(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년01월11일
(11) 등록번호 10-2201814
(24) 등록일자 2021년01월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04L 7/00 (2006.01) *H04L 7/027* (2006.01)
(52) CPC특허분류
H04L 7/0075 (2013.01)
H04L 7/027 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0081985
(22) 출원일자 2019년07월08일
심사청구일자 2019년07월08일
(56) 선행기술조사문헌
US20150123720 A1
US20140270802 A1
US20090194702 A1
US7286444 A

(73) 특허권자
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
신현동
경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호(영통동, 벽산삼익아파트)
자만 파커
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 전자정보관 559호(서천동)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인도담

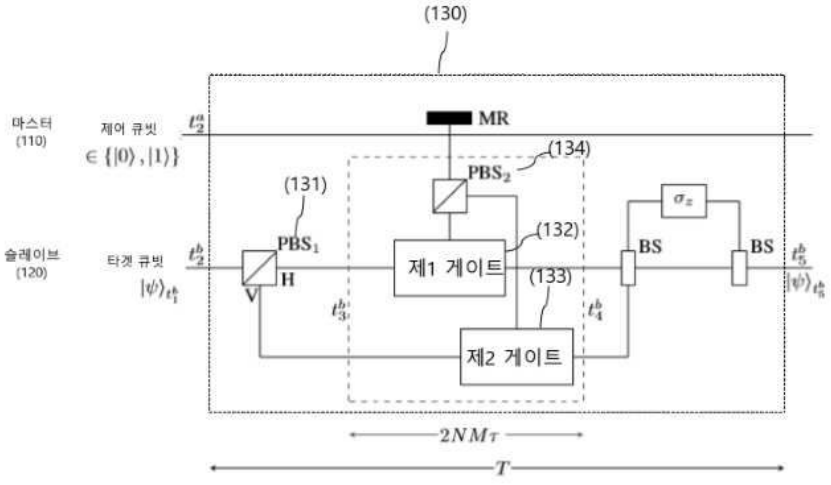
전체 청구항 수 : 총 6 항 심사관 : 김성태

(54) 발명의 명칭 **슬레이브 클럭의 동기화 검출 방법**

(57) 요 약

본 발명에 따른 슬레이브 클럭의 동기화 정확성을 검출하는 방법은 마스터 클럭 기준 제1 시점에 상기 마스터 클럭에 제어 큐빗을 입력하는 단계, 상기 슬레이브 클럭 기준 제1 시점에 상기 슬레이브 클럭에 복수의 타겟 큐빗을 입력하는 단계, 상기 제어 큐빗이 제어 불가능한 게이트에 입력된 후 제어되는 동안에 상기 복수의 타켓 큐빗 각각을 상기 제어 불가능한 게이트에 입력하는 단계, 상기 제어 불가능한 게이트에서 상기 제어 큐빗의 상태에 따라 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 변경되어 출력되는 단계 및 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태 및 상기 제어 불가능한 게이트에서 출력된 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태의 비교 결과에 따라 슬레이브 클럭의 동기화 정확성을 검출하는 단계를 포함한다.

대 표 도 - 도1



(72) 발명자

정영민

경기 성남시 중원구 도촌북로 78, 501동 402호

무하마드 아사드 울라

경기도 수원시 영통구 청명로59번길 51, B03(영통동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2019R1A2C2007037
부처명	한국연구재단
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공분야기초연구사업/중견연구자지원사업
연구과제명	양자네트워킹 핵심기술 연구
기 여 율	1/1
과제수행기관명	경희대학교
연구기간	2019.03.01 ~ 2024.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

슬레이브 클럭의 동기화 정확성을 검출하는 방법에 있어서,

마스터 클럭 기준 제1 시점에 상기 마스터 클럭에 제어 큐빗을 입력하는 단계;

슬레이브 클럭 기준 제1 시점에 상기 슬레이브 클럭에 복수의 타겟 큐빗을 입력하는 단계;

상기 제어 큐빗이 제어 불가능한 게이트에 입력된 후 제어되는 동안에 상기 복수의 타켓 큐빗 각각을 상기 제어 불가능한 게이트에 입력하는 단계;

상기 제어 불가능한 게이트에서 상기 제어 큐빗의 상태에 따라 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 변경되어 출력되는 단계;

상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태 및 상기 제어 불가능한 게이트에서 출력된 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태의 비교 결과에 따라 슬레이브 클럭의 동기화 정확성을 검출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

슬레이브 클럭의 동기화 검출 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제어 큐빗이 제어 불가능한 게이트에 입력된 후 제어되는 동안에 상기 복수의 타켓 큐빗 각각을 상기 제어 불가능한 게이트에 입력하는 단계는

마스터 클럭 기준 제2 시점 및 슬레이브 클럭 기준 제2 시점에 동기화되는 경우, 상기 복수의 타겟 큐빗 중 특정 타겟 큐빗이 상기 제어 불가능한 게이트에 입력되는 순간 상기 제어 큐빗의 상태가 제2 상태에서 제1 상태로 변경하는 단계;

상기 마스터 클럭 기준 제2 시점 및 상기 슬레이브 클럭 기준 제2 시점에 동기화되지 않는 경우, 슬레이브 클럭 기준 제2 시점 내지 제3 시점 사이에 상기 제어 큐빗의 상태가 상기 제1 상태에서 제2 상태로 변경하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

슬레이브 클럭의 동기화 검출 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 제어 큐빗이 제어 불가능한 게이트에 입력된 후 제어되는 동안에 상기 복수의 타켓 큐빗 각각의 상태를 제1 상태의 구성 요소 및 제2 상태의 구성 요소로 분할하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

슬레이브 클럭의 동기화 검출 방법.

