



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0034102
(43) 공개일자 2020년03월31일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04L 7/00 (2006.01) H04B 10/70 (2013.01)
B82Y 10/00 (2017.01)
(52) CPC특허분류
H04L 7/0075 (2013.01)
H04B 10/70 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0113384
(22) 출원일자 2018년09월21일
심사청구일자 2018년09월21일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
심현동
경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호(영통동, 벽산삼익아파트)
정영민
경기도 성남시 분당구 양현로 507, 313동 305호(야탑동, 매화마을주공3단지아파트)
울라 무하마드 아사드
경기도 수원시 영통구 청명로59번길 45-2 B02
(74) 대리인
김홍석

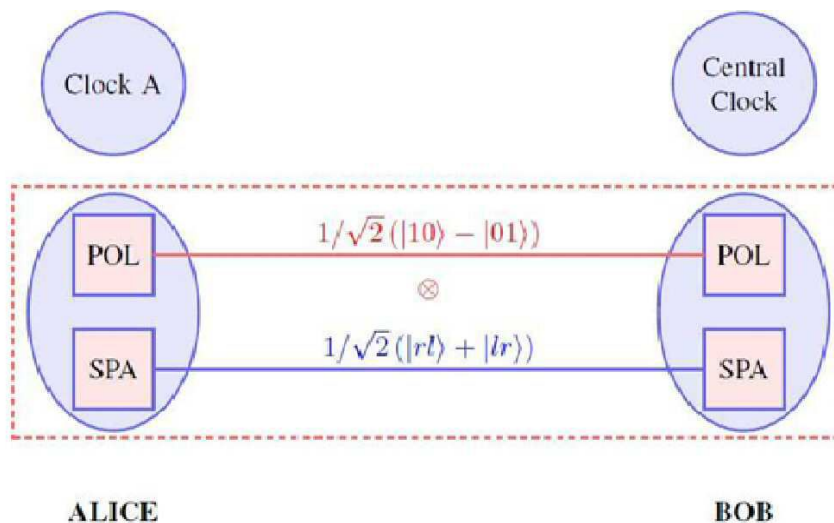
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 양자 네트워크 동기화 방법 및 이를 수행하는 양자 시스템

(57) 요약

본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화 방법이 제공된다. 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고, 수신 기기인 제2 기기와 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)를 이용하여 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행하는 주파수 동기화 구성 단계; 및 상기 클록 네트워크에서 주파수 드리프트에 기인하는 비동기화(desynchronization)를 검출하는 비동기화 검출 단계를 포함하고, 양자 네트워크(QN)에서 단일 광자의 다중 자유도(DOF: degrees of freedom)를 이용하여, 양자 시계 동기화의 정확성을 향상시킬 수 있다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

B82Y 10/00 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2016R1A2B2014462
부처명 미래과학창조부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 개인연구지원사업(중견연구)
연구과제명 양자 초엄힘을 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 네트워크 동기화 방법에 있어서, 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고,

수신 기기인 제2 기기와 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)를 이용하여 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행하는 주파수 동기화 구성 단계; 및

상기 클록 네트워크에서 주파수 드리프트에 기인하는 비동기화(desynchronization)를 검출하는 비동기화 검출 단계를 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

위상 예측(phase estimation)을 통해 주파수 재동기화(resynchronization)를 수행하는 주파수 재동기화 단계를 더 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 3

제1 항에 있어서,

상기 주파수 동기화 구성 단계는,

상기 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득하고,

상기 싱글릿 상태에 벨-기저(Bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상태를 변화(evolve)시키는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 4

제2 항에 있어서,

상기 비동기화 검출 단계는,

광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)을 수행하고,

상기 벨 상태 측정에 기반하여 광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제2 기기로 전송하고,

상기 제2 기기로부터 상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 수신하고,

상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 검출과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우 상기 주파수 재동기화 단계를 수행하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 주파수 재동기화 단계는,

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

초얽힘 상태(hyperentangled state)의 광자를 U'' 에 의한 유니터리

$U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시키고, - 여기서, H' 은 POL DOF에 대해 측정가능하고, x 는 SPA DOF에 대해 측정가능하고, g 는 두 개의 DOF의 커플링 세기이고, H' 은 주파수 드리프트 x 의 정보를 포함하고, $t = \pi / \Omega$ 은 두 개의 DOF가 상호작용하는 총 듀레이션을 표시함 -

상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(x)에 의해 결정되고,

상기 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기반하여 상기 주파수 재동기화를 수행하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 6

양자 네트워크 동기화 방법을 수행하는 양자 송신 기기에 있어서,

수신 기기인 제2 기기로부터 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)에 관한 정보를 수신하도록 구성된 인터페이스부; 및

상기 동기화된 양자 시계를 이용하여 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행하고, 상기 클록 네트워크에서 주파수 드리프트에 기인하는 비동기화(desynchronization)를 검출하도록 구성된 제어부를 포함하는, 양자 송신 기기.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 제어부는,

위상 예측(phase estimation)을 통해 주파수 재동기화(resynchronization)를 수행하는, 양자 송신 기기.

청구항 8

제6 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 양자 송신 기기인 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득하고,

상기 싱글릿 상태에 벨-기저(bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상태를 변화(evolve)시키는, 양자 송신 기기.

청구항 9

제6 항에 있어서,

상기 제어부는,

광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)을 수행하고,

상기 벨 상태 측정에 기반하여 광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제2 기기로 전송하도록 제어하고,

상기 제2 기기로부터 상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 수신하도록 제어하고,

상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 검출과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우, 상기 클록 네트워크의 클록 레퍼런스를 재동기화하는, 양자 송신 기기.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 제어부는,

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

초얽힘 상태(hyperentangled state)의 광자를 U'' 에 의한 유니터리

$U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시키고 - 여기서, H' 은 POL DOF에 대해 측정가능하고, x 는 SPA DOF에 대해 측정가능하고, g 는 두 개의 DOF의 커플링 세기이고, H' 은 주파수 드리프트 χ 의 정보를 포함하고, $t = \pi / \Omega$ 은 두 개의 DOF가 상호작용하는 총 듀레이션을 표시함 -,

상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 의해 결정되고,

상기 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기반하여 상기 주파수 재동기화를 수행하는, 양자 송신 기기.

