



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년03월22일

(11) 등록번호 10-2231135

(24) 등록일자 2021년03월17일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04L 7/00 (2006.01) H04L 7/027 (2006.01)
B82Y 10/00 (2017.01)

(52) CPC특허분류
H04L 7/0075 (2013.01)
H04L 7/0008 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2019-0141385

(22) 출원일자 2019년11월07일

심사청구일자 2019년11월07일

(56) 선행기술조사문헌

US20040078421 A1

(뒷면에 계속)

(73) 특허권자

경희대학교 산학협력단

경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)

(72) 발명자

신현동

경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호(영통동, 벽산삼익아파트)

유나이드 우르 레만

경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동)

올라 무하마드 아사드

경기도 수원시 영통구 청명로59번길 51, B03호 (영통동)

(74) 대리인

특허법인도담

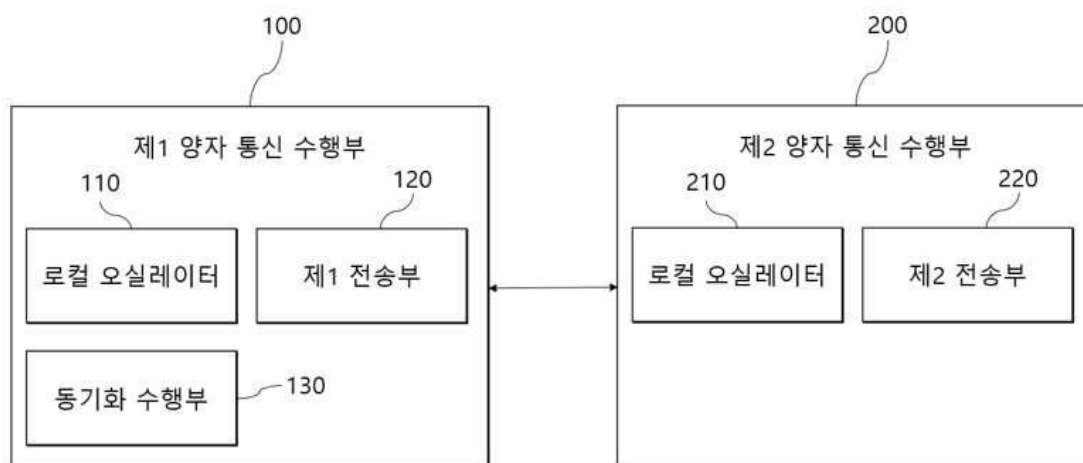
전체 청구항 수 : 총 14 항

심사관 : 김성태

(54) 발명의 명칭 공유 위상 기준이 없는 양자 동기화 방법 및 이를 이용한 양자 통신 시스템

(57) 요약

본 기술은 전자 장치에 관한 것으로, 본 기술에 따른 향상된 양자 동기화 방법은, 제1 양자 통신 수행부 및 제2 양자 통신 수행부를 포함하는 양자 시스템의 양자 동기화 방법에 있어서, 벨 상태로 얽힌 양자 쌍인 동기화 큐비트 중 어느 하나의 초기 양자를 상기 제2 양자 통신 수행부에 전송하는 단계, 상기 초기 양자가 상기 제2 양자 통신 수행부에서 유니타리 행렬에 따라 나중 양자로 진화되고, 상기 나중 양자가 상기 제1 양자 통신 수행부에 전송되는 단계 및 상기 초기 양자 및 상기 나중 양자를 기초로 중첩 측정을 수행하고, 상기 중첩 측정의 결과에 따라 양자 클럭 동기화를 수행하는 단계를 포함한다.

대표도 - 도1

(52) CPC특허분류

H04L 7/027 (2013.01)

B82Y 10/00 (2013.01)

(56) 선행기술조사문헌

Muhammad Asad Ullah et al., "Clock Synchronization in Distributed Quantum Networks", AQIS2018(2018.09.12.)*

US20170026095 A1

US20090164435 A1

US20180262243 A1

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2019R1A2C2007037

부처명 교육부

과제관리(전문)기관명 한국연구재단

연구사업명 이공분야기초연구사업/중견연구자지원사업

연구과제명 양자네트워킹 핵심기술 연구

기 여 율 1/1

과제수행기관명 경희대학교 산학협력단

연구기간 2019.03.01 ~ 2024.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

제1 양자 통신 수행부 및 제2 양자 통신 수행부를 포함하는 양자 시스템의 양자 동기화 방법에 있어서,
벨 상태로 얽힌 양자 쌍인 동기화 큐빗 중 어느 하나의 초기 양자를 상기 제2 양자 통신 수행부에 전송하는 단계;

상기 초기 양자가 상기 제2 양자 통신 수행부에서 유니타리 행렬에 따라 나중 양자로 진화되고, 상기 나중 양자가 상기 제1 양자 통신 수행부에 전송되는 단계;

상기 초기 양자 및 상기 나중 양자를 기초로 중첩 측정을 수행하고, 상기 중첩 측정의 결과에 따라 양자 클럭 동기화를 수행하는 단계; 및

상기 중첩 측정으로 측정된 순도가 1보다 작으면 상기 제2 양자 통신 수행부를 마디 노드로 할당하고, 상기 순도가 1이면 상기 제2 양자 통신 수행부를 분기 노드로 할당하는 단계를 포함하는 양자 동기화 방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 순도는,

동일한 큐빗의 시간 경과에 따른 이분 양자 상태의 중첩이고, $\text{Tr}(\rho_e^2) = P$ 로 결정되는 양자 동기화 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 중첩 측정으로 측정된 상대 위상이 미리 설정된 기준 위상보다 작거나 같으면, 상기 제1 양자 통신 수행부 또는 상기 제2 양자 통신 수행부 중 적어도 어느 하나를 클럭 큐빗을 이용하여 양자 동기화를 수행하는 단계를 더 포함하는 양자 동기화 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 중첩 측정으로 측정된 상대 위상이 미리 설정된 기준 위상보다 크면, 상기 제1 양자 통신 수행부 또는 상기 제2 양자 통신 수행부 중 적어도 어느 하나를 상기 동기화 큐빗을 이용하여 양자 동기화를 수행하는 단계를 더 포함하는 양자 동기화 방법.

청구항 5

제4항에 있어서, 상기 클럭 큐빗을 이용한 양자 동기화는,

결어긋남에 의한 동기화 제한을 가지고, 상기 결어긋남은 양자 일관성의 손실인 양자 동기화 방법.

청구항 6

제4항에 있어서, 상기 동기화 큐빗을 이용한 양자 동기화는,

동작 범위의 제한을 가지고, 상기 동작 범위는 상대 위상이 기준 위상보다 클 때 동기화가 가능한 양자 동기화 방법.

청구항 7

제6항에 있어서, 상기 기준 위상은,

상기 클럭 큐빗으로 동기화를 수행할 수 있는 동작 영역의 상한인 양자 동기화 방법.

청구항 8

제1 양자 통신 수행부 및 제2 양자 통신 수행부를 포함하는 양자 통신 시스템에 있어서,

벨 상태로 얽힌 양자 쌍인 동기화 큐빗 중 어느 하나의 초기 양자를 상기 제2 양자 통신 수행부에 전송하는 제1 전송부;

상기 초기 양자가 상기 제2 양자 통신 수행부에서 유니타리 행렬에 따라 나중 양자로 진화되고, 상기 나중 양자를 상기 제1 양자 통신 수행부에 전송하는 제2 전송부; 및

상기 초기 양자 및 상기 나중 양자를 기초로 중첩 측정을 수행하고, 상기 중첩 측정의 결과에 따라 양자 클럭 동기화를 수행하고, 상기 중첩 측정으로 측정된 순도가 1보다 작으면 상기 제2 양자 통신 수행부를 마디 노드로 할당하고, 상기 순도가 1이면 상기 제2 양자 통신 수행부를 분기 노드로 할당하는 동기화 수행부를 포함하는 양자 통신 시스템.

청구항 9

제8항에 있어서, 상기 순도는,

동일한 큐빗의 시간 경과에 따른 이분 양자 상태의 중첩이고, $\text{Tr}(\rho_e^2) = P$ 로 결정되는 양자 통신 시스템.

청구항 10

제8항에 있어서, 상기 동기화 수행부는,

상기 중첩 측정으로 측정된 상대 위상이 미리 설정된 기준 위상보다 작거나 같으면, 상기 제1 양자 통신 수행부 또는 상기 제2 양자 통신 수행부 중 적어도 어느 하나를 클럭 큐빗을 이용하여 양자 동기화를 수행하는 양자 통신 시스템.