청구항 4

제2항 및 제3항 중 어느 한 항 있어서,

상기 제어 불가능한 게이트에서 상기 제어 큐빗의 상태에 따라 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 변경되어 출력되는 단계는

상기 제어 큐빗의 상태가 제1 상태인 경우, 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 변경되지 않고 그대로 출력되는 단계; 및

상기 제어 큐빗의 상태가 제2 상태인 경우, 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 변경된 후 출력되는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

슬레이브 클럭의 동기화 검출 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 제어 큐빗의 상태가 제2 상태인 경우, 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 변경된 후 출력되는 단계는

상기 제1 상태의 구성 요소 및 제2 상태의 구성 요소 각각이 채널 상에 존재하는 흡수 물체에 흡수되어 변화하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

슬레이브 클럭의 동기화 검출 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태 및 상기 제어 불가능한 게이트에서 출력된 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태의 비교 결과에 따라 슬레이브 클럭의 동기화 정확성을 검출하는 단계는

슬레이브 클럭 기준 제4 시점에서 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태 및 상기 제어 불가능한 게이트에서 출력된 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 동일하면 상기 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭이 동기화되었다고 판단하는 단계; 및

상기 슬레이브 클럭 기준 제4 시점에서 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태 및 상기 제어 불가능한 게이트에서 출력된 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 상이하면 상기 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭이 동기화되지 않았다고 판단하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

슬레이브 클럭의 동기화 검출 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 슬레이브 클럭의 동기화 검출 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭 사이의 입자 전송 없이 반사실적(counterfactual) 통신 방법을 이용하여 클럭 간 입자 전송 없이도 동기화 여부를 검출할 수 있는 슬레이브 클럭의 동기화 검출 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 시간을 이용하는 장치에 있어서 동기화는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 특히 공간적으로 분리된 네트워크(예를 들어, 내비게이션이나 유무선 통신 등)는 정확한 시간에 따른 동작을 위해 참조 주파수 동기화를 요구할 수밖에 없다. 이에 따라 오차가 매우 작은 정확한 클락(clock)을 개발하기 위한 노력이 계속되어 왔다.

[0004] 근자에는 이와 같은 전통적인 기술 외에도 상대성 이론을 이용하여 공간적으로 분리된 클락들의 동기화를 수행하는 방법 역시 제시되고 있다. 또한, 근자에는 양자 클락 동기화를 위해 양자 클락을 효과적으로 전송하여 시간의 동기화를 방법도 제시되고 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭 사이의 입자 전송 없이 반사실적(counterfactual) 통신 방법을 이용하여 클럭 간 입자 전송 없이도 동기화 여부를 검출할 수 있는 동기화 정확성 검출 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

[0007] 또한, 본 발명은 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭 사이의 물리 입자의 전송이 불필요하며 코릴레이트 된 입자를 공유하는 양자 얽힘을 이용하여 동기화 여부를 확인할 필요가 없도록 하는 동기화 정확성 검출 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

[0009] 본 발명의 목적들은 이상에서 언급한 목적으로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 본 발명의 다른 목적 및 장점들은 하기의 설명에 의해서 이해될 수 있고, 본 발명의 실시예에 의해 보다 분명하게 이해될 것이다. 또한, 본 발명의 목적 및 장점들은 특허 청구 범위에 나타낸 수단 및 그 조합에 의해 실현될 수 있음을 쉽게 알 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0011] 이러한 목적을 달성하기 위한 슬레이브 클럭의 동기화 정확성을 검출하는 방법은 마스터 클럭 기준 제1 시점에 상기 마스터 클럭에 제어 큐빗을 입력하는 단계, 상기 슬레이브 클럭 기준 제1 시점에 상기 슬레이브 클럭에 복수의 타겟 큐빗을 입력하는 단계, 상기 제어 큐빗이 제어 불가능한 게이트에 입력된 후 제어되는 동안에 상기 복수의 타켓 큐빗 각각을 상기 제어 불가능한 게이트에 입력하는 단계, 상기 제어 불가능한 게이트에서 상기 제어 큐빗의 상태에 따라 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 변경되어 출력되는 단계 및 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태 및 상기 제어 불가능한 게이트에서 출력된 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태의 비교 결과에 따라 슬레이브 클럭의 동기화 정확성을 검출하는 단계를 포함한다.

발명의 효과

[0013] 전술한 바와 같은 본 발명에 의하면, 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭 사이의 입자 전송 없이 반사실적(counterfactual) 통신 방법을 이용하여 클럭 간 입자 전송 없이도 동기화 여부를 검출할 수 있다는 장점이 있다.

[0014] 또한 본 발명에 의하면, 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭 사이의 물리 입자의 전송이 불필요하며 코릴레이트 된 입자를 공유하는 양자 얽힘을 이용하여 동기화 여부를 확인할 필요가 없도록 한다는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0016] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 양자 클럭 동기화 시스템을 설명하기 위한 도면이다.