청구항 11

양자 네트워크 동기화 방법에 있어서, 상기 방법은 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되고,

동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)에 관한 정보를 전송하여 송신 기기인 제1 기기와 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행하는 주파수 동기화 구성 단계; 및

상기 클록 네트워크에서 클록 큐비트의 주파수 드리프트를 검출하여 비동기화(desynchronization)를 예측하는 비동기화 예측 단계를 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 12

제11 항에 있어서,

위상 예측(phase estimation)을 통해 주파수 재동기화(resynchronization)를 수행하는 주파수 재동기화 단계를 더 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 13

제11 항에 있어서,

상기 주파수 동기화 구성 단계에서,

상기 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득하고,

상기 싱글릿 상태에 벨-기저(Bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상태를 변화(evolve)시키는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 14

제12 항에 있어서,

상기 비동기화 예측 단계는,

광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)에 기반하는 광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제1 기기로부터 수신하고,

상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 획득하고,

상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 예측과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우 상기 주파수 재동기화 단계가 수행되는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 15

제14 항에 있어서,

상기 주파수 재동기화 단계는,

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

초얽힘 상태(hyperentangled state)의 광자들 $U'' \otimes U''$ 에 의한 유니터리

$U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시키고 — 여기서, H' 은 POL DOF에 대해 측정가능하고, x 는 SPA DOF에 대해 측정가능하고, g 는 두 개의 DOF의 커플링 세기이고, H' 은 주파수 드리프트 χ 의 정보를 포함하고, $t = \pi/\Omega$ 은 두 개의 DOF가 상호작용하는 총 듀레이션을 표시함 —,

상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 의해 결정되고,

상기 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기

반하여 상기 주파수 재동기화를 수행하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 16

양자 네트워크 동기화 방법을 수행하는 양자 수신 기기에 있어서,

송신 기기인 제1 기기로 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)에 관한 정보를 전송하도록 구성된 인터페이스부 - 상기 동기화된 양자 시계를 이용하여 상기 제1 기기가 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행 -; 및

상기 클록 네트워크에서 클록 큐비트의 주파수 드리프트를 검출하여 비동기화(desynchronization)를 예측하도록 구성된 제어부를 포함하는, 양자 수신 기기.

청구항 17

제16 항에 있어서,

상기 제어부는,

위상 예측(phase estimation)을 통해 주파수 재동기화(resynchronization)를 수행하는, 양자 수신 기기.

청구항 18

제16 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득하고,

상기 싱글릿 상태에 벨-기저(Bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상태를 변화(evolve)시키는, 양자 수신 기기.

청구항 19

제17 항에 있어서,

상기 제어부는,

광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)에 기반하는 광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제1 기기로부터 수신하고,

상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 획득하고,

상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 예측과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우 상기 주파수 재동기화가 수행되는, 양자 수신 기기.

청구항 20

제19 항에 있어서,

상기 제어부는,

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

초얽힘 상태(hyperentangled state)의 광자를 U'' 에 의한 유니터리

$U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시키고 - 여기서, H' 은 POL DOF에 대해 측정가능하고, x 는 SPA DOF에 대해 측정가능하고, g 는 두 개의 DOF의 커플링 세기이고, H' 은 주파수 드리프트 x 의 정보를 포함하고, $t = \pi / \Omega$ 은 두 개의 DOF가 상호작용하는 총 듀레이션을 표시함 -,

상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(x)에 의해 결정되고,

상기 주파수 드리프트 파라미터(x)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기반하여 상기 주파수 재동기화를 수행하는, 양자 수신 기기.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 양자 네트워크 동기화 방법 및 이를 수행하는 양자 시스템에 관한 것이다. 보다 상세하게는, 양자 초 얽힘 양자 시계 동기화 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 양자 클록 동기화에서, 동기화된 클록 생성을 위하여 이전의 얽힘(entanglement)을 사용하기 위한 프로토콜이 Josza 등에 의해 제시되었지만, 양자 클록의 효율적인 전송을 위한 프로토콜이 제시될 필요가 있다. Giovannetti 등은 양자 클록 동기화와 관련되고 포지셔닝을 위한 양자 효과를 이용하는 방법에 대해 언급하고 있다.

[0003] 한편, 양자 클록 동기화에서, 동기화(synchronization)는 공간적으로 분산된 네트워크의 클록이 정확한 정보를 제공하도록 요구되는 시간유지 응용(timekeeping applications)의 핵심에 해당한다. 네비게이션, 로컬화 및 텔레커뮤니케이션은 이러한 클록 동기화로부터 직접적으로 혜택을 받는 응용에 해당한다. 지금까지 정확한 클록의 출현에 따라, 정확한 클록 동기화의 필요성은 매우 중요하다. 한편, 3.2×10^{-18} 의 시스템 상 상대적 불확실성을 갖는 $^{171}\text{Yb}^+$ 에 기반한 광학 시계가 제공되었다. 이러한 광학 시계는 Gravitational 파장과 같은 다양한 물리 현상의 발견에 기반하고 있다. 고전적인 기법을 넘어서, 특수 상대성 이론은 두 개의 시스템 간에 광 펄스의 동작상의 가시적 변경(operational line of sight exchange)과 관련된 아인슈타인 동기화로 알려진 분산 시계의 동기화에 대한 절차를 제공한다.