청구항 11

제10항에 있어서, 상기 동기화 수행부는,

상기 중첩 측정으로 측정된 상대 위상이 미리 설정된 기준 위상보다 크면, 상기 제1 양자 통신 수행부 또는 상기 제2 양자 통신 수행부 중 적어도 어느 하나를 상기 동기화 큐빗을 이용하여 양자 동기화를 수행하는 양자 통신 시스템.

청구항 12

제11항에 있어서, 상기 클럭 큐빗을 이용한 양자 동기화는,
결어긋남에 의한 동기화 제한을 가지고, 상기 결어긋남은 양자 일관성의 손실인 양자 통신 시스템.

청구항 13

제11항에 있어서, 상기 동기화 큐빗을 이용한 양자 동기화는,
동작 범위의 제한을 가지고, 상기 동작 범위는 상대 위상이 기준 위상보다 클 때 동기화가 가능한 양자 통신 시스템.

청구항 14

제13항에 있어서, 상기 기준 위상은,
상기 클럭 큐빗으로 동기화를 수행할 수 있는 동작 영역의 상한인 양자 통신 시스템.

청구항 15

삭제

청구항 16

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 전자 장치에 관한 것으로, 보다 구체적으로 양자 통신 시스템 및 그것의 동작 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 양자역학(quantum mechanics)은 분자, 원자, 전자, 소립자와 미시적인 계의 현상을 다루는 즉, 작은 크기를 갖는 계의 현상을 연구하는 물리학의 분야이다. 양자역학을 이해하기 위해 ‘양자’와 ‘역학’의 의미를 각각 살펴볼 수 있다. ‘양자’로 번역된 영어의 quantum은 양을 의미하는 quantity에서 온 말로, 무엇인가 띄엄띄엄 떨어진 양으로 있는 것을 가리키는 말이다. ‘역학’은 말 그대로는 ‘힘의 학문’이지만, 실제로는 ‘이러저러한 힘을 받는 물체가 어떤 운동을 하게 되는지 밝히는 물리학의 한 이론’이라고 할 수 있다. 간단히 말해 ‘힘과 운동’의 이론이다. 이렇듯 양자역학이란 띄엄띄엄 떨어진 양으로 있는 것이 이러저러한 힘을 받으면 어떤 운동을 하게 되는지 밝히는 이론이라고 할 수 있다.

[0004] 양자 얽힘(quantum entanglement)은 양자 통신, 양자 암호 및 양자 계측학을 포함하는 양자 정보 처리의 재료(resource)이다. 양자역학에서, 양자 얽힘 또는 간단히 얽힘은 두 부분 계 사이에 존재할 수 있는 일련의 비고전적인 상관관계이다. 얽힘은 두 부분계가 공간적으로 서로 멀리 떨어져 있어도 존재할 수 있다. 예를 들어, 두 입자를 일정한 양자상태에 두어 두 입자의 스핀이 항상 반대가 되도록 할 수 있다. (예를 들어 두 스핀의 단일항 상태.) 양자역학에 따르면, 측정하기 전까지는 두 입자의 상태를 알 수 없다. 하지만 측정을 한다면, 그 순간 한 계의 상태가 결정되고 이는 즉시 그 계와 얽혀 있는 다른 계의 상태까지 결정하게 된다. 이는 마치 정보가 순식간에 한 계에서 다른 계로 이동한 것처럼 보일 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명의 실시 예는, 향상된 양자 동기화 방법 및 이를 이용한 양자 통신 시스템을 제공한다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 기술은 전자 장치에 관한 것으로, 본 기술에 따른 향상된 양자 동기화 방법은, 제1 양자 통신 수행부 및 제2 양자 통신 수행부를 포함하는 양자 시스템의 양자 동기화 방법에 있어서, 벨 상태로 얽힌 양자 쌍인 동기화 큐비트 중 어느 하나의 초기 양자를 상기 제2 양자 통신 수행부에 전송하는 단계, 상기 초기 양자가 상기 제2 양자 통신 수행부에서 유니타리 행렬에 따라 나중 양자로 진화되고, 상기 나중 양자가 상기 제1 양자 통신 수행부에 전송되는 단계 및 상기 초기 양자 및 상기 나중 양자를 기초로 중첩 측정을 수행하고, 상기 중첩 측정의 결과에 따라 양자 클럭 동기화를 수행하는 단계를 포함한다.

[0009] 본 기술에 따른 양자 통신 시스템은, 제1 양자 통신 수행부 및 제2 양자 통신 수행부를 포함하는 양자 통신 시스템에 있어서, 벨 상태로 얽힌 양자 쌍인 동기화 큐비트 중 어느 하나의 초기 양자를 상기 제2 양자 통신 수행부에 전송하는 제1 전송부, 상기 초기 양자가 상기 제2 양자 통신 수행부에서 유니타리 행렬에 따라 나중 양자로 진화되고, 상기 나중 양자를 상기 제1 양자 통신 수행부에 전송하는 제2 전송부 및 상기 초기 양자 및 상기 나중 양자를 기초로 중첩 측정을 수행하고, 상기 중첩 측정의 결과에 따라 양자 클럭 동기화를 수행하는 동기화 수행부를 포함한다.

발명의 효과

[0011] 본 기술에 따르면 사전에 설정된 공유 위상 기준이 없는 양자 동기화 방법이 제공된다.

[0012] 또한, 본 기술에 따르면 클라이언트에서의 별도의 양자 연산 및 양자 측정을 요하지 않는 양자 동기화 방법이 제공된다.

도면의 간단한 설명

[0014] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 양자 통신 시스템을 설명하기 위한 도면이다.

도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 클럭 큐비트 및 동기화 큐비트의 동작을 설명하기 위한 도면이다.

도 3은 본 발명의 실시 예에 따른 클럭 시스템의 통합을 설명하기 위한 도면이다.

도 4는 순도와 노이즈 파라미터의 관계를 설명하기 위한 그래프이다.

도 5는 본 발명의 실시 예에 따른 양자 클럭 동기화(QCS)를 설명하기 위한 도면이다.

도 6은 노이즈가 없을 때 상대 위상에 따른 동기화를 설명하기 위한 도면이다.

도 7은 상대 위상을 검출하기 위해 필요한 벨 상태 큐비트의 최소 카피수를 나타낸 그래프이다.

도 8은 노이즈 파라미터의 증가에 따라 요구되는 벨 상태 큐비트의 최소 카피수를 설명하기 위한 그래프이다.

도 9는 노이즈 파라미터에 따른 탈동기화 검출의 정확도를 설명하기 위한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0015] 본 명세서 또는 출원에 개시되어 있는 본 발명의 개념에 따른 실시 예들에 대해서 특정한 구조적 내지 기능적 설명들은 단지 본 발명의 개념에 따른 실시 예를 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로, 본 발명의 개념에 따른 실시 예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본 발명의 개념에 따른 실시 예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본 명세서 또는 출원에 설명된 실시 예들에 한정되는 것으로 해석되어서는 아니 된다.

[0016] 본 발명의 개념에 따른 실시 예는 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있으므로 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 본 명세서 또는 출원에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명의 개념에 따른 실시 예를 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0017] 제1 및/또는 제2 등의 용어는 다양한 구성 요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성 요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하는 목적으로만, 예컨대 본 발명의 개념에 따른 권리 범위로부터 이탈되지 않은 채, 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소는 제1 구성요소로도 명명될 수 있다.

[0018] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있

다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다. 구성요소들 간의 관계를 설명하는 다른 표현들, 즉 "~사이에"와 "바로 ~사이에" 또는 "~에 이웃하는"과 "~에 직접 이웃하는" 등도 마찬가지로 해석되어야 한다.