도 2는 본 발명에 따른 양자 클럭 동기화 방법의 일 실시예를 설명하기 위한 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0017] 전술한 목적, 특징 및 장점은 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 후술되며, 이에 따라 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 본 발명의 기술적 사상을 용이하게 실시할 수 있을 것이다. 본 발명을 설명함에 있어서 본 발명과 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 상세한 설명을 생략한다. 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다. 도면에서 동일한 참조부호는 동일 또는 유사한 구성요소를 가리키는 것으로 사용된다.

[0019] 본 명세서에서 사용된 용어 중 “제어 큐빗”은 마스터 클럭에 입력되는 큐빗으로 전자를 의미한다.

[0020] 본 명세서에서 사용된 용어 중 “타켓 큐빗”은 슬레이브 클럭에 입력되는 큐빗으로 광자를 의미한다.

[0021] 본 명세서에서 사용된 용어 중 “제1 상태”는 마스터 클럭에 입력된 제어 큐빗의 광자 상태가 바닥 상태(ground state, 즉 |0>)임을 나타낸다. 상기와 같이, 마스터 클럭에 입력된 제어 큐빗의 광자 상태가 제1 상태인 경우에는 슬레이브 클럭의 타켓 큐빗이 제어 불가능한 게이트에서 사용지 않아 타겟 큐빗의 상태가 변경되지 않게 된다.

[0022] 본 명세서에서 사용된 용어 중 “제2 상태”는 마스터 클럭에 입력된 제어 큐빗의 광자 상태가 들뜬 상태(excited state, 즉 |1>)임을 나타낸다. 상기와 같이, 마스터 클럭에 입력된 제어 큐빗의 광자 상태가 제2 상태인 경우에는 슬레이브 클럭의 타켓 큐빗이 제어 불가능한 게이트에서 사용되어 타겟 큐빗의 상태가 변경된다.

[0023] 만일, 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭이 동기화된 상태라면, 제어 불가능한 게이트가 실행하는 동안에 제어 큐빗의 상태가 제1 상태(|0>)이기 때문에 제어 불가능한 게이트에서 타켓 큐빗이 사용되지 않게 되어 타겟 큐빗의 상태는 변경되지 않을 것이다.

[0024] 한편, 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭이 동기화되지 않은 상태라면, 제어 불가능한(CCNOT) 게이트가 실행하는 동안에 제어 큐빗의 상태가 제2 상태(|1>)이기 때문에 제어 불가능한 게이트에서 타켓 큐빗이 사용되어 타겟 큐빗의 상태는 변경될 것이다.

[0025] 상기와 같은 이유로, 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭이 동기화되었는지 여부에 따라 슬레이브 클럭에서 출력된 타켓 큐빗의 상태는 슬레이브 클럭에 입력된 타켓 큐빗의 상태와 달라지게 될 것이다. 따라서, 슬레이브 클럭은 마스터 클럭으로부터 물리적 입자를 수신하거나 마스터 클럭에 물리적 입자를 전송하지 않아도 비동기를 검출할 수 있는 것이다.

[0027] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 양자 클럭 동기화 시스템을 설명하기 위한 도면이다.

[0028] 도 1을 참조하면, 양자 클럭 동기화 시스템은 마스터(110), 슬레이브(120) 및 제어 불가능한(CCNOT) 게이트(130)를 포함한다.

[0029] 마스터(110) 클럭 기준 제1 시점에 상기 마스터 클럭에 제어 큐빗을 입력한다. 상기의 제어 큐빗은 마스터 클럭에 입력되는 큐빗으로 전자를 의미하며 제1 상태 또는 제2 상태를 유지한다.

[0030] 제어 큐빗의 제1 상태는 마스터(110) 클럭에 입력된 제어 큐빗의 광자 상태가 바닥 상태(ground state, 즉 |0>)임을 나타낸다. 상기와 같이, 마스터 클럭에 입력된 제어 큐빗의 광자 상태가 제1 상태인 경우에는 슬레이브(120) 클럭의 타켓 큐빗이 제어 불가능한 게이트(130)에서 사용하지 않아 타겟 큐빗의 상태가 변경되지 않게 된다.

[0031] 또한, 제어 큐빗의 제2 상태는 마스터(110) 클럭에 입력된 제어 큐빗의 광자 상태가 들뜬 상태(excited state, 즉 |1>)임을 나타낸다. 상기와 같이, 마스터(110) 클럭에 입력된 제어 큐빗의 광자 상태가 제1 상태인 경우에는 슬레이브(120) 클럭의 타켓 큐빗이 제어 불가능한 게이트(130)에서 사용하지 않아 타겟 큐빗의 상태가 변경되지 않게 된다.

[0032] 슬레이브(120) 클럭 기준 제1 시점에 상기 슬레이브 클럭에 복수의 타겟 큐빗을 입력한다. 슬레이브(120) 클럭 기준 제1 시점($t_2^b = T_f + t_1^b$)에 슬레이브(120) 클럭의 큐빗의 상태는 아래의 [수학식 1]과 같다.

[0034] [수학식 1]

$$|\psi\rangle_{t_2^b} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle + e^{-\iota\chi_{T_f}}|1\rangle\right)$$

[0035]

[0036] χ_{T_f} : t_f 시간에 자유 진화되는 동안에 실행되는 단계

[0038] 마스터(110) 클럭 및 슬레이브(120) 클럭이 동기화되는 경우, 슬레이브(120) 클럭 기준 제2 시점(t_2^b)에서 슬레이브(120) 클럭의 광자 상태는 하기의 [수학식 2]와 같다.