[0004] 한편, 네트워크의 광 클록을 동기화하기 위한 절차에서, 네트워크의 얽힌 상태가 국부 발진기(Local Oscillator)의 편차(deviation)에 관한 초-정밀 정보를 제공하는데 이용될 수 있다. 이러한 편차는 양자 효과를 이용하는 하이젠베르크 정확도(Heisenberg precision)까지 정확하게 계산되어야 한다.

[0005] 하지만, 지금까지 알려진 바에 의하면, 실제 변화 모델(realistic evolution models)의 경우에, LO의 주파수의 변동에 의해 영향을 받는 노드에서, 다양한 인자에 대한 상호 측정 등을 통해 주파수 비동기화를 검출하고 주파수 재동기화를 수행하는 방법에 대한 프로토콜이 제시된 바 없다는 문제점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 따라서, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, LO의 주파수의 변동에 의해 영향을 받는 노드에서, 다양한 인자에 대한 상호 측정 등을 통해 정확한 양자 네트워크 동기화 방법을 제공하는 것을 목표로 한다.

[0007] 또한, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 다양한 인자에 대한 상호 측정 등을 통해 주파수 비동기화를 검출하고 주파수 재동기화를 수행하는 방법을 제공하는 것을 목표로 한다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화 방법이 제공된다. 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고, 수신 기기인 제2 기기와 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)를 이용하여 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행하는 주파수 동기화 구성 단계; 및 상기 클록 네트워크에서 주파수 드리프트에 기인하는 비동기화(desynchronization)를 검출하는 비동기화 검출 단계를 포함하고, 양자 네트워크(QN)에서 단일 광자의 다중 자유도(DOF: degrees of freedom)를 이용하여, 양자 시계 동기화의 정확성을 향상시킬 수 있다.

[0009] 일 실시 예에서, 위상 예측(phase estimation)을 통해 주파수 재동기화(resynchronization)를 수행하는 주파수 재동기화 단계를 더 포함할 수 있다.

[0010] 일 실시 예에서, 상기 주파수 동기화 구성 단계에서, 상기 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득할 수 있다. 이때, 상기 싱글릿 상태에 벨-기저(Bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상태를 변화(evolve)시킬 수 있다.

[0011] 일 실시 예에서, 상기 비동기화 검출 단계는, 광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)을 수행하고, 상기 벨 상태 측정에 기반하여 광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제2 기기로 전송하고, 상기 제2 기기로부터 상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 수신할 수 있다. 이때, 상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 검출과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우 상기 주파수 재동기화 단계를 수행할 수 있다.

[0012] 일 실시 예에서, 상기 주파수 재동기화 단계에서, 초얽힘 상태(hyperentangled state)의 광자를

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

에 의한 유니터리 $U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시킬 수 있다.

이때, 상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 의해 결정될 수 있다. 또한, 상기 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기반하여 상기 주파수 재동기화를 수행할 수 있다.

[0013] 본 발명의 다른 측면에 따른 양자 네트워크 동기화 방법을 수행하는 양자 송신 기기가 제공된다. 상기 양자 송신 기기는, 수신 기기인 제2 기기로부터 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)에 관한 정보를 수신하도록 구성된 인터페이스부; 및 상기 동기화된 양자 시계를 이용하여 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행하고, 상기 클록 네트워크에서 주파수 드리프트에 기인하는 비동기화(desynchronization)를 검출하도록 구성된 제어부를 포함한다.

[0014] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 위상 예측(phase estimation)을 통해 주파수 재동기화(resynchronization)를 수행할 수 있다.

[0015] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 양자 송신 기기인 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득할 수 있다. 또한, 상기 싱글릿 상태에 벨-기저(bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상태를 변화(evolve)시킬 수 있다.

[0016] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)을 수행하고, 상기 벨 상태 측정에 기반하여 광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제2 기기로 전송하도록 제어할 수 있다. 또한, 상기 제2 기기로부터 상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 수신하도록 제어할 수 있다. 또한, 상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 검출과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우, 상기 클록 네트워크의 클록 레퍼런스를 재동기화할 수 있다.

[0017] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 초얽힘 상태(hyperentangled state)의 광자를

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

에 의한 유니터리 $U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시킬 수 있다.

이때, 상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 의해 결정될 수 있다. 또한, 상기 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기반하여 상기 주파수 재동기화를 수행할 수 있다.

[0018] 본 발명의 또 다른 측면에 따른 양자 네트워크 동기화 방법이 제공된다. 상기 방법은 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되고, 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)에 관한 정보를 전송하여 송신 기기인 제1 기기와 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행하는 주파수 동기화 구성 단계; 및 상기 클록 네트워크에서 클록 큐빗의 주파수 드리프트를 검출하여 비동기화(desynchronization)를 예측하는 비동기화 예측 단계를 포함한다.

[0019] 일 실시 예에서, 위상 예측(phase estimation)을 통해 주파수 재동기화(resynchronization)를 수행하는 주파수 재동기화 단계를 더 포함할 수 있다.

[0020] 일 실시 예에서, 상기 주파수 동기화 구성 단계에서, 상기 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득할 수 있다. 이때, 상기 싱글릿 상태에 벨-기저(Bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상태를 변화(evolve)시킬 수 있다.

[0021] 일 실시 예에서, 상기 비동기화 예측 단계에서, 광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)에 기반하는

광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제1 기기로부터 수신하고, 상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 획득할 수 있다. 또한, 상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 예측과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우 상기 주파수 재동기화 단계가 수행될 수 있다.

[0022] 일 실시 예에서, 상기 주파수 재동기화 단계는, 초얽힘 상태(hyperentangled state)의 광자를

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

에 의한 유니터리 $U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시킬 수 있다.

이때, 상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 의해 결정될 수 있다. 또한, 상기 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기반하여 상기 주파수 재동기화를 수행할 수 있다.

