 및 이를 이용한 양자 시스템을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

[0121] 본 발명의 활용 분야와 관련하여, 양자 집적 코딩(Quantum superdense coding)은 주요한 양자 정보 처리 태스크로, 2-비트 일반 정보는 초기 공유 얽힘(initially shared entanglement)를 이용하는 2개의 공간적으로 이격된 대상 간에 전달될 수 있다. 이분(bipartite) 시스템에 대하여, 양자 집적 코딩을 구현하는 중요한 과제는 완전한 벨-상태 분석을 수행하는 것이다. 본 발명에 따르면, 완전한 벨-상태 분석을 수행할 수 있고, 양자 집적 코딩에 대하여 높은 데이터 레이트를 제공할 수 있다. 근사 한계하에서, 양자 집적 코딩에 대한 데이터 레이트는 2에 근접한다.

[0122] 본 발명의 기대 효과와 관련하여, 반-대응적 사실 방식으로 완전한 벨-상태 분석을 수행하기 위해 공간적으로 이격될 수 있도록 양자 집적코딩 방법을 제공할 수 있다는 것이다. 이와 관련하여, 양자 송신 기기와 수신 기기는 이중 양자 제노 효과에 기반하여 벨-상태 분석을 수행할 수 있다. 이때, 본 발명에 따른 프로토콜의 종료 시에, 초기 상태는 클릭된 검출기에 기반하여 예측된다.

[0123] 또한, 본 발명의 기술 사업화 전망은 다음과 같다. 기술 사업화 전망과 관련하여, 양자 통신에서 데이터 레이트가 중요하다. 양자 집적코딩은 이상적인 상황에서 하나의 큐비트로 2비트의 일반 정보를 전송하는 것이 가능하다. 현재까지, 양자 집적 코딩의 실제 구현에서 가장 높은 것으로 알려진 데이터 레이트는 1.665 bits/qubit이다. 하지만, 본 발명에 따른 양자 제노 게이트에 기반한 벨-상태 분석은 $N=12$ (N 은 이중 양자 제노 게이트의 사이클의 수)에 대하여 데이터 레이트 > 1.8 을 달성할 수 있다.

[0124] 소프트웨어적인 구현에 의하면, 본 명세서에서 설명되는 절차 및 기능뿐만 아니라 각각의 구성 요소들은 별도의 소프트웨어 모듈로도 구현될 수 있다. 상기 소프트웨어 모듈들 각각은 본 명세서에서 설명되는 하나 이상의 기능 및 작동을 수행할 수 있다. 적절한 프로그램 언어로 쓰여진 소프트웨어 어플리케이션으로 소프트웨어 코드가 구현될 수 있다. 상기 소프트웨어 코드는 메모리에 저장되고, 제어부(controller) 또는 프로세서(processor)에 의해 실행될 수 있다.

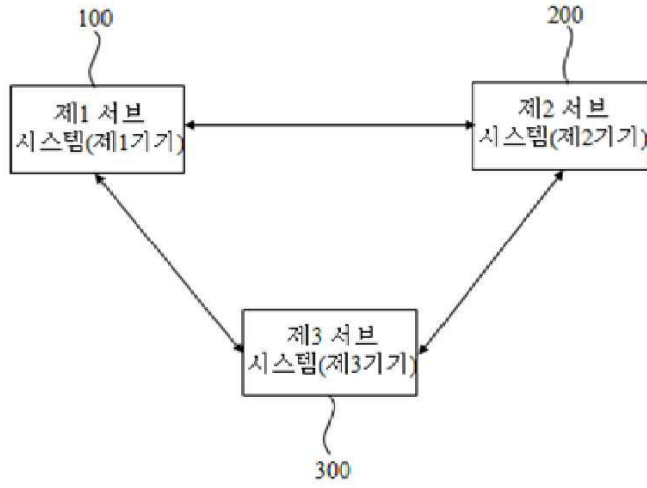
부호의 설명

[0125] 100: 제1 서버 시스템 200: 제2 서버 시스템
300: 제3 서버 시스템
110, 210: 제어부 120, 220: 인터페이스부