[0040] [수학식 2]

$$|\psi\rangle_{t_2^b} = \frac{1}{\sqrt{2}}[|0\rangle - \iota|1\rangle]$$

[0041]

[0043] 그 후, 제어 큐빗이 제어 불가능한 게이트(130)에 입력된 후 제어되는 동안에 상기 복수의 타켓 큐빗 각각을 상기 제어 불가능한 게이트(130)에 입력한다. 제어 불가능한 게이트(130)의 PBS_1(131)은 슬레이브(120) 클럭에 입력된 타겟 큐빗의 광자 상태를 두 개의 구성 요소로 분할한다.

[0044] 즉, PBS_1(131)은 슬레이브(120) 클럭에 입력된 타겟 큐빗의 광자 상태($|\psi\rangle_{t_2^b}$)를 제1 상태(H(|0>))의 구성 요소

및 제2 상태(V(|1>))의 구성 요소로 분할한다.

[0045] 이때, 제1 상태의 구성 요소는 제어 불가능한 게이트(130)에서 전송되는 구성 요소이고, 제2 상태의 구성 요소는 제어 불가능한 게이트(130)에서 반사되는 구성 요소이다. 상기의 제1 상태의 구성 요소는 제1 게이트(132)에 입력되고, 제2 상태의 구성 요소는 제2 게이트(133)에 입력된다.

[0046] 슬레이브(120) 클럭 기준 제2 시점(t_3^b)에 슬레이브(120) 클럭의 광자는 타겟 큐빗으로서 특정 주기($t_4^b - t_3^b = 2MN\tau$.)동안에 제어 불가능한 게이트(130)에서 사용된다.

[0047] 슬레이브(120) 클럭의 광자가 타겟 큐빗으로서 특정 주기($t_4^b - t_3^b = 2MN\tau$.)동안에 제어 불가능한 게이트(130)에서 사용되는 동안에 마스터(110) 클럭의 제어 큐빗의 전자 상태는 제1 상태 또는 제2 상태로 변경된다.

[0048] 만일, 마스터(110) 클럭 기준 제3 시점(t_3^a) 및 슬레이브 클럭 기준 제2 시점(t_3^b)에서 동기화되는 경우, 슬레이브(120) 클럭의 타켓 큐빗이 제어 불가능한 게이트(130)에 입력되는 순간에 마스터(110) 클럭의 제어 큐빗의 전자 상태는 제1 상태(|0>) 이 될 것이다. 이에 따라, 슬레이브(120) 클럭의 타켓 큐빗은 제어 불가능한 게이트(130)에서 사용되지 않을 것이다.

[0049] 따라서, 마스터(110) 클럭 기준 제2 시점(t_3^a) 및 슬레이브 클럭 기준 제2 시점(t_3^b)에서 동기화되는 경우, 슬레이브(120) 클럭의 타켓 큐빗은 제어 불가능한 게이트(130)를 경험하지 않게 될 것이다. 따라서, 슬레이브(120) 클럭 기준 제3 시점(t_4^b)에서 타겟 큐빗의 광자 상태는 [수학식 3]과 같다.

[0051] [수학식 3]

[0052] $$|\psi\rangle_{t_4^b} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - \iota|1\rangle)$$

[0054] 슬레이브(120) 클럭의 제4 시점(t_5^b)에 제어 불가능한 게이트(130)가 종료되며, 슬레이브(120) 클럭의 타겟 큐빗의 제5 시점(t_6^b)에서 단계(χ)를 추가하기 위해 광 지연을 겪게 된다.

[0055] 그 후, 슬레이브(120) 클럭의 타겟 큐빗은 π/2-Ramsey pulse transition 을 실행하며, π/2-Ramsey pulse transition은 슬레이브(120) 클럭의 종료 시점의 모든 타겟 큐빗의 광자 상태를 하기의 [수학식 4]와 같이 되도록 한다.

[0057] [수학식 4]

[0058] $$|\psi\rangle_{t_6} = |0\rangle$$

[0060] 이에 반하여, 마스터(110) 클럭 기준 제2 시점(t_3^a) 및 슬레이브(120) 클럭 기준 제2 시점(t_3^b)에서 동기화되지 않는 경우, 슬레이브(120) 클럭 기준 제2 시점(t_3^b) 및 슬레이브(120) 클럭 기준 제3 시점(t_4^b) 사이($t_3^b < t_{bf} < t_4^b$)에 시간 변화(Δt)가 될 때, 마스터(110) 클럭의 제어 큐빗의 전자 상태는 제1 상태(|0>)에서 제2 상태(|1>)로 변화하게 된다.

[0061] 슬레이브(120) 클럭의 타겟 큐빗 중 제1 상태의 구성 요소(H|0>)는 제1 게이트(132)에 입력되어 $(m+1)^{th}$ 실행되고, 제2 상태의 구성 요소(V|1>)는 제2 게이트(133)에 입력되어 $(n+1)^{th}$가 실행된다.