[0023] 본 발명의 또 다른 측면에 따른 양자 네트워크 동기화 방법을 수행하는 양자 수신 기기가 제공된다. 상기 양자 수신 기기는, 송신 기기인 제1 기기로 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)에 관한 정보를 전송하도록 구성된 인터페이스부 - 상기 동기화된 양자 시계를 이용하여 상기 제1 기기가 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행 -; 및 상기 클록 네트워크에서 클록 큐비트의 주파수 드리프트를 검출하여 비동기화(desynchronization)를 예측하도록 구성된 제어부를 포함한다.

[0024] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 위상 예측(phase estimation)을 통해 주파수 재동기화(resynchronization)를 수행할 수 있다.

[0025] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득할 수 있다. 또한, 상기 싱글릿 상태에 벨-기저(Bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상태를 변화(evolve)시킬 수 있다.

[0026] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)에 기반하는 광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제1 기기로부터 수신하고, 상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 획득할 수 있다. 또한, 상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 예측과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우 상기 주파수 재동기화가 수행될 수 있다.

[0027] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 초얽힘 상태(hyperentangled state)의 광자를

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

에 의한 유니터리 $U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시킬 수 있다.

이때, 상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 의해 결정될 수 있다. 또한, 상기 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기반하여 상기 주파수 재동기화를 수행할 수 있다.

발명의 효과

[0028] 본 발명의 적어도 일 실시 예에 따르면, 양자 네트워크(QN)에서 단일 광자의 다중 자유도(DOF: degrees of freedom)를 이용하여, 양자 시계 동기화의 정확성을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.

[0029] 또한, 본 발명의 적어도 일 실시 예에 따르면, 클록 동기화에서 궁극적인 양자 자원 한계를 달성하여, 양자 인터넷의 다른 장애를 제거하여 양자 네트워크를 현실화할 수 있다는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0030] 도 1은 본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화를 수행하는 양자 시스템을 도시한다.

도 2는 본 발명에 따른 양자 기기의 상세 구성을 도시한다.

도 3은 본 발명에 따른 클록 네트워크의 아키텍처를 나타낸다.

도 4는 본 발명에 따른 편이(deviation)에 따른 변화된 상태의 유사도를 나타내는 확률 Pb를 도시한다.

도 5는 본 발명에 따른 싱글릿 상태에서의 주파수 편이 효과를 나타내는 개념도이다.

도 6은 본 발명에 따른 Alice 측에서 Bob 측으로의 N-큐비트의 POL의 양자전송을 나타낸다.

도 7은 본 발명에 따른 주파수 편이 예측의 간섭 유추(interferometric analogy)에 대한 개념도를 나타낸다.

도 8은 본 발명에 따른 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되는 양자 네트워크 동기화 방법의 흐름도를 나타낸다.

도 9는 본 발명에 따른 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되는 양자 네트워크 동기화 방법의 흐름도를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0031] 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.
- [0032] 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용한다.
- [0033] 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.
- [0034] 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.
- [0035] 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.
- [0036] 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.
- [0037] 이하의 설명에서 사용되는 구성요소에 대한 접미사 "모듈", "블록" 및 "부"는 명세서 작성의 용이함만이 고려되어 부여되거나 혼용되는 것으로서, 그 자체로 서로 구별되는 의미 또는 역할을 갖는 것은 아니다.
- [0038] 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.
- [0039] 이하, 본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화 방법 및 이를 수행하는 양자 시스템에 대해 살펴보기로 하자.
- [0040] 이와 관련하여, 도 1은 본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화를 수행하는 양자 시스템을 도시한다. 도 1에 도시된 바와 같이, 양자 시스템은 복수의 서버 시스템을 포함하고, 편의상 제1 서버 시스템(100)과 제2 서버 시스템(200)이 포함된 것으로 표현할 수 있다. 하지만, 상기 제1 및 제2 서버 시스템(100, 200)에만 한정되는 것이 아니라, 임의의 개수의 서버 시스템 간에도 적용될 수 있다. 한편, 상기 제1 내지 제3 서버 시스템(100, 200)은 임의의 양자 기기일 수 있다. 이와 관련하여, 제1 및 제2 서버 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.
- [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, 전술된 바와 같이 그 역도 성립

하고, 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 네트워크 동기화 방법을 수행하는 송신 기기(100)의 구체적인 동작에 대해 살펴보면 다음과 같다. 이와 관련하여, 양자 네트워크 동기화는 송신 기기(100) 또는 수신 기기(200)에 의해 수행될 수 있다. 또한, 양자 네트워크 동기화는 송신 기기(100) 또는 수신 기기(200)로부터의 정보에 기반하여도 1의 양자 서버(500)에 의해 수행되는 것도 가능하다. 이하에서는 편의상 송신 기기(100) 또는 수신 기기(200)에 의해 수행되는 것으로 설명하지만, 이에 한정되지 않고 양자 서버(500) 등 다른 엔티티에 의해 수행되는 것도 본 발명의 범위에 포함된다.

[0044] 인터페이스부(120)는 수신 기기인 제2 기기로부터 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)에 관한 정보를 수신하도록 구성된다. 한편, 제어부(110)는 상기 동기화된 양자 시계를 이용하여 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행하도록 구성된다. 이와 관련하여, 제어부(110)는 주파수 동기화를 위하여 다음과 같은 동작을 수행할 수 있다. 즉, 제어부(110)는 상기 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득한다. 또한, 제어부(110)는 상기 싱글릿 상태에 벨-기저(Bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상태를 변화(evolve)시킬 수 있다.