- [0019] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 서술된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0020] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 명세서에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0021] 실시 예를 설명함에 있어서 본 발명이 속하는 기술 분야에 익히 알려져 있고 본 발명과 직접적으로 관련이 없는 기술 내용에 대해서는 설명을 생략한다. 이는 불필요한 설명을 생략함으로써 본 발명의 요지를 흐리지 않고 더욱 명확히 전달하기 위함이다.
- [0022] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시 예를 설명함으로써, 본 발명을 상세히 설명한다. 이하, 본 발명의 실시 예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.
- [0023] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 양자 통신 시스템을 설명하기 위한 도면이다.
- [0024] 도 1을 참조하면, 본 발명의 실시 예에 따른 양자 통신 시스템은 제1 양자 통신 수행부(100) 및 제2 양자 통신 수행부(200)를 포함할 수 있다. 제1 양자 통신 수행부(100)와 제2 양자 통신 수행부(200)는 각각 하나의 노드를 구성할 수 있다.
- [0025] 제1 양자 통신 수행부(100) 및 제2 양자 통신 수행부(200)는 각각 서버와 클라이언트가 사용하는 양자 통신 수행부일 수 있다. 서버는 송신자로서 양자 채널(quantum channel)을 통해 양자 정보를, 고전 채널(Classical channel)을 통해 일반 정보를 클라이언트에게 전송할 수 있다.
- [0026] 제1 양자 통신 수행부(100)는 송신 기기로, 제2 양자 통신 수행부(200)는 수신 기기로 표시하였지만, 실시 예에 따라 그 역도 성립할 수 있다. 또한, 제1 양자 통신 수행부(100)가 송신 또는 수신 기기로 동작함에 따라, 제2 양자 통신 수행부(200)는 이에 대응하여 수신 또는 송신 기기로 동작할 수 있다.
- [0027] 제1 양자 통신 수행부(100)와 제2 양자 통신 수행부(200)는 양자 암호 통신을 통해 암호화된 양자 정보 및 일반 정보를 교환할 수 있다. 이를 위해 양자 시스템은 사전에 양자 얽힘(quantum entanglement)를 준비할 수 있다.
- [0028] 제1 양자 통신 수행부(100)가 서버로 동작하는 경우, 제1 양자 통신 수행부(100)는 로컬 오실레이터(110), 제1 전송부(120), 동기화 수행부(130)를 포함할 수 있다. 제2 양자 통신 수행부(100)가 클라이언트로 동작하는 경우, 제2 양자 통신 수행부(200)는 로컬 오실레이터(210), 제2 전송부(220)를 포함할 수 있다.
- [0029] 다만, 실시 예에 따라 제1 양자 통신 수행부(100)가 클라이언트로 동작하고, 제2 양자 통신 수행부(200)가 서버로 동작할 수도 있다. 이때 제2 양자 통신 수행부(200)는 동기화 수행부를 더 포함할 수 있다.
- [0030] 로컬 오실레이터(110, 210)는 주파수에 대해 서로 동기화되어 있을 수 있다. 양자 통신 수행부마다 기준이 되는 주파수가 서로 상이할 경우, 동기화가 파괴되고 정상적인 양자 통신을 수행할 수 없을 수 있다. 따라서, 양자 통신을 수행함에 앞서 주파수를 동기화하는 과정이 필수적일 수 있다.
- [0031] 주파수 탈동기화를 초래하는 로컬 큐비트 노이즈의 원인에는 1) 시간 척도의 이동, 2) 로컬 오실레이터의 주파수 불안정, 3) 안정적인 로컬 오실레이터에서 주파수의 시스템적 부정확성(systematic inaccuracy) 등이 있을 수 있다.
- [0032] 도 1은 두 개의 양자 통신 수행부(100, 200)를 도시하였지만, 실시 예에 따라 두 개 이상의 양자 통신 수행부가 포함될 수 있다. 복수의 양자 통신 수행부는 중앙 양자 네트워크(centralized quantum network, CQN)를 구성할 수 있다.

- [0033] 중앙 양자 네트워크는 동기화의 제어권이 중앙 노드(central node)에 있을 수 있다. 중앙 양자 네트워크에서는 중앙 노드의 주파수를 기준으로 중앙 노드에 연결된 노드들의 주파수 동기화가 수행될 수 있다.
- [0034] 중앙 양자 네트워크에서는 어느 하나의 노드에서 외부의 중력장 및/또는 전기장 등에 의해 임의의 큐비트가 손상되는 경우 전체 네트워크의 탈동기화(desynchronization)를 초래할 수 있다. 또한, 임의의 어느 하나의 노드의 큐비트가 손실되는 경우 전체 네트워크의 탈동기화를 초래할 수 있다.
- [0035] 임의의 노드에 대한 탈동기화는 전체 네트워크에 영향을 미칠 수 있고, 중앙 노드의 직접적인 로컬 오실레이터의 동기화는 결과적으로 부정확한 동기화를 초래할 수 있다.
- [0036] 본 발명의 양자 클럭 동기화(quantum clock synchronization, QCS)에서는, 중앙 양자 네트워크의 이러한 문제점을 해결하기 위해 분산 양자 네트워크(distributed quantum network, DQN)를 제안한다.
- [0037] 분산 양자 네트워크의 노드들은 분기 노드와 마디 노드로 구분될 수 있다. 분기 노드는 로컬 큐비트 노이즈의 영향을 받지 않는 노드일 수 있다. 마디 노드는 로컬 큐비트 노이즈의 영향을 받는 노드일 수 있다.
- [0038] 분산 양자 네트워크에서는 동기화의 제어권이 복수의 노드들(분기 노드)에 분산되어 있을 수 있다. 분기 노드의 주파수를 기준으로 마디 노드들의 주파수가 동기화 범위 내에 있는지 판단되고, 판단 결과에 따라 재동기화(resynchronization)가 수행될 수 있다.
- [0039] 구체적으로, 제1 전송부(120)는 벨 상태로 얽힌 양자 쌍인 동기화 큐비트 중 어느 하나의 초기 양자를 제2 양자 통신 수행부(200)에 전송할 수 있다. 동기화 큐비트는 사전에 벨 상태의 얽힌 상태로 존재하여 복수의 양자 통신 수행부 간 동기화에 사용되는 큐비트일 수 있다.
- [0040] 초기 양자는 동기화 큐비트에 포함되는 큐비트들 중 임의의 단일 큐비트일 수 있다. 초기 양자는 상이한 양자 통신 수행부에 전송되어도 벨 상태로 얽혀 있기 때문에 얽힌 상태의 다른 동기화 큐비트들과 중간 매개체 없이도 정보를 교환할 수 있는 특징이 있다.
- [0041] 제2 양자 통신 수행부(200)에 전송된 초기 양자는 유니타리 행렬에 따라 나중 양자로 진화될 수 있다. 유니타리 행렬은 자연적 해밀토니안(natural Hamiltonian) 하에서 별도의 양자 연산이나 양자 측정 없이 자연적으로 변화하는 양자 상태를 표현한 행렬일 수 있다.
- $$U' = e^{-i(t_1 - t_0)H_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -e^{-i\chi} \end{bmatrix}$$
- [0042]
- [0043] 유니타리 행렬은 상기 수학식으로 표현될 수 있다. 상대 위상(χ)은 일정한 시간동안($t_0 \sim t_1$)탈동기화에 따라 발생한 위상 변화일 수 있다.
- [0044] 제2 전송부(220)는 나중 양자를 제1 양자 통신 수행부(100)에 전송할 수 있다. 동기화 수행부(130)는 초기 양자와 나중 양자를 기초로 중첩 측정을 수행하고, 중첩 측정 결과에 따라 양자 클럭 동기화를 수행할 수 있다.
- [0045] 중첩 측정은 진화 전(초기 양자)의 양자 상태와 진화 후(나중 양자)의 양자 상태에서부터 큐비트의 순도를 측정하는 동작을 포함할 수 있다. 측정된 순도로부터 로컬 큐비트 노이즈를 검출할 수 있다. 순도는 동일한 큐비트의 시간 경과에 따른 이분 양자 상태의 중첩으로 정의될 수 있다.
- [0046] 또한, 중첩 측정을 통해 탈동기화에 따라 발생한 위상 변화인 상대 위상을 측정할 수 있다. 측정된 상대 위상을 통해 탈동기화를 판단하고, 미리 설정된 위상인 기준 위상과 비교하여, 동기화를 수행할 큐비트를 클럭 큐비트 또는 동기화 큐비트로 결정할 수 있다.
- [0047] 분산 양자 네트워크에서는 어느 하나의 노드에서 양자가 손실되더라도 해당 노드의 탈동기화를 초래할 뿐 전체 네트워크에 영향을 미치지 않을 수 있다. 따라서, 분산 양자 네트워크는 중앙 양자 네트워크에 비해 탈동기화를 야기하는 외부 영향으로부터 보호될 수 있고, 탈동기화가 발생한 노드에 대한 독립적 재동기화가 가능하므로 탄력적이고 효율적인 동기화 수행이 가능할 수 있다.
- [0048] 종래 양자 재동기화 방법에서는 서버와 클라이언트 간에 사전에 동기화 기준을 정하고, 공유하는 과정이 필요할 수 있다. 이러한 사전 작업은 양자 통신의 지연을 발생시키고 송수신하는 정보의 양을 증가시켜 양자 통신 시스템

템 전체의 워크로드를 증가시킬 수 있다.