[0062] 만일, 마스터(110) 클럭의 제어 큐빗의 상태가 제1 상태(|0>)인 경우, 제1 상태의 구성 요소(H|0>) 및 제2 상태의 구성 요소(V|0>)는 양자 채널 상의 흡수 물체에 흡수되고, 마스터(110) 클럭의 제어 큐빗의 상태가 제2 상태(|1>)인 경우, 제1 상태의 구성 요소(H|0>) 및 제2 상태의 구성 요소(V|0>)는 양자 채널 상의 흡수 물체에 흡수

되지 않고 되돌아간다.

[0063] 이와 같은 과정을 통해 슬레이브(120) 클럭의 제4 시점(t_5^b)에서 마스터(110) 클럭 및 슬레이브(120) 클럭은 동기화되며, 슬레이브(120) 클럭의 제4 시점(t_5^b)에서 타겟 큐빗의 광자 상태는 하기의 [수학식 5]와 같다.

[0065] [수학식 5]

[0066] $$|\psi\rangle_{t5}^{b} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\left(|0\rangle + e^{i\chi_{T_f}}|1\rangle\right) + \cos^{m-1}\theta_M \sin\theta_M \rightarrow 0\left(e^{i\chi_{T_f}}|0\rangle + |1\rangle\right)\right].$$

[0068] 만일, 슬레이브(120) 클럭의 제4 시점(t_5^b)에서 마스터(110) 클럭 및 슬레이브(120) 클럭은 동기화되지 않으면, 제어 불가능한 게이트(130)가 실행되는 동안에 마스터(110) 클럭의 제어 큐빗의 전자 상태는 제2 상태(|1>) 이며 슬레이브(120) 클럭의 제4 시점(t_5^b)에서 타겟 큐빗의 광자 상태는 하기의 [수학식 6]와 같다.

[0070] [수학식 6]

[0071] $$|\psi\rangle_{t5}^{b} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[e^{i\chi_{T_f}}|0\rangle + |1\rangle\right]$$

[0073] 본 발명의 패리티 측정은 마스터(110) 클럭 및 슬레이브(120) 클럭 사이의 비동기를 검출하는데 사용된 슬레이브(120) 클럭에서 출력된 N개의 타겟 큐빗을 이용한다. 이러한 패리티 측정을 이용하면 마스터(110) 클럭 및 슬레이브(120) 클럭 사이의 차이 시간 (Δt)을 추정할 수 있다.

[0074] 또한, 패리티 측정에 사용된 타겟 큐빗의 개수를 지시하는 N의 개수 및 슬레이브(120)에서 출력된 타켓 큐빗 사이의 얽힘은 마스터(110) 클럭 및 슬레이브(120) 클럭의 비동기화가 얼마나 큰지 여부를 확인하는데 사용된다.

[0075] 이하에서는, 마스터(110) 클럭 및 슬레이브(120) 클럭은 동기화되지 않는 경우 제어 불가능한 게이트(130)의 제1 게이트(132)의 동작 과정을 설명하기로 한다.

[0076] 만일, 마스터(110) 클럭이 먼저 실행되는 경우 슬레이브(120) 클럭의 타겟 큐빗은 제어 불가능한 게이트(130)에 입력된 후, 제1 상태의 구성 요소(H|0>) 및 제2 상태의 구성 요소(V|1>)로 분할된다. 그런 다음, 타겟 큐빗 중 제1 상태의 구성 요소(H|0>)는 제1 게이트(132)에 입력되어 $(m+1)^{th}$ 실행되고, 타겟 큐빗 중 제2 상태의 구성 요소(V|1>)는 제2 게이트(133)에 입력되어 $(n+1)^{th}$가 실행된다.

[0077] 타겟 큐빗 중 제1 상태의 구성 요소(H|0>)가 제1 게이트(132)에 입력되어 $(m+1)^{th}$ 실행된 후의 타겟 큐빗의 광자 상태($|\psi\rangle_m^H$)는 하기의 [수학식 7]과 같다.

[0079] [수학식 7]

[0080] $$|0\rangle \longrightarrow |\psi\rangle_m^H = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}\left(\cos\theta_M|0\rangle + \sin\theta_M|1\rangle\right)$$

[0081] $$\theta_M = \pi/2M.$$

[0083] 타겟 큐빗 중 제1 상태의 구성 요소(H|0>)가 제1 게이트(132)에 입력되어 $(m+1)^{th}$ 실행되는 동안, 타겟 큐빗 중 제2 상태의 구성 요소(V|0>)가 제2 게이트(133)에 입력되어 $(n+1)^{th}$ 실행된다. $(n+1)^{th}$ 만큼 제2 게이트(133)가 실행된 후에 제2 게이트(133)에서 출력되는 타겟 큐빗의 광자 상태는 하기의 [수학식 8]와 같다.

[0085] [수학식 8]

[0086] $$|\psi\rangle_{m+1,n}^H = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}\left(\cos\theta_M|0\rangle + \sin\theta_M\left(\cos n\theta_N|1\rangle + \sin n\theta_N|0\rangle\right)\right)$$

[0087] where $\theta_N = \pi/2N$

[0089] 이때, 마스터(110) 클럭의 제어 큐빗의 상태는 제2 상태(|1>)가 될 것이다. 따라서, 제1 상태의 구성 요소(H|0>)는 제1 게이트(132)에 입력되어 $(m+1)^{th}$ 실행되고, 제2 상태의 구성 요소(V|1>)는 제2 게이트(133)에 입력되어 $(n+1)^{th}$가 실행된다.