[0045] 또한, 제어부(110)는 상기 클록 네트워크에서 주파수 드리프트에 기인하는 비동기화(desynchronization)를 검출하도록 구성된다. 이와 관련하여, 제어부(110)는 비동기화 검출을 위하여 다음과 같은 동작을 수행할 수 있다. 즉, 제어부(110)는 광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)을 수행하고, 상기 벨 상태 측정에 기반하여 광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제2 기기로 전송하도록 제어할 수 있다. 또한, 제어부(110)는 상기 제2 기기로부터 상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 수신하도록 제어할 수 있다.

[0046] 한편, 제어부(110)는 위상 예측(phase estimation)을 통해 주파수 재동기화(resynchronization)를 수행할 수 있다. 이와 관련하여, 제어부(110)는 상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 검출과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우, 상기 클록 네트워크의 클록 레퍼런스를 재동기화할 수 있다. 구체적으로, 제어부(110)는 초얽힘 상태(hyperentangled state)의 광자를

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

에 의한 유니터리 $U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시킬 수 있다.

이때, 상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 의해 결정될 수 있다. 이에 따라, 제어부(110)는 상기 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기반하여 상기 주파수 재동기화를 수행할 수 있다.

[0047] 한편, 메모리(130)는 양자 네트워크 동기화와 관련하여 양자 정보 또는 일반 정보를 저장하도록 구성된다.

[0048] 한편, 도 2를 참조하여, 본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화 방법을 수행하는 수신 기기(100)의 구체적인 동작에 대해 살펴보면 다음과 같다. 이와 관련하여, 전술한 바와 같이 송신 기기(100)가 양자 네트워크 동기화를 수행할 수 있지만, 수신 기기(200)에 의해 수행되거나, 또는 송신 기기(100)와 수신 기기(200)가 협력하여 수행되는 것도 가능하다.

[0049] 인터페이스부(220)는 송신 기기인 제1 기기로부터 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)에 관한 정보를 전송하도록 구성된다. 이때, 상기 동기화된 양자 시계를 이용하여 상기 제1 기기가 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행할 수 있다.

[0050] 한편, 수신 기기 기반 양자 동기화 수행과 관련하여 다음과 같은 동작을 수행할 수 있다. 이와 관련하여, 제어부(210)는 상기 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득할 수 있다. 또한 제어부(210)는 상기 싱글릿 상태에 벨-기저(Bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상

태를 변화(evolve)시킬 수 있다.

[0051] 한편, 제어부(210)는 상기 클록 네트워크에서 클록 큐빗의 주파수 드리프트를 검출하여 비동기화(desynchronization)를 예측하도록 구성될 수 있다. 이와 관련하여, 제어부(210)는 광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)에 기반하는 광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제1 기기로부터 수신하도록 제어할 수 있다. 또한, 제어부(210)는 상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 획득할 수 있다. 이때, 상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 예측과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우 상기 주파수 재동기화가 수행될 수 있다.

[0052] 한편, 제어부(210)는 위상 예측(phase estimation)을 통해 주파수 재동기화(resynchronization)를 수행할 수 있다. 구체적으로, 제어부(210)는 초얽힘 상태(hyperentangled state)의 광자를

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

에 의한 유니터리 $U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시킬 수 있다.

이때, 상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 의해 결정될 수 있다. 또한, 제어부(210)는 상기 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기반하여 상기 주파수 재동기화를 수행할 수 있다.

[0053] 한편, 본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화 방법과 관련하여, 예비 사항(preliminaries)에 대해 살펴보면 다음과 같다. 양자 시스템의 자연적 변화는 양자 시스템의 고유 상태에 의해 지배된다. 큐빗에 대해, $|0\rangle$ 은 낮은 에너지 고유 상태(lower energy eigen state) E_1 를 나타내는데 비해, $|1\rangle$ 은 높은 여기 상태(excited state) E_2 를 나타낸다. 이러한 형태의 자연적 hamiltonian은 아래의 수학적 식 1에 의해 표현된다.

수학적 식 1

$$M = \begin{bmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{bmatrix}$$

[0054]

$$U_0(t) = \exp[-i t M / \hbar]$$

[0055] 이러한 hamiltonian에 대한 유니터리 변화는 $U_0(t)$ 로 표현된다. 따라서, 에너지 고유 상태의 큐빗($|0\rangle, |1\rangle$)은 비-변화(non-evolving)하지만, 두 개의 상태의 중첩으로 존재한다면, 이는 자연적 hamiltonian M 하에서 변화한다. 하지만, 얽힘 상태, 예컨대 싱글렛($|\psi'\rangle$)은 자신의 변화에 대한 각각의 로컬 입자에 대해 작용하는 hamiltonian에 달려있다. 자연적 hamiltonian은 예를 들어 수학적 식 2와 같은 외부(external) hamiltonian으로 대체될 수 있다.

수학적 식 2

$$H = \frac{\hbar\Omega}{2} [|0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0|]$$

[0056]

[0057] 여기서, Ω 는 상태들 간의 Rabi 플로핑(flopping)의 Rabi 주파수이다. 이러한 방식으로, 본 발명에서는 양자 시스템의 변화를 제어할 수 있다. 자연적 hamiltonian을 외부 hamiltonian H 으로 대체하기 위해, 내부 hamiltonian M 을 상쇄(cancels out)하는 회전 프레임 픽처를 이용할 수 있다. 회전 프레임은 자연적 hamiltonian에 의해 생성되는 유니터리 변화에 대응하는 유니터리를 생성한다. 회전 프레임은 아래의 수학적 식 3과 같이 $U_0(t)$ 를 상쇄하는 R 로 표현되는 유니터리 변화를 발생시켜 시스템에 영향을 미쳐야 한다.

수학식 3

$$R(t) = U_0(t)^\dagger = \exp[-itM/\hbar]$$

[0058]

[0059] 총 hamiltonian (자연적 + 외부) = M+H를 고려하면, 본 발명에서는 아래의 수학식 4와 같은 방정식을 해결하여 회전 프레임 hamiltonian을 획득할 수 있다.