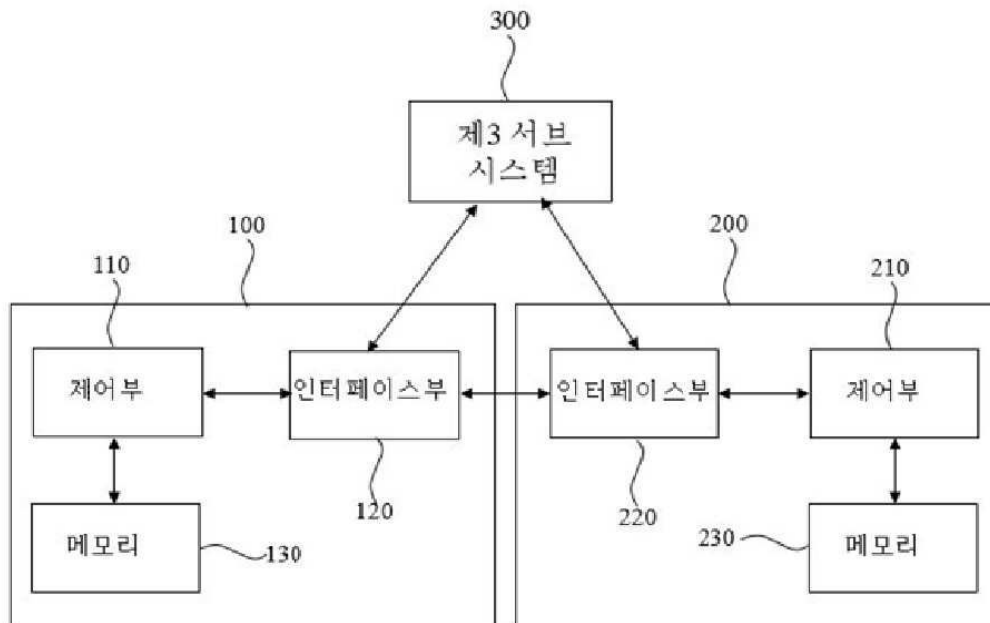
130, 230: 메모리

도면

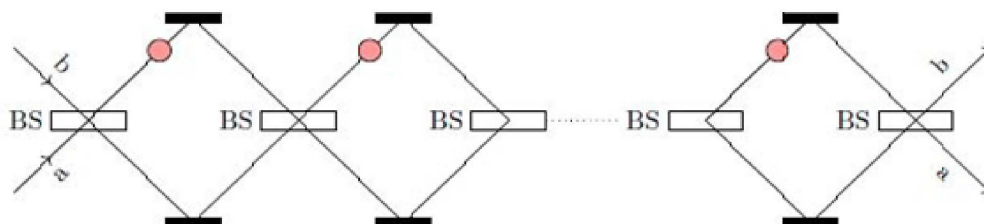
도면1



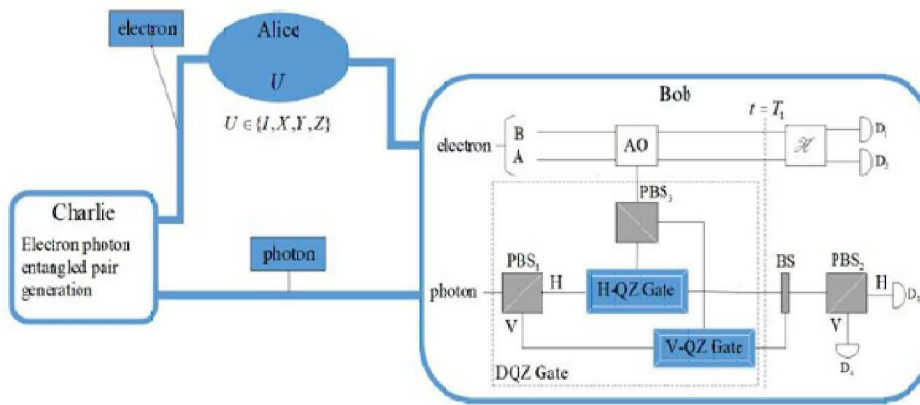
도면2



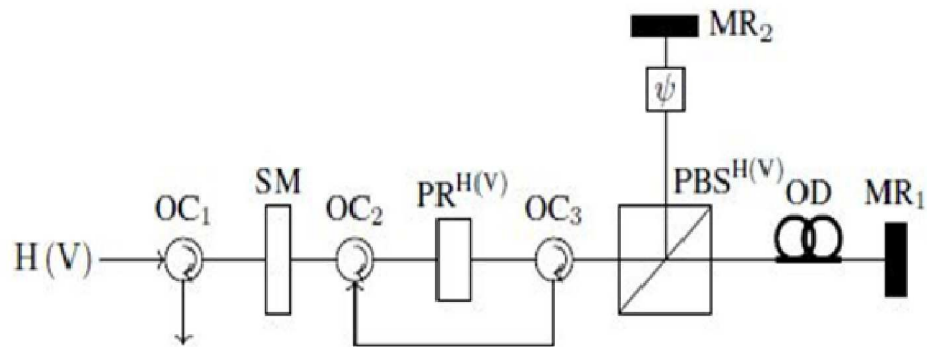