- [0049] 본 기술에 따른 양자 동기화 방법은 사전에 설정된 공유 위상 기준이 필요하지 않을 수 있다. 벨 상태의 양자 쌍 중 하나를 클라이언트에 전송하고, 일정 시간 이후 진화된 양자를 다시 수신하여, 변화된 양자 상태를 기초로 클라이언트의 양자 클럭 동기화를 진행할 수 있다.
- [0050] 또한, 본 기술에 따르면 클라이언트에서 별도의 양자 연산 및 양자 측정을 요하지 않는 양자 동기화 방법이 제공될 수 있다. 클라이언트에 전송된 양자는 단순히 시간이 경과함에 따라 유니타리 행렬에 따라 양자 상태가 진화할 수 있다.
- [0051] 노이즈가 있을 때와 없을 때 추정된 최종 양자 상태와 비교하여, 클라이언트의 로컬 오실레이터의 탈동기화 여부를 판단하고 양자 클럭 동기화 수행이 가능할 수 있다.
- [0052] 도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 클럭 큐비트 및 동기화 큐비트의 동작을 설명하기 위한 도면이다.
- [0053] 도 2를 참조하면, 분산 양자 네트워크(DQN)는 복수의 분기 노드 및 마디 노드를 포함할 수 있다. 각각의 노드들은 로컬 오실레이터, 클럭 큐비트 및 동기화 큐비트를 포함할 수 있다.
- [0054] 도 1의 제1 양자 통신 수행부와 제2 양자 통신 수행부는 분기 노드가 될 수도, 마디 노드가 될 수도 있다. 설명의 편의를 위해 제1 양자 통신 수행부(100)는 분기 노드b, 제2 양자 통신 수행부(200)는 마디 노드c라고 가정할 수 있다. 이하, 분산 양자 네트워크의 양자 클럭 동기화 과정에 대해 분기 노드b와 마디 노드c를 예시로 설명하기로 한다.
- [0055] 분기 노드b는, 분기 노드b에 연결된 마디 노드(마디 노드c)의 양자 클럭 동기화를 수행할 수 있다. 분기 노드b는 먼저 마디 노드c의 탈동기화 여부를 판단할 수 있다.
- [0056] 탈동기화 여부를 판단하기 위해 클럭 큐비트c와 동기화 큐비트가 사용될 수 있다. 클럭 큐비트는 연속된 GHZ 상태의 큐비트들로 구성되어, 상기 클럭 큐비트가 포함된 노드의 동기화에 사용될 수 있다.
- [0057] 클럭 큐비트는 낮은 에너지 상태와 높은 에너지 상태를 ω_0 의 주파수로 전이할 수 있다. 클럭 큐비트는 로컬 오실레이터의 주파수 ν 에 대해, 조사시간 $T_c \propto \nu^{-1}$ 동안 유니타리 행렬에 따라 자연스럽게 진화될 수 있고, 진화 전후의 상태 변화를 통해 탈동기화 여부가 판단될 수 있다.
- [0058] 로컬 오실레이터의 선폭이 γ 일 때, 최적의 조사시간은 수학적 식 1일 수 있다. τ 는 로컬 오실레이터의 안정화를 위한 평균적인 소요시간일 수 있다.

수학적 식 1

$$T_{c,opt} = \frac{\pi}{\sqrt{2\gamma\sqrt{\log(\gamma\tau N)}}}$$

- [0059]
- [0060] 클럭 큐비트를 통해 달성 가능한 최대 양자 클럭 동기화인 클럭 큐비트 한계($|\delta|$)는 로컬 오실레이터의 선폭(γ)에 의해 제한될 수 있다($|\delta| \leq \gamma$). 클럭 큐비트 한계는 로컬 오실레이터의 주파수와 클럭 큐비트의 전이 주파수의 차이($\delta = \nu - \omega_0$)일 수 있다.
- [0061] 지만 효과(Zeeman effect) 또는 스타크 효과(Stark effect)를 야기하는 중력장, 전기장 등에 의한 로컬 큐비트 노이즈로부터 클럭 큐비트 한계를 초과하는 주파수 이동이 발생할 수 있다($|\delta| > \gamma$). 이 경우, 클럭 큐비트를 이용한 양자 클럭 동기화는 불가능하고 동기화 큐비트를 이용한 양자 클럭 동기화가 가능할 수 있다.
- [0062] 임의의 두 노드는 벨 상태로 얽혀 있는 동기화 큐비트를 공유할 수 있다. 도 2에서, 분기 노드b와 마디 노드c는 동기화 큐비트를 공유하고 있을 수 있다. 동기화 큐비트를 통해 분산 양자 네트워크에 새롭게 추가되는 노드를 분기

노드로 할당할지 또는 마디 노드로 할당할지 여부를 판단할 수 있다. 이에 관하여는 도 3에서 후술하기로 한다.

[0063] 또한, 동기화 큐빗을 통해 분산 양자 네트워크는 양자 클럭 동기화에 필요한 중첩 측정을 수행할 수 있다. 중첩 측정을 통해 문제가 있는 노드를 검출할 수 있다. 이에 관하여는 도 5에서 후술하기로 한다.

[0064] 다시 도 2를 참조하면, 마디 노드 $c(200)$ 에서 로컬 클럭 노이즈의 하나인 결어긋남(decoherence)이 발생할 수 있다. 결어긋남은 양자 일관성(coherence)의 손실일 수 있다.

[0065] 양자 상태로 인코딩된 양자 정보에 대해 양자 컴퓨팅, 양자 통신을 수행하기 위해서는 명확한 위상 관계가 필요할 수 있다. 상이한 상태들 간에 명확한 위상 관계 존재하면 시스템은 일관성을 가질 수 있다.

[0066] 양자 통신 시스템이 완벽하게 분리되었다면 일관성을 무한정 유지할 수 있으나, 그것을 조작하거나 조사하는 것을 불가능할 수 있다. 결어긋남은 고전 역학에서 마찰에 의해 에너지가 손실되는 것에 비유될 수 있다. 예를 들어, 측정하는 동안 완벽하게 격리되지 않으면 일관성이 주변 환경과 공유되고, 시간이 지남에 따라 손실될 수 있다.

[0067] 클럭 큐빗 c 는 마디 노드 c 의 탈동기화를 판단하기 위해 조사시간 $T_c \propto \nu^{-1}$ 동안 자연적으로 진화될 수 있다. 클럭 큐빗 c 는 조사시간동안 해밀토니안 역학하에 자연적으로 진화할 수 있고, 진화 전후의 상태 변화를 통해 재동기화가 수행될 수 있다.

[0068] 다만, 클럭 큐빗 한계($|\delta|$)가 로컬 오실레이터(210)의 선폭(γ)을 초과한 경우, 클럭 큐빗 c 를 통한 양자 클럭 동기화가 불가능할 수 있다. 동기화 큐빗은 분기 노드 b 와 마디 노드 c 에 벨 상태의 양자 쌍으로 공유되어 있다가 양자 클럭 동기화에 사용될 수 있다.

[0069] 도 3은 본 발명의 실시 예에 따른 클럭 시스템의 통합을 설명하기 위한 도면이다.

[0070] 도 3을 참조하면, 도 3은 분산 양자 네트워크(DQN)에 새로운 클럭 시스템(Alice)가 통합(integration)되는 경우, 클럭 시스템(Alice)를 분기 노드 또는 마디 노드로 할당할지 여부를 판단하는 과정일 수 있다.

[0071] 인접 분기 노드와 클럭 시스템(Alice)은 벨 상태로 얽힌 상태의 양자 쌍을 공유할 수 있다. 이 양자 쌍은 동기화 큐빗일 수 있다. 분기 노드는 인접한 노드에 양자 클럭 동기화를 수행할 수 있다. 따라서, 인접 분기 노드는 클럭 시스템(Alice)에 대해 양자 클럭 동기화를 수행하고, 수행 결과에 따라 분기 노드 또는 마디 노드에 클럭 시스템(Alice)을 할당할 수 있다.

[0072] 벨 상태의 양자 얽힘을 형성한 동기화 큐빗은 싱글렛 상태(singlet state)일 수 있다. 싱글렛 상태는 두 입자를 일정한 양자 상태에 두어 두 입자의 스핀이 반대가 되게 한 상태일 수 있다.

[0073] 인접 분기 노드는 $|\Psi^-\rangle = 1/\sqrt{2}(|10\rangle - |01\rangle)$ 싱글렛 상태의 동기화 큐빗을 준비하고, 이중 하나의 동기화 큐빗을 클럭 시스템(Alice)에 전송할 수 있다.

[0074] 클럭 시스템(Alice)에 로컬 큐빗 노이즈가 존재하지 않으면, 인접 분기 노드의 큐빗과 클럭 시스템(Alice)의 큐빗은 모두 자연적 해밀토니안(H_0) 하에서 유니타리 행렬에 따라 진화할 수 있다. 유니타리 행렬은 자연적 해밀토니안(natural Hamiltonian) 하에서 별도의 양자 연산이나 양자 측정 없이 자연적으로 변화하는 양자 상태를 표현한 행렬일 수 있다.

[0075] 자연적 해밀토니안(H_0)과 유니타리 행렬(U')은 수학식 2일 수 있다.