[0091] [수학식 9]

[0092] $$|\psi\rangle^{H}_{m+1,n_{PR}} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}(\cos\theta_M|0\rangle + \sin\theta_M(\cos(n+1)\theta_N|1\rangle + \sin(n+1)\theta_N|0\rangle)).$$

[0094] 채널 상에 흡수 물체가 존재하기 때문에 제1 상태의 구성 요소(H|0>)는 흡수 물체에 흡수된다. 제1 상태의 구성 요소(H|0>)는 제1 게이트(132)에 입력되어 $(m+1)^{th}$ 실행되고, 제2 상태의 구성 요소(V|1>)는 제2 게이트(133)에 입력되어 $(n+1)^{th}$가 실행된 후 제1 상태의 구성 요소(H|0>)의 상태는 하기의 [수학식 10]과 같다.

[0096] [수학식 10]

[0097] $$|\psi\rangle^{H}_{m+1,n+1} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}(\cos\theta_M|0\rangle + \sin\theta_M|1\rangle)$$

[0099] $(m+1)^{th}$의 제1 게이트(132) 및 $(n+2)^{th}$가 제2 게이트(133)가 실행된 후에 타겟 큐빗 중 제1 상태의 구성 요소(H|0>)는 하기의 [수학식 11]과 같다.

[0101] [수학식 11]

[0102] $$|\psi\rangle^{H}_{m+1,n+2} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}(\cos\theta_M|0\rangle + \sin\theta_M|1\rangle)$$

[0104] N번의 제2 게이트(133)가 실행된 후에 타겟 큐빗 중 제1 상태의 구성 요소(H|0>)의 상태는 하기의 [수학식 12]와 같다.

[0106] [수학식 12]

[0107] $$|\psi\rangle^{H}_{m+1,N} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}(\cos\theta_M|0\rangle + \sin\theta_M|1\rangle)$$

[0109] N번의 제2 게이트(133)가 실행된 후에 PBS_2(134)가 실행되며 PBS_2(134)에 의한 타겟 큐빗 중 제1 상태의 구성 요소(H|0>)의 상태는 아래의 [수학식 13]과 같다.

[0111] [수학식 13]

[0112] $$|\psi\rangle^{H}_{m+1,N_{PBS_2}} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}(\cos\theta_M|0\rangle + \sin\theta_M|1\rangle)$$

[0114] $|\psi\rangle^{H}_{m+2,0}$ 는 하기의 [수학식 14]와 같다.

[0116] [수학식 14]

[0117] $$|\psi\rangle^{H}_{m+2,N} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}[\cos 2\theta_M|0\rangle + \sin 2\theta_M|1\rangle]$$

[0119] 따라서, $|\psi\rangle^{H}_{M,N}$ 는 하기의 [수학식 15]와 같다.

[0121] [수학식 15]

[0122] $$|\psi\rangle_{M,N}^{\mathrm{H}} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}\left[\cos(M-m)\theta_M|0\rangle + \sin(M-m)\theta_M|1\rangle\right]$$

[0124] 이하에서는, 마스터(110) 클럭 및 슬레이브(120) 클럭은 동기화되지 않는 경우 제어 불가능한 게이트(130)의 제2 게이트(133)의 동작 과정을 설명하기로 한다.

[0125] [수학식 16]

[0126] $$|\psi\rangle_{m+1,n}^{\mathrm{V}} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}\left(\cos\theta_M|1\rangle + \sin\theta_M\left(\cos n\theta_N|0\rangle + \sin n\theta_N|1\rangle\right)\right)$$

[0128] 이때, 마스터(110) 클럭의 제어 큐빗의 상태는 제2 상태(|1>)가 될 것이다. 따라서, 제1 상태의 구성 요소(H|0>)는 제1 게이트(132)에 입력되어 $(m+1)^{th}$ 실행되고, 제2 상태의 구성 요소(V|1>)는 제2 게이트(133)에 입력되어 $(n+1)^{th}$가 실행된다.

[0130] [수학식 17]

[0131] $$|\psi\rangle_{m+1,n_{\mathrm{PR}}}^{\mathrm{V}} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}\left(\cos\theta_M|1\rangle + \sin\theta_M\left(\cos(n+1)\theta_N|0\rangle + \sin(n+1)\theta_N|1\rangle\right)\right)$$

[0133] 양자 채널 상에 흡수 물체가 존재하기 때문에 타겟 큐빗 중 2 상태의 구성 요소(V|1>)는 흡수 물체에 흡수된다. 제1 상태의 구성 요소(H|0>)는 제1 게이트(132)에 입력되어 $(m+1)^{th}$ 실행되고, 제2 상태의 구성 요소(V|1>)는 제2 게이트(133)에 입력되어 $(n+1)^{th}$가 실행된 후의 제2 상태의 구성 요소(V|1>)의 상태는 하기의 [수학식 18]과 같다.