수학식 4

$$i\hbar d_t |\psi'(t)\rangle = i\hbar d_t (R(t) |\psi_0(t)\rangle)$$

[0060]

[0061] 내부 및 외부 hamiltonian 하에서 변화 상태에 해당하는 현재 상태의 시간 미분을 고려하고, 곱의 미분 법칙을 이용하여, 아래의 수학식 5와 같은 형태를 얻을 수 있다.

수학식 5

$$i\hbar d_t |\psi'(t)\rangle = [R(t)HR^\dagger(t)] |\psi'(t)\rangle$$

[0062]

[0063] 이는 내부 hamiltonian의 효과를 상쇄하는 $H_r = R(t)HR^\dagger(t)$ 를 유도한다. 따라서, 근원적인 양자 시스템은 이제 외부 hamiltonian H 하에서만 단지 변화하게 된다.

[0064] **주파수 동기화 네트워크 구성(Frequency Synchronization Network Configuration)**

[0065] 초얽힘 상태(hyperentangled states)의 생성에 대해 살펴보면 다음과 같다. 이와 관련하여, 도 3은 본 발명에 다른 클록 네트워크의 아키텍처를 나타낸다. 각 클록은 수학식 3과 같은 hamiltonian 하에서 변화하는 큐비트를 갖는다. 클록을 따라, POL 및 SPA DOF의 초얽힘이 비동기 검출 및 파라미터 예측을 위해 활용된다. 초얽힘 광자의 POL DOF의 n 싱글릿 상태는 클록 큐비트와 같은 동일한 Hamiltonian 하에서 변화한다. 이러한 싱글릿은 주파수 드리프트 검출 블록의 근간을 형성한다. 클록의 비동기화가 검출된 이후에, 초얽힘 상태가 하이젠베르크 제한 파라미터 예측에 대해 역할을 수행하게 된다.

[0066] 한편, 본 발명에 따른 초얽힘 상태의 생성에 대해 살펴보면 다음과 같다. 이와 관련하여, 직교하게 배치된 (orthogonally oriented) 한 쌍의 타입-II 위상 정합 β -Barium Borate 크리스탈을 펌핑하여, POL DOF로 얽힌 2개의 저 에너지 광자를 수신할 수 있다. 단지 $j = \pm 1$ 궤도 각 운동량(OAM:orbital angular momentum) 모드를 선택하여, POL 및 공간 DOF로 최대 얽힌 광자 상태가 아래의 수학식 6과 같이 생성될 수 있다.

수학식 6

$$\begin{aligned} |\Psi_{est}\rangle &= |\Psi_{pol}\rangle \otimes |\Psi_{spa}\rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|10\rangle - |01\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|rl\rangle + |lr\rangle) \end{aligned}$$

[0067]

[0068] 따라서 POL DOF의 싱글릿이 재동기화 프로토콜을 위하여 사용될 것이고, 반면에 수학식 6의 상태는 파라미터 예측의 근간을 형성할 것이다. 2개의 공간적으로 이격된 입자가 동일한 유니터리 변화(unitary evolution)하에 있

다면 싱글릿 상태는 변화되지 않는다. 이러한 시나리오 중 하나는 수학적 3과 같이 hamiltonian H에 의해 정의되는 유니터리이다. 이러한 hamiltonian에 대하여, $t = \pi / \Omega$ 듀레이션 동안에 유지되는 레이저 펄스는 아래의 수학적 7로 유도된다.

수학적 7

$$U = \exp[iHt/\hbar] = \begin{bmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{bmatrix}$$

[0069]

[0070]

그러나 이분 양자 시스템이 싱글릿이 아니라면 일반적으로 이러한 경우에 해당하지 않는다. 도 3은 본 발명에 다른 네트워크 구성을 나타낸다. 네트워크는 광자와 연관된 복수의 자유도(DOF:degrees of freedom)을 이용한다. 편광(POL:Polarization) DOF는 양자 시계(quantum clock)를 포함하고, 반면에 궤도 각 운동량(POL) DOF는 비동기화 검출을 위한 두 대상 (예컨대, Alice 및 Bob) 간에 공유된 N 싱글릿 상태를 포함한다. 두 개의 DOF의 양자 시스템은 동일한 유니터리 하에서 동시에 변화되도록 이루어진다. 이러한 프로토콜 목적을 위해, 본 발명에서는 수학적 8과 같이 양 당사자의 클럭 큐비트가 hamiltonian 하에서 변하는 것을 고려한다.

수학적 8

$$H' = \frac{\hbar\chi\Omega}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

[0071]

[0072]

여기서 χ 는 원래 주파수 Ω 에서의 주파수 드리프트이다. $\chi = 1$ 에 대해, 이러한 hamiltonian은 수학적 2와 같은 형태를 갖는다. 따라서, Rabi 주파수 드리프트가 없는 경우, POL DOF의 싱글릿은 변화되지 않을 것이다. 로컬 레이저에서 Rabi 주파수의 래그(lag)/리드(lead) χ 가 존재하자 마자, 그 대상에서의 큐비트에 대한 유니터리 변화는 아래의 수학적 9와 같다.

수학적 9

$$U' = \begin{bmatrix} \cos(\chi\frac{\pi}{2}) & i\sin(\chi\frac{\pi}{2}) \\ i\sin(\chi\frac{\pi}{2}) & \cos(\chi\frac{\pi}{2}) \end{bmatrix}$$

[0073]

[0074]

한편, 도 4는 본 발명에 따른 편이(deviation)에 따른 변화된 상태의 유사도를 나타내는 확률 P_b 를 도시한다. 여기서, 확률 P_b 는 내적을 통해 싱글릿 상태를 이용하여 변화된 상태의 유사도를 나타낸다. 파란 색 커브는 로컬 주파수 래그(lag)/리드(lead) χ 를 경험하는 동안 확률 P_b 의 감소를 나타낸다. $\chi = 1.1$ 에 대하여, 붉은 점과 선으로 표시된 확률 P_b 는 유니터리 변화하에서 총 편이에 대응한다. 여기서, $\chi = 1.1$ 에 대한 두 개의 싱글릿 상태의 유니터리 변화는 $\chi = 0.2$ 하에서 단일 변화와 동일한 확률 효과를 갖는다.