수학식 2

$$H_0 = \frac{\hbar}{2} \begin{bmatrix} \omega_0 & 0 \\ 0 & -\omega_0 \end{bmatrix}$$

[0076]

$$U' = e^{-i(t_1 - t_0)H_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -e^{-i\lambda} \end{bmatrix}$$

[0077]

[0078] 인접 분기 노드의 큐빗과 클럭 시스템(Alice)의 큐빗은 자연적 해밀토니안 진화를 거치더라도, 싱글렛 상태의 대칭성(symmetry)에 의해 싱글렛 상태 자체는 변하지 않을 수 있다.

[0079] 클럭 시스템(Alice)에 로컬 큐빗 노이즈가 존재하면, 싱글렛 상태는 노이즈 맵(noise map) 하에서 진화할 수 있다. 로컬 큐빗 노이즈는 위상-공변량 노이즈(phase-covariant noise)일 수 있다.

[0080] 위상-공변량 노이즈는 싱글렛 상태를 노이즈 혼합 상태($\rho_{t_0}^{\text{noise}}$)로 변환할 수 있다. 따라서, 클럭 시스템(Alice)에 로컬 큐빗 노이즈의 존재 여부에 따라 싱글렛 상태는 처음과 상이하게 진화될 수 있다.

[0081] 로컬 큐빗 노이즈의 검출에는 중첩 측정이 사용될 수 있다. 중첩 측정으로 큐빗의 순도를 측정하고, 순도로부터 로컬 큐빗 노이즈를 검출할 수 있다. 순도는 동일한 큐빗의 시간 경과에 따른 이분 양자 상태의 중첩으로 정의될 수 있다(수학식 3).

수학식 3

$$\text{Tr}(\rho_e^2) = P$$

[0082]

[0083] 인접 분기 노드에서 클럭 시스템(Alice)로 제공된 큐빗은, 클럭 시스템(Alice)에서 자연적 해밀토니안 또는 노이즈 맵 하에서 일정한 시간동안 진화된 후, 다시 인접 분기 노드로 회귀할 수 있다. 인접 분기 노드는 클럭 시스템(Alice)으로 전송되기 전의 큐빗 상태와 다시 인접 분기 노드로 돌아온 큐빗 상태의 중첩으로부터 순도를 측정할 수 있다.

[0084] 순도는 1보다 같거나 작은 값을 가질 수 있다. 순도가 1이면 로컬 큐빗 노이즈가 존재하지 않는다고 판단될 수 있다. 순도가 1보다 작으면 로컬 큐빗 노이즈가 존재한다고 판단될 수 있다.

[0085] 전술한 바와 같이 분기 노드는 로컬 큐빗 노이즈의 영향을 받지 않는 노드일 수 있다. 따라서, 순도가 1이면 클럭 시스템(Alice)은 로컬 큐빗 노이즈가 존재하지 않으므로 분기 노드에 할당될 수 있다.

[0086] 반면, 마디 노드는 로컬 큐빗 노이즈의 영향을 받는 노드일 수 있다. 따라서, 순도가 1보다 작으면 클럭 시스템(Alice)은 로컬 큐빗 노이즈가 존재하므로 마디 노드에 할당될 수 있다.

[0087] 도 4는 순도와 노이즈 파라미터의 관계를 설명하기 위한 그래프이다.

[0088] 도 4를 참조하면, (a) 탈분극 노이즈와 (b) 진폭 감쇠 노이즈에서 순도(P)와 노이즈 파라미터(p)의 관계를 도시하고 있다. 로컬 큐빗 노이즈는 탈분극 노이즈와 진폭 감쇠 노이즈를 포함할 수 있다. 탈분극 노이즈와 진폭 감쇠 노이즈는 양자 정보 통신의 주된 노이즈 요인일 수 있다. 이하 탈분극 노이즈와 진폭 감쇠 노이즈를 통해 순도(P)를 설명하기로 한다.

[0089] 탈분극 노이즈는 양자 정보 통신에서 큐빗을 통해 전송된 양자 정보의 손실을 가져오는 가장 치명적인 노이즈일 수 있다. 탈분극 노이즈는 크라우스 연산자(Kraus operator)와 파울리 연산자(Pauli operator)를 통해 수학식 4와 같이 표현될 수 있다.

수학식 4

$$\rho_{t_0} \xrightarrow{\mathcal{N}_{\text{dc}}(\rho)} \rho_{t_0}^{\text{de}} = (K_0 \otimes I) \rho_{t_0} (K_0 \otimes I)^\dagger + \sum_{i=x,y,z} (K_i \otimes I) \rho_{t_0} (K_i \otimes I)^\dagger$$

[0090]

[0091]

이때 $\rho_{t_0}^{\text{de}} = \begin{bmatrix} p/4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 - p/4 & (p-1)/2 & 0 \\ 0 & (p-1)/2 & 1/2 - p/4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p/4 \end{bmatrix}$ 이고, $K_0 = \sqrt{1-3p/4} I$, $K_i = \sqrt{p/4}$ 일 수 있다.

[0092]

탈분극 노이즈의 순도(P)는 수학식 5로 결정될 수 있다.

수학식 5

[0093]

$$P_{t_0}|_{\text{de}} = \text{Tr} \left((\rho_{t_1}^{\text{de}})^2 \right) = \frac{3p^2}{4} - \frac{3p}{2} + 1$$

[0094]

진폭 감쇠 노이즈는 크라우스 연산자(Kraus operator)를 통해 아래 수학식 6과 같이 표현될 수 있다.

수학식 6

[0095]

$$\rho_{t_0} \xrightarrow{\mathcal{N}_{\text{ad}}(\rho)} \rho_{t_0}^{\text{ad}} = (K_0 \otimes I) \rho_{t_0} (K_0 \otimes I)^\dagger + (K_1 \otimes I) \rho_{t_0} (K_1 \otimes I)^\dagger$$

[0096]

이때, $\rho_{t_0}^{\text{ad}} = \begin{bmatrix} \eta/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & -(\sqrt{1-\eta})/2 & 0 \\ 0 & -(\sqrt{1-\eta})/2 & (1-\eta)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 이고, $K_0 = |0\rangle\langle 0| + \sqrt{1-\eta}|1\rangle\langle 1|$ and $K_1 = \sqrt{\eta}|0\rangle\langle 1|$ 일 수 있다.

[0097]

진폭 감쇠 노이즈의 순도(P)는 수학식 7로 결정될 수 있다.

수학식 7

[0098]

$$P_{t_0}|_{\text{ad}} = \text{Tr} \left((\rho_{t_1}^{\text{ad}})^2 \right) = 1 + \frac{\eta^2}{2} - \eta$$

[0099]

탈분극 노이즈의 노이즈 파라미터에 따른 순도 그래프와, (b) 진폭 감쇠 노이즈의 노이즈 파라미터에 따른 순도 그래프로부터, 노이즈의 세기를 나타내는 노이즈 파라미터가 증가할수록 순도는 감소함을 알 수 있다.

[0100]

도 5는 본 발명의 실시 예에 따른 양자 클럭 동기화(QCS)를 설명하기 위한 도면이다.

[0101]

도 5를 참조하면, 임의의 두 노드 사이의 중첩 측정을 통해 문제가 있는 노드를 검출할 수 있다. 검출된 노드에 대해 가능한 모든 동기화 자원(resource)을 집중하여 재동기화의 수행이 가능할 수 있다.

[0102]

전술한 바와 같이, 클럭 큐빗 한계가 로컬 오실레이션의 선폭보다 같거나 작으면 재동기화는 클럭 큐빗을 통해 수행되고($|\delta| \leq \gamma$), 클럭 큐빗 한계가 로컬 오실레이션의 선폭보다 크면 재동기화는 동기화 큐빗을 통해 수행될 수 있다($|\delta| > \gamma$).

[0103]

동기화 큐빗을 통해 재동기화를 수행하기에 앞서 노이즈가 존재하는 문제 노드를 검출할 수 있다. 중첩 측정은 벨 상태로 얽힌 양자 쌍으로부터, 노드 사이의 상대 위상을 측정하는 동작일 수 있다. 중첩 측정은 인접한 노드

간에 중복적으로 수행됨으로써 문제가 있는 노드가 특정될 수 있다.