[0135] [수학식 18]

[0136] $$|\psi\rangle_{m+1,n+1}^{\mathrm{V}} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}\left(\cos\theta_M|1\rangle + \sin\theta_M|0\rangle\right)$$

[0138] 제1 상태의 구성 요소(H|0>)는 제1 게이트(132)에 입력되어 $(m+1)^{th}$ 실행되고, 제2 상태의 구성 요소(V|1>)는 제2 게이트(133)에 입력되어 $(n+2)^{th}$가 실행된 후의 제2 상태의 구성 요소(V|1>)의 상태는 하기의 [수학식 19]과 같다.

[0140] [수학식 19]

[0141] $$|\psi\rangle_{m+1,n+2}^{\mathrm{V}} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}\left(\cos\theta_M|1\rangle + \sin\theta_M|0\rangle\right)$$

[0143] N번의 제2 게이트(133)가 실행된 후에 타겟 큐빗 중 제2 상태의 구성 요소(V|1>)의 상태는 아래의 [수학식 20]과 같다.

[0145] [수학식 20]

[0146] $$|\psi\rangle_{m+1,N}^{\mathrm{V}} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}\left(\cos\theta_M|1\rangle + \sin\theta_M|0\rangle\right)$$

[0148] N번의 제2 게이트(133)가 실행된 후에 PBS_2(134)가 실행되며 PBS_2에 의한 타겟 큐빗 중 제2 상태의 구성 요소(V|1>)의 상태는 아래의 [수학식 21]과 같다.

[0150] [수학식 21]

[0151] $$|\psi\rangle_{m+1,N_{\mathrm{PBS}_2}}^{\mathrm{V}} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}\left(\cos\theta_M|1\rangle + \sin\theta_M|0\rangle\right)$$

[0152] $|\psi\rangle_{m+2,0}^{\mathrm{V}}$ 는 하기의 [수학식 22]와 같다.

[0154] [수학식 22]

[0155] $$|\psi\rangle_{m+2,N}^{\mathrm{V}} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}\left[\cos 2\theta_M|1\rangle + \sin 2\theta_M|0\rangle\right]$$

[0157] 그러므로, $|\psi\rangle_{M,N}^{\mathrm{V}}$ 는 하기의 [수학식 23]과 같다.

[0159] [수학식 23]

[0160] $$|\psi\rangle_{M,N}^{\mathrm{V}} = \frac{\cos^{m-1}\theta_M}{\sqrt{2}}\left[\cos(M-m)\theta_M|1\rangle + \sin(M-m)\theta_M|0\rangle\right]$$

[0162] 상기와 같이, 제어 불가능한 게이트(130)가 종료된 후 제1 게이트(132)에서 출력된 타겟 큐빗의 광자 상태 및 제2 게이트(133)에서 출력된 타겟 큐빗의 광자 상태는 결합되며, 이와 같은 과정을 통해 슬레이브(120) 클럭의 제4 시점(t_5^b)에서 마스터(110) 클럭 및 슬레이브(120) 클럭은 동기화된다.

[0164] 도 2는 본 발명에 따른 양자 클럭 동기화 방법의 일 실시예를 설명하기 위한 흐름도이다.

[0165] 도 2를 참조하면, 단계 S210에서는 마스터 클럭 기준 제1 시점에 상기 마스터 클럭에 제어 큐빗을 입력한다. 이때, 제어 큐빗은 마스터 클럭에 입력되는 큐빗으로 전자를 의미한다.

[0166] 단계 S220에서는 슬레이브 클럭 기준 제1 시점에 슬레이브 클럭에 복수의 타겟 큐빗을 입력한다. 이때, 타겟 큐빗은 슬레이브 클럭에 입력되는 큐빗으로 광자를 의미한다.

[0167] 단계 S230에서는 상기 제어 큐빗이 제어 불가능한 게이트에 입력된 후 제어되는 동안에 상기 복수의 타켓 큐빗 각각을 상기 제어 불가능한 게이트에 입력한다.

[0168] 단계 S230에 대한 일 실시예에서, 마스터 클럭 기준 제2 시점 및 상기 슬레이브 클럭 기준 제2 시점에 동기화되는 경우, 상기 복수의 타겟 큐빗 중 특정 타겟 큐빗이 상기 제어 불가능한 게이트에 입력되는 순간 상기 제어 큐빗의 상태가 제2 상태에서 제1 상태(|0>)로 변경한다.

[0169] 단계 S230에 대한 다른 일 실시예에서, 마스터 클럭 기준 제2 시점 및 상기 슬레이브 클럭 기준 제2 시점에 동기화되지 않는 경우, 상기 슬레이브 클럭 기준 제2 시점 내지 제3 시점 사이에 상기 제어 큐빗의 상태가 상기 제1 상태에서 제2 상태(|1>)로 변경한다.

[0170] 그러므로, 슬레이브 클럭에서 출력된 타켓 큐빗의 상태는 슬레이브 클럭에 입력된 타켓 큐빗의 상태와 달라지게 될 것이다. 따라서, 슬레이브 클럭은 마스터 클럭으로부터 물리적 입자를 수신하거나 마스터 클럭에 물리적 입자를 전송하지 않아도 비동기를 검출할 수 있는 것이다.

[0171] 단계 S240에서는 상기 제어 불가능한 게이트에서 상기 제어 큐빗의 상태에 따라 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 변경되어 출력된다.

[0172] 단계 S240에 대한 일 실시예에서, 제어 큐빗의 상태가 제1 상태인 경우, 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 변경되지 않고 그대로 출력될 수 있다.