[0075]

주파수 드리프트와 관련하여, Alice 측에서 총 주파수 $\Omega' = \chi\Omega$ 가 되는 주파수 드리프트 χ 를 고려하면, 이러한 변화는 아래의 수학적 10과 같은 벨 기저의 정현파 성분을 도입하여 싱글릿 상태를 변화시켜 표현 가능하다.

수학식 10

$$|\psi_{t_1}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (\imath \cos(\chi\pi/2) |0_A 0_B\rangle + \sin(\chi\pi/2) |0_A 1_B\rangle \\ - \sin(\chi\pi/2) |1_A 0_B\rangle - \imath \cos(\chi\pi/2) |1_A 1_B\rangle)$$

[0076]

[0077] $t = t_2$ 에서 레이저 펄스 유도 변화는 아래의 수학식 11의 상태를 유도한다.

수학식 11

$$|\psi_{t_2}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (\imath \sin(2\chi\pi/2) |0_A 0_B\rangle - \cos(2\chi\pi/2) |0_A 1_B\rangle \\ + \cos(\chi\pi/2) |1_A 0_B\rangle - \imath \sin(2\chi\pi/2) |1_A 1_B\rangle)$$

[0078]

[0079] 이제, 주파수 드리프트 χ 대신에, 아래의 수학식 12와 같은 상태를 유도하는 드리프트 2χ 를 고려할 수 있다.

수학식 12

$$|\psi'_{t_1}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (\imath \cos(2\chi\pi/2) |0_A 0_B\rangle + \sin(2\chi\pi/2) |0_A 1_B\rangle \\ - \sin(2\chi\pi/2) |1_A 0_B\rangle - \imath \cos(2\chi\pi/2) |1_A 1_B\rangle)$$

[0080]

[0081] **비동기화의 검출(Detection of desynchronization)**

[0082] 주파수 드리프트에 기인하는 클록 네트워크의 비동기화를 검출 및 예측하기 위해, 본 발명에서는 이러한 프로토콜의 코어 목적의 하나를 충족시키는 포지티브-연산자 값 측정 (POVM:positive-operator valued measure)를 고려한다. 즉, 동일한 POVM은 하이젠베르크 스케일링(Heisenberg scaling)을 갖는 주파수 드리프트를 예측하기 위한 최적 측정 방식을 제공할 뿐만 아니라, 동기화 검출을 위해 사용될 수 있다.

[0083] 이러한 목적을 위해, 본 발명에서는 아래의 수학식 13과 같이 주어지는 프로젝티브 측정(projective measurement) 기반 POVM을 고려할 수 있다.

수학식 13

$$\begin{aligned} |\mu_1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|1_A 0_B\rangle - |0_A 1_B\rangle), \\ |\mu_2\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (i |0_A 0_B\rangle - i |1_A 1_B\rangle) \\ |\mu_3\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|1_A 0_B\rangle + |0_A 1_B\rangle), \\ |\mu_4\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|0_A 0_B\rangle + |1_A 1_B\rangle). \end{aligned}$$

[0084]

[0085] 유효한 POVM의 조건을 만족시키는 위에서 주어지는 이러한 세트의 측정 벡터는 다음과 같은 특징을 갖는다.

[0086] - $A_i = |\mu_i\rangle \langle \mu_i|$ 와 같이 획득되는 측정 연산자는 Hermitian이고 포지티브 반-정의가능(positive semi-definite)한다.

[0087] - $\sum_i A_i = I_H$ 이다.

[0088] 수학식 12의 결합 측정(joint measurement) POVM을 적용하기 위해, Alice의 POL DOF를 Bob 측 기기로 모든 상태를 양자전송(teleport)할 수 있다. 이를 위해, 본 발명에서는 SPA DOF를 이용할 수 있다. SPA로 공유된 EPR을 가정하면 아래의 수학식 14와 같은 형태를 갖는다.

수학식 14

$$|\gamma\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle)$$

[0089]

[0090] Alice측 기기에서 벨 상태 측정을 이용하고, 각 큐비트에 대해 2 비트 일반 결과를 전송하여, 아래의 수학식 15와 같은 상태를 달성할 수 있다.

수학식 15

$$|\psi_{Bob}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1_{POL} 0_{SPA}\rangle - e^{-i\chi} |0_{POL} 1_{SPA}\rangle)$$

[0091]

[0092] POL DOF의 전체 상태를 획득하기 위해, 본 발명에서는 아래의 수학식 16과 같이 Bob 측 기기에서 보조 광자의 POL DOF의 더미 큐비트를 이용하여 SPA DOF의 큐비트를 교환(swap)할 수 있다.

수학식 16

$$\rho_{\text{Bob}} = \frac{1}{2} (|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|)_{\text{SPA}} \otimes (|0\rangle\langle 0|)_{\text{POL}_{\text{anc}}}$$

교환 동작을 적용하여, 아래의 수학식 17과 같은 결과를 얻을 수 있다.

수학식 17

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Bob}} &= S \rho_{\text{Bob}} S^\dagger \\ &= (|0\rangle\langle 0|)_{\text{SPA}} \otimes \frac{1}{2} (|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|)_{\text{POL}_{\text{anc}}} \end{aligned}$$

이는 수학식 18과 같이 해당 상태에서 POL DOF의 결합 측정을 위한 모든 큐빗을 유도한다.