- [0104] 측정된 두 양자 상태에 대해 상대 위상(χ)은 $\text{Tr}(\rho_{t_0}\rho_{t_1})$ 로 결정될 수 있다. S501 단계에서 먼저 분기 노드 B와 마디 노드C 간에 중첩 측정이 수행될 수 있다.
- [0105] 기준 위상(χ_0)은 클럭 큐비트로 동기화를 수행할 수 있는 동작 영역의 상한일 수 있다. 즉, 기준 위상보다 큰 위상에서는 클럭 큐비트로 동기화가 불가능하고 주파수 큐비트로 동기화를 수행할 수 있다.
- [0106] S503 단계에서, 중첩 측정을 통해 측정된 상대 위상과 기준 위상을 비교하여, 상대 위상이 기준 위상보다 작으면 동기화 큐비트에 의한 양자 클럭 동기화가 불필요하므로, 상대 위상이 기준 위상보다 클 때까지 S501 단계의 중첩 측정을 반복하여 수행할 수 있다.
- [0107] 상대 위상이 기준 위상 보다 크면 동기화 큐비트에 의한 양자 클럭 동기화가 수행될 수 있다. 도면에는 도시되지 않았지만, 분기 노드A에 대한 중첩 측정은 아직 수행되지 않았으므로, S503 단계와 S505 단계 사이에 분기 노드 A와 분기 노드B 간에 중첩 측정을 수행하여 상대 위상(χ')를 측정할 수 있다.
- [0108] S505 단계에서, 상대 위상(χ')이 기준 위상(χ_0)보다 크면 분기 노드A와 분기 노드B 간에 동기화 큐비트에 의한 양자 클럭 동기화가 필요하다고 판단될 수 있다.
- [0109] S503 단계 및 S505 단계를 통해 문제가 있는 노드를 특정할 수 있다. 구체적으로, S503 단계에서 상대 위상(χ)이 기준 위상(χ_0)보다 크면 분기 노드B와 마디 노드C 중 적어도 어느 하나가 동기화 큐비트에 의한 양자 클럭 동기화가 필요하다고 판단될 수 있다.
- [0110] 이후 S505 단계에서 상대 위상(χ')과 기준 위상(χ_0)을 비교하여, 상대 위상(χ')이 기준 위상(χ_0)보다 크면, 분기 노드A와 분기 노드B 중 적어도 어느 하나가 동기화 큐비트에 의한 양자 클럭 동기화가 필요하다고 판단될 수 있다.
- [0111] S503 단계 및 S505 단계에서 상대 위상(χ)와 상대 위상(χ')이 모두 기준 위상(χ_0)보다 크면, 분기 노드B가 동기화 큐비트에 의한 양자 클럭 동기화가 필요한 노드라고 판단될 수 있다. 이 경우 양자 통신 시스템은 S507 단계를 수행하며, 분기 노드의 동기화는 동작 범위(기준 위상보다 큰 위상차에서 동기화의 수행이 가능함)의 제한을 가질 수 있다.
- [0112] S507 단계에서, 분기 노드B에서 양자 클럭 동기화가 수행될 수 있다. 두 노드는 벨 상태의 양자 쌍을 공유하는데, 각 양자는 자연적 해밀토니안 하에서 진화하고, 일정한 시간이 흐른 뒤 양자 상태는 수학식 8과 같을 수 있다.

수학식 8

[0113]
$$|\Phi_{t_1}\rangle = U' \otimes U_{\text{Branch}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \right) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + e^{-i\chi} |11\rangle)$$

- [0114] 상기 수학식 8에서 상대 위상(χ)은 분기 노드B의 부정확성을 판단하는 지표로 사용될 수 있다. 상대 위상(χ)은 기준 위상(χ_0)보다 크다는 동작 범위의 제한을 가질 수 있다.
- [0115] 진화 전후 양자 상태의 중첩 측정은 수학식 9로 결정될 수 있고, 수학식 8에서 중첩 측정은 양자 상태의 순도 $(P_{\rho_{t_0}}, P_{\rho_{t_1}})$, 양자 사이의 거리(D)로 표현될 수 있다. 이때 $D = \text{Tr}((\rho_{t_1} - \rho_{t_0})^\dagger(\rho_{t_1} - \rho_{t_0})) = 1 - \cos(\chi)$ 일 수 있다.

수학식 12

$$N'_{\min} = \left[\frac{1}{3D} \left(\sqrt{(1+P-\frac{D}{2})(1-P+\frac{D}{2})} + \sqrt{(1+P-2D)(1-P+2D)} \right) \right]^2$$

[0127]

[0128]

도 6은 노이즈가 없을 때 상대 위상에 따른 동기화를 설명하기 위한 도면이다.

[0129]

도 6을 참조하면, 클럭 큐빗 또는 동기화 큐빗에 의해 동기화가 수행될지 여부는 상대 위상(χ)에 따라 결정될 수 있다.

[0130]

로컬 오실레이터에서 탈동기화가 발생되면, 탈동기화에서 발생된 상대 위상(χ)이 양 또는 음의 값을 가지는지에 따라 지상(lead)/진상(lag)으로 구분될 수 있고, 상대 위상의 절대 값의 크기에 따라 동기화를 수행할 큐빗으로 클럭 큐빗/동기화 큐빗으로 구분될 수 있다.

[0131]

구체적으로, 상대 위상(χ)이 양의 값을 가지면 지상($|\Phi_{\text{lead}}\rangle$), 음의 값을 가지면 진상($|\Phi_{\text{lag}}\rangle$)일 수 있다.

[0132]

상대 위상(χ)이 빨간색 음영으로 표시된 부분에 포함되면, 재동기화는 클럭 큐빗을 통해 수행될 수 있다. 도 5에서 전술한 바와 같이, 클럭 큐빗에 의한 동기화는 결어긋남에 의한 제한을 가질 수 있다.

[0133]

상대 위상(χ)이 빨간색 음영으로 표시된 부분에 포함되지 않으면, 재동기화는 동기화 큐빗을 통해 수행될 수 있다. 도 5에서 전술한 바와 같이, 동기화 큐빗에 의한 동기화는 동적 범위에 의한 제한을 가질 수 있다.

[0134]

도 6에서, 동적 범위의 제한은 빨간색 음영 부분을 제외한 나머지 위상 범위에서 동기화가 수행되어야 함을 의미할 수 있다.

[0135]

도 7은 상대 위상을 검출하기 위해 필요한 벨 상태 큐빗의 최소 카피수를 나타낸 그래프이다.

[0136]

도 7을 참조하면, 로컬 큐빗 노이즈가 없을 때 상대 위상(χ)을 검출하기 위한 벨 상태의 최소 카피수는 상대 위상(χ)의 절대값에 반비례함을 확인할 수 있다.

[0137]

N_0 개의 벨 상태 카피수에서, 양자 클럭 동기화는 빨간 점선으로 표시된 기준 위상(χ_0)의 절대값보다 클 때 수행될 수 있다.

[0138]

클럭 큐빗의 로컬 오실레이터 안정화의 기준 위상(χ_0)이 더 넓은 범위를 가질 경우, 중첩 측정은 양자 통신 시스템의 부정확성을 검출하기 위해 더 적은 수의 벨 상태 카피수를 필요로 할 수 있다.

[0139]

도 8은 노이즈 파라미터의 증가에 따라 요구되는 벨 상태 큐빗의 최소 카피수를 설명하기 위한 그래프이다.

[0140]

도 8을 참조하면, 동일 상대 위상(χ)에서, 화살표로 표시된 노이즈 파라미터의 증가에 따라 벨 상태의 최소 카피수가 증가함을 알 수 있다.

[0141]

(a) 탈분극 노이즈에서 노이즈의 세기가 증가함에 따라 노이즈 파라미터(p)는 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.99로 점차 증가할 수 있다. 화살표 방향을 보면, 동일한 상대 위상(χ)을 검출하기 위한 벨 상태의 최소한의 카피수는 노이즈 파라미터(p)의 증가에 따라 함께 증가되는 것을 알 수 있다.

[0142]

(b) 진폭 감쇠 노이즈에서 노이즈의 세기가 증가함에 따라 노이즈 파라미터(p)는 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.99로 점차 증가할 수 있다. 화살표 방향을 보면, 동일한 상대 위상(χ)을 검출하기 위한 벨 상태의 최소한의 카피수는 노이즈 파라미터(p)의 증가에 따라 함께 증가되는 것을 알 수 있다.

[0143]

도 9는 노이즈 파라미터에 따른 탈동기화 검출의 정확도를 설명하기 위한 도면이다.

[0144]

도 9를 참조하면, 도 9는 노이즈 파라미터(p)에 따른 양자 피서 정보를 도시하고 있다. 벨 상태의 양자 쌍은 다소 부정확하지만 최대 동적 범위의 추정치를 제공할 수 있다. 탈동기화 검출을 위한 최적의 양자 상태를 선택하

기 위한 요인에는 1) 동적 범위, 2) 양자 피서 정보가 있을 수 있다.

[0145] n분 GHZ 상태(n-partite GHZ state)에서 큐비트의 수가 증가할수록 동적 범위는 감소할 수 있다. 탈동기화 검출 정확도의 지표인 상대 위상의 평균 제곱 오차는 양자 피서 정보의 역수를 하한으로 가질 수 있다(수학식 13). 양자 피서 정보는 수학식 14로 결정될 수 있다.