[0173] 단계 S240에 대한 다른 일 실시예에서, 제어 큐빗의 상태가 제2 상태인 경우, 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 변경된 후 출력될 수 있다.

[0174] 단계 S250에서는 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태 및 상기 제어 불가능한 게이트에서 출력된 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태의 비교 결과에 따라 슬레이브 클럭의 동기화 정확성을 검출한다.

[0175] 단계 S250의 일 실시예에서, 슬레이브 클럭 기준 제4 시점에서 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태 및 상기 제어 불가능한 게이트에서 출력된 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 동일하면 상기 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭이 동기화되었다고 판단할 수 있다.

[0176] 단계 S250의 다른 일 실시예에서, 슬레이브 클럭 기준 제4 시점에서 상기 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태 및 상기 제어 불가능한 게이트에서 출력된 복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 상이하면 상기 마스터 클럭 및 슬레이브 클럭이 동기화되지 않았다고 판단할 수 있다.

[0178] 이상과 같이 본 발명은 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 이는 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 따라서, 본 발명 사상은 아래에 기재된 특허청구범위에 의해서만 파악되어야 하고, 이의 균등 또는 등가적 변형 모두는 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

부호의 설명

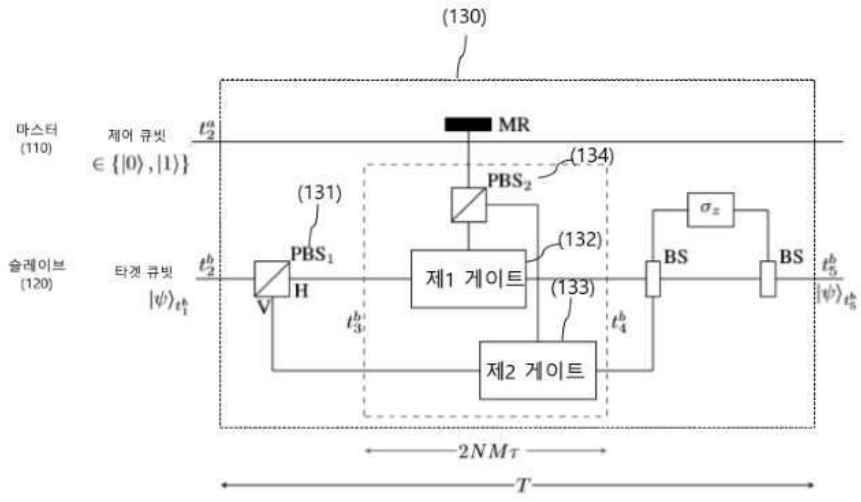
[0180] 110: 마스터

120: 슬레이브

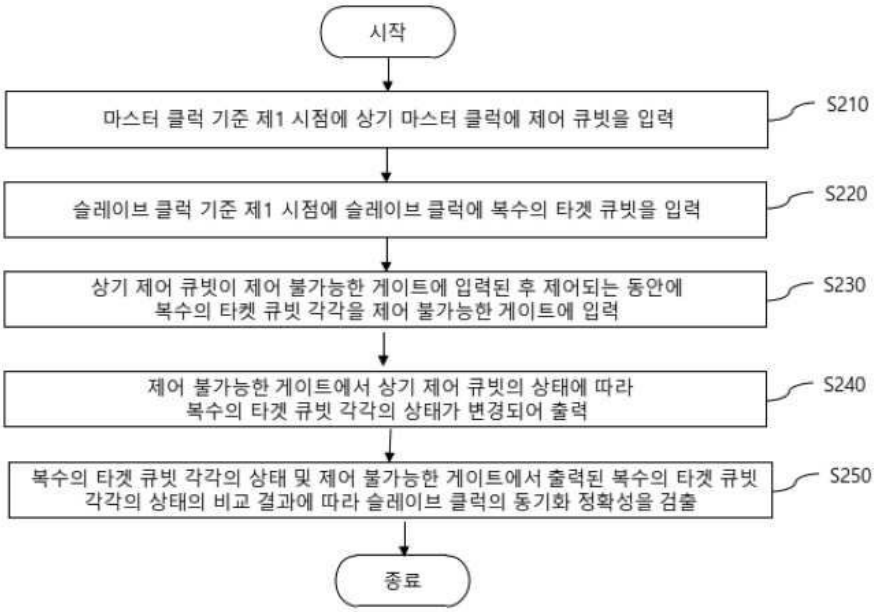
130: 제어 불가능한 게이트

도면

도면1



도면2


시작
마스터 클럭 기준 제1 시점에 상기 마스터 클럭에 제어 큐빗을 입력
S210
슬레이브 클럭 기준 제1 시점에 슬레이브 클럭에 복수의 타겟 큐빗을 입력
S220
상기 제어 큐빗이 제어 불가능한 게이트에 입력된 후 제어되는 동안에
복수의 타켓 큐빗 각각을 제어 불가능한 게이트에 입력
S230
제어 불가능한 게이트에서 상기 제어 큐빗의 상태에 따라
복수의 타겟 큐빗 각각의 상태가 변경되어 출력
S240
복수의 타겟 큐빗 각각의 상태 및 제어 불가능한 게이트에서 출력된 복수의 타겟 큐빗
각각의 상태의 비교 결과에 따라 슬레이브 클럭의 동기화 정확성을 검출
S250
종료