도면3



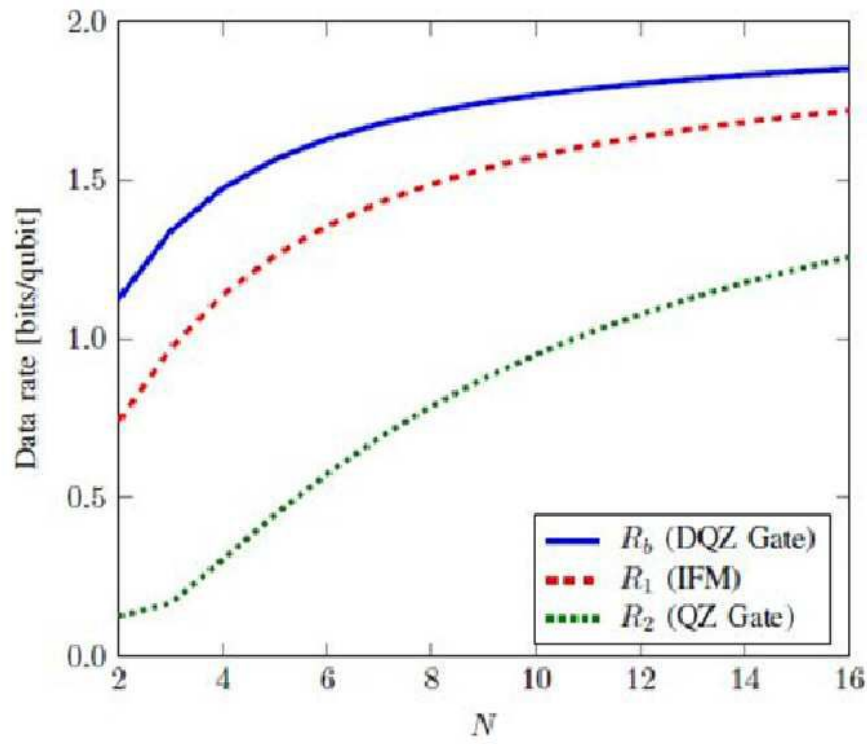
도면4



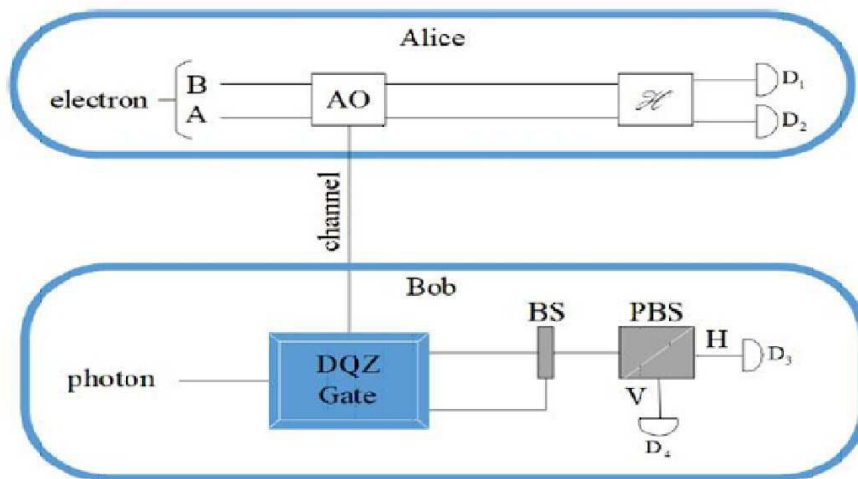
도면5



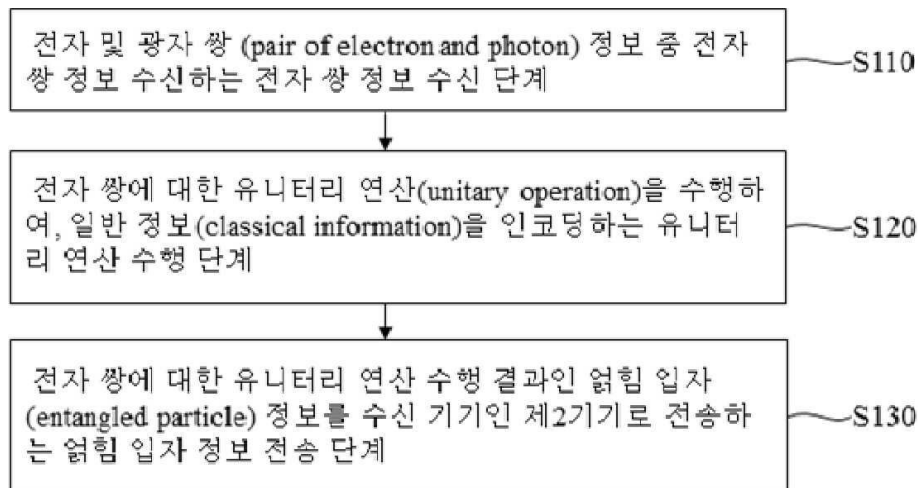
도면6



도면7



도면8



도면9