수학식 13

$$\text{MSE}(\hat{\chi}_n) \geq \frac{1}{r\mathcal{F}},$$

[0146]

수학식 14

$$\mathcal{F} = \sum_{j=1}^d 4\lambda_j \langle \Delta^2 H \rangle_j - \sum_{j \neq k} \frac{8\lambda_j \lambda_k}{\lambda_j + \lambda_k} |\langle \psi_j | H | \psi_k \rangle|^2$$

[0147]

[0148] 달성 가능한 최대 검출 정확도는 하이젠베르크 한계일 수 있다. 도 9에서 (a) 탈분극 노이즈와 (b) 진폭 감쇠 노이즈의 노이즈 파라미터가 0일 때, 양자 피서 정보는 양자 수(n)의 제곱의 역수, 즉 하이젠베르크 한계에 있는 것을 확인할 수 있다.

[0149] 노이즈 파라미터가 증가할수록 양자 피서 정보는 감소하고 탈분극 검출의 정확도 또한 감소하는 것을 그래프에서 확인할 수 있다.

[0150] 상술한 양자 동기화 방법을 구현하기 위한 프로그램은, 컴퓨터에 의해 판독 가능한 기록 매체에 기록될 수 있다. 컴퓨터에 의해 판독 가능한 기록 매체는, 예를 들어, 하드 디스크나 플로피 디스크와 같은 자기 디스크 저장 매체, 자기 테이프, 콤팩트 디스크나 디브이디와 같은 광 기록 매체, 플롭티컬 디스크와 같은 자기-광 기록 매체 및 롬, 램 또는 플래시 메모리 등과 같은 반도체 저장 장치 등 컴퓨터 등의 호출에 따라 실행되는 특정 프로그램을 저장 가능한 다양한 종류의 하드웨어 장치를 포함할 수 있다.

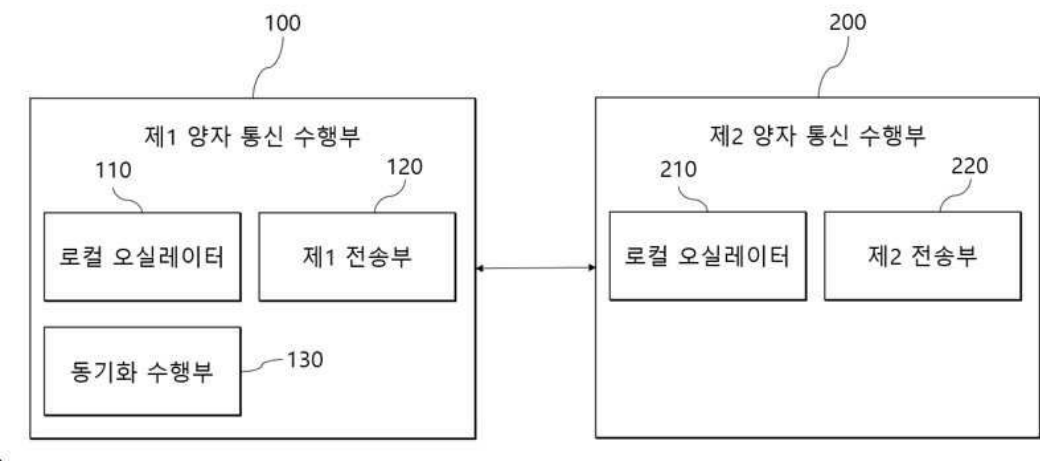
[0151] 이상 양자 동기화 방법, 양자 통신 시스템의 실시예에 대해 설명하였으나, 양자 동기화 방법, 양자 통신 시스템은 오직 상술한 실시예에 한정되는 것은 아니다. 해당 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 상술한 실시예를 기초로 수정 및 변형하여 구현 가능한 다양한 장치나 방법 역시 상술한 반사실적 양자 벨 상태 분석 방법, 장치 및 시스템의 일례가 될 수 있다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성 요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나 다른 구성 요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 또는 치환되더라도 상술한 양자 동기화 방법, 양자 통신 시스템의 일 실시예가 될 수 있다.

부호의 설명

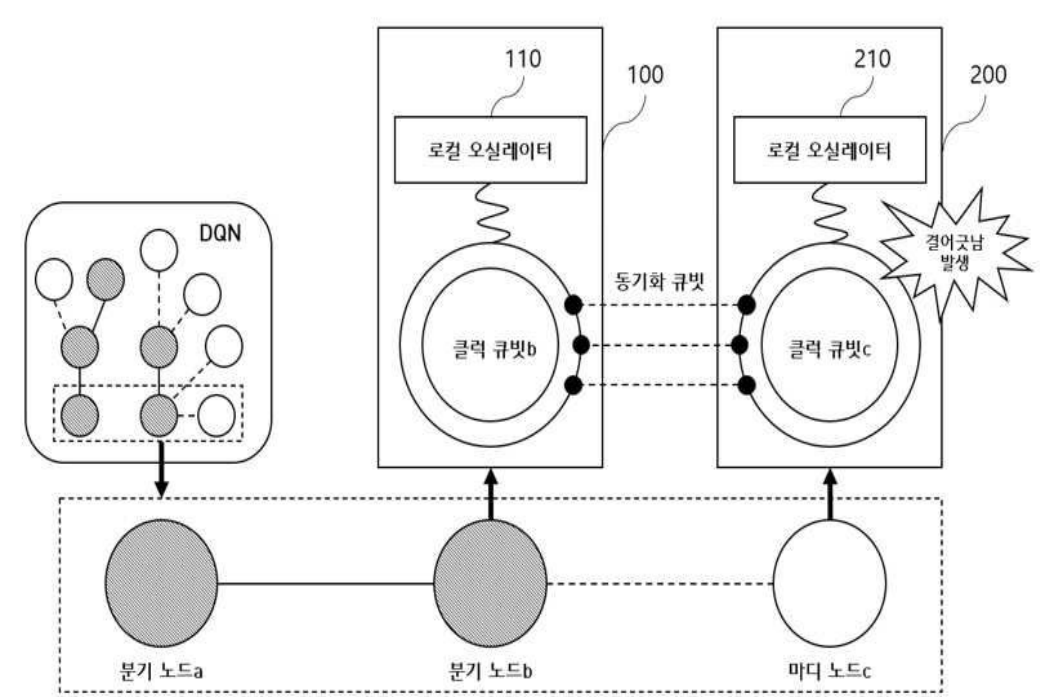
[0153] 100: 제1 양자 통신 수행부
200: 제2 양자 통신 수행부
110, 210: 로컬 오실레이터
120: 제1 전송부
130: 동기화 수행부
220: 제2 전송부

도면

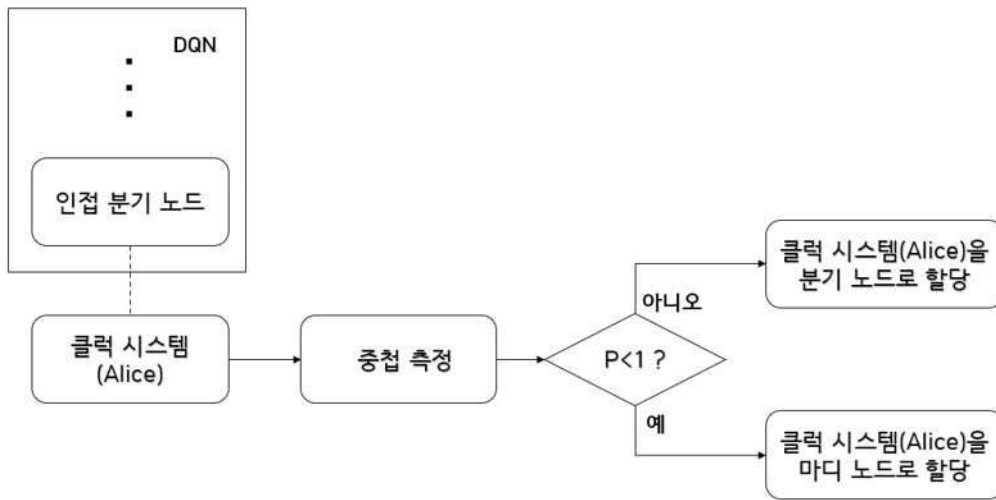
도면1



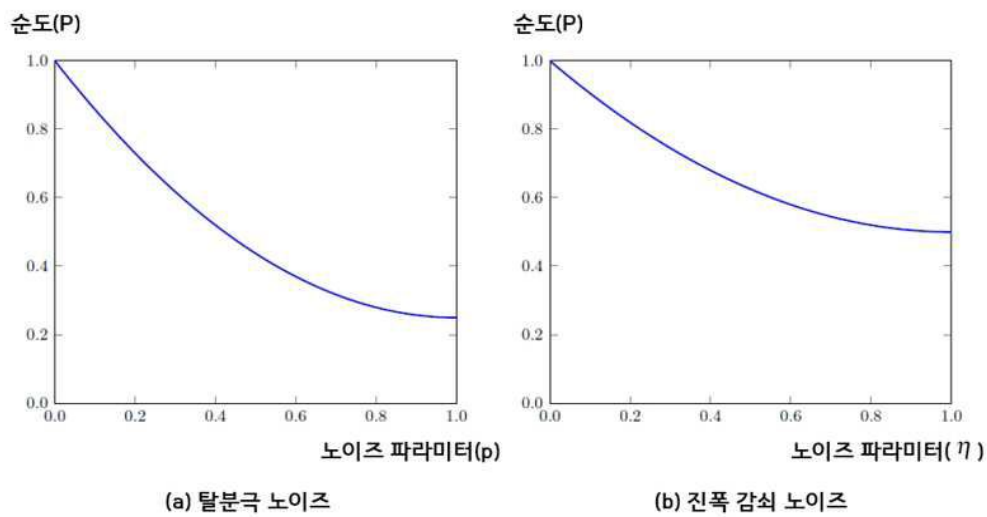
도면2



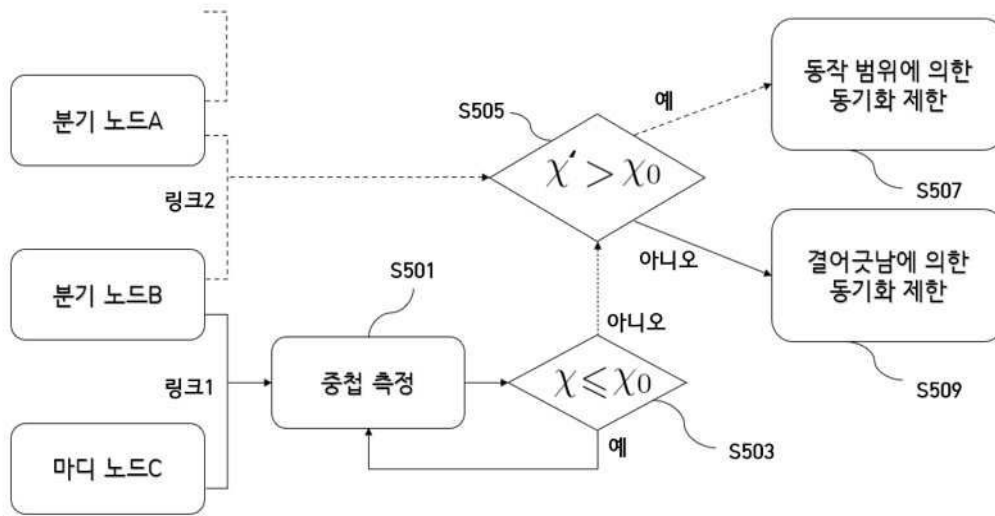
도면3



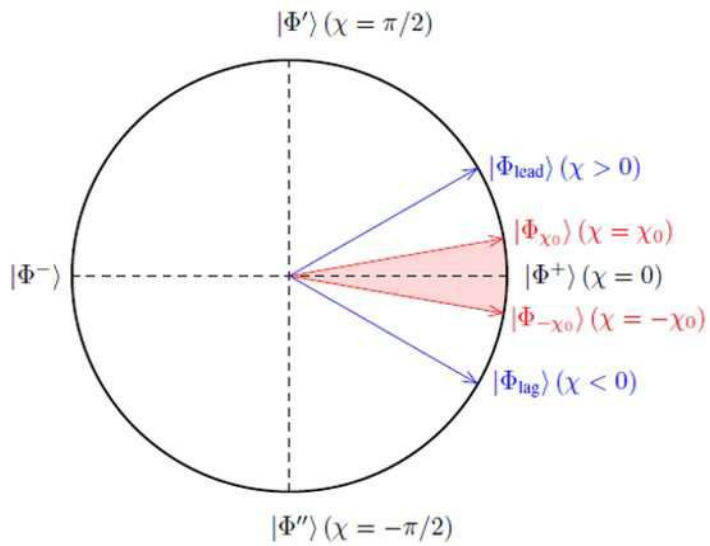
도면4



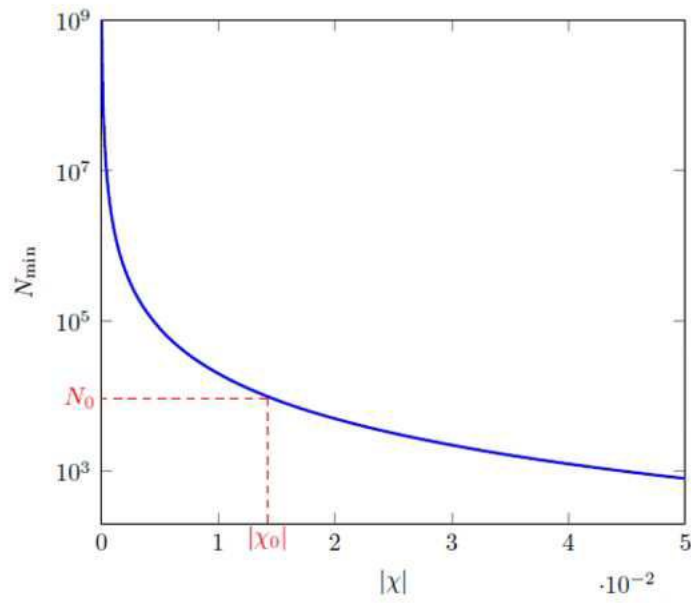
도면5



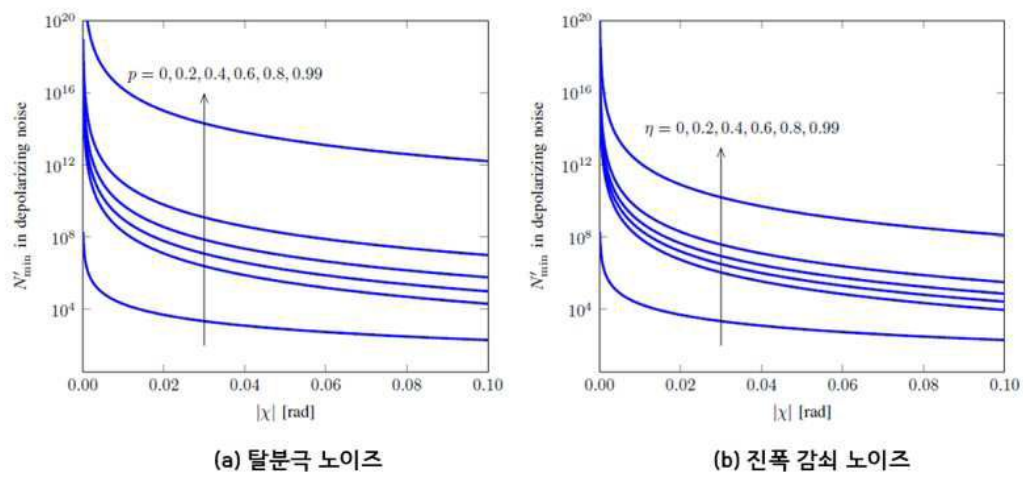
도면6



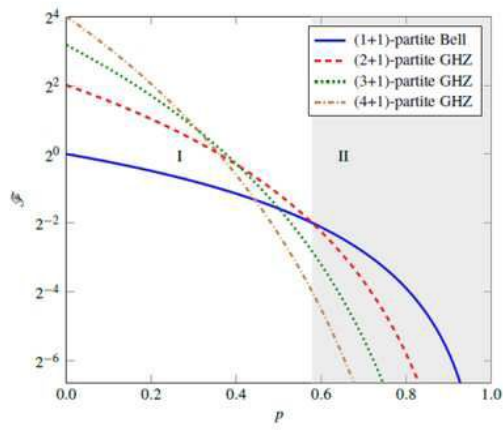
도면7



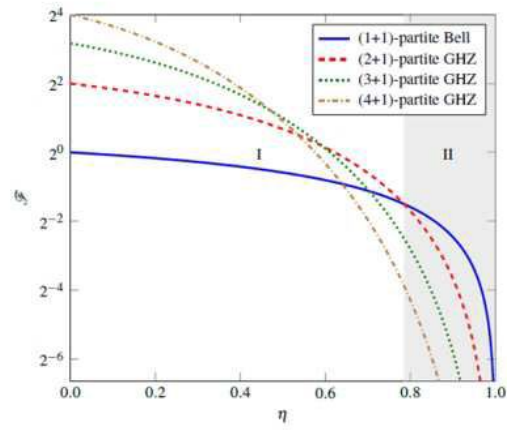
도면8



도면9



(a) 탈분극 노이즈



(b) 진폭 감쇠 노이즈