수학식 18

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1_{\text{POL}} 0_{\text{POL}_{\text{anc}}}\rangle - e^{-i\chi} |0_{\text{POL}} 1_{\text{POL}_{\text{anc}}}\rangle)$$

이러한 특정 POVM은 하이젠베르크 스케일링된 파라미터 예측을 제공하기 위한 기저로서 동작할 뿐만 아니라, 수학식 10 및 11에 대한 동일한 확률 분포를 제공한다.

따라서, 수학식 12의 POVM에 대해, 수학식 9의 상태에 관한 드리프트 χ 를 갖는 $U' \otimes U$ 의 n 후속 적용(subsequent application)은 드리프트 $n\chi$ 를 갖는 단일 유니터리 적용과 동일한 확률 분포를 제공하는 상태를 유도할 것이다. 이러한 드리프트는 비동기화를 검출하는 것을 가이드하는 $U \otimes U$ 의 경우와 달리 싱글릿 상태 변화를 유도할 것이다.

일단 POL DOF가 더 이상 싱글릿이 아니면, 본 발명에서는 상기 편이가 측정 시에 도 4에서와 같은 비동기화 검출을 위한 허용가능 인터벌을 넘어서면, 클록 레퍼런스를 재동기화할 필요가 있다. 그렇지 않다면, 본 발명에서는 유니터리 적용과 함께 수행되는 일련의 POVM을 구현함에도 불구하고, $U' \otimes U$ 의 후속 적용이 허용가능한 인터벌을 넘어서는 상태를 유도할 때까지 대기한다. 주파수 편이에 대한 허용가능한 인터벌은 변화된 상태와 싱글릿 간의 정확한 구별을 위한 달성가능한 확률에 의해 제한(bound)된다. 비동기화가 없는 경우, 본 발명에서는 비-변화 싱글릿 상태를 갖는다. 측정을 위한 임의의 POVM 적용에 관하여, 싱글릿 상태는 항상 동일한 확률 분포를 갖게 될 것이다. 싱글릿 상태인 측정 벡터 $|\mu_i\rangle$ 에 대하여, 연관된 확률은 아래의 수학식 19와 같이 표현되고, 이는 다른 측정 벡터들이 이에 직교하기 때문에 싱글릿 상태에 대해 항상 1이다.

수학식 19

$$P_{|\mu_1\rangle} = |\langle \mu_1 | \psi^- \rangle|^2$$

그러나, 주파수 드리프트에 의해 모든 당사자의 POL DOF의 N 싱글릿이 변화하기 시작하는 경우, 주어진 POVM에 대한 $t = t_1$ 및 $t = t_2$ 의 두 개의 연속적인 측정의 확률 분포는 상이할 것이다.

특정 측정 결과를 획득하는 확률은 연관된 후 측정 상태(post measurement state)를 획득하는 횟수에 의해 비례

하도록 제시된다. 일 예시로서, 본 발명에서는 $\chi = 0.75$ 에 의해 표현되는 원래 주파수의 3/4만큼의 주파수 감소(drop)의 경우를 고려한다. 또한, $t = t_1$ 및 $t = t_2$ 에서 각각 수학적 9 및 10과 같은 형태의 N분 상태 (N bipartite states)의 두 개의 양상블을 고려한다. POVM을 이용하면, 아래의 $|\Psi_{t1}\rangle_{\mu 1}\rangle = 0.8536$ 및 $|\Psi_{t2}\rangle_{\mu 1}\rangle = 0.5$ 의 결과를 얻을 수 있다. 이는 싱글릿 상태에 대한 $U' \otimes U$ 하에서 후속하는 변화 이후에 확률이 감소(drop)되도록 하고, 주어진 POVM은 주파수 드리프트를 검출하기 위해 사용된다.

[0104] 한편, 도 5는 본 발명에 따른 싱글릿 상태에서의 주파수 편이 효과를 나타내는 개념도이다. Alice 측에서의 주파수 편이는 유니터리 $U' \otimes U$ 하에서 싱글릿 상태의 변화를 유도한다. 상한 편이 한계(upper bound deviation limit)는 주파수 컷-오프에 의해 설정되고, 싱글릿 상태의 변화는 상태 $|\phi\rangle = 1/\sqrt{2}[1;0;0;-1]$ 를 유도한다.

[0105] 한편, 도 6은 본 발명에 따른 Alice 측에서 Bob 측으로의 N-큐비트의 POL의 양자전송을 나타낸다.

[0107] 위상 예측을 통한 주파수 재동기화 (Frequency Resynchronization via Phase Estimation)

[0108] 주파수 드리프트에 기인하는 네트워크의 비동기화를 예측하기 위해, 본 발명에서는 이러한 프로토콜의 코어 목적 중 하나를 만족시키는 포지티브-연산자 값 측정(POVM: positive-operator valued measure)를 고려한다; 즉, 이는 하이젠베르크 스케일링을 갖는 주파수 드리프트를 예측하기 위한 최적 측정 방식을 제공한다. 이러한 종류의 측정 연산자에 대해, 일반 Fisher 정보(CFI: classical Fisher information)는 양자 Fisher 정보(QFI: quantum Fisher information)와 동일하다. 아래의 수학적 20과 같은 상한을 이용하여, 일반 Fisher 정보는 예측된 드리프트 χ 의 분산(variance)과 관련된다.

수학적 20

$$\delta^2(\chi_n) \geq \frac{1}{F_n(\chi)}$$

[0109]

[0110] n 카피의 프로브 상태에 대해, 최적 측정 연산자에 대하여 획득된 양자 상한(quantum bound)은 아래의 수학적 21로 표현된다.

수학적 21

$$\delta^2(\chi_n) \geq \frac{1}{\max_{\text{POVM}} F_n(\chi)} = \frac{1}{n \mathcal{F}_{\rho_\chi}}$$

[0111]

[0112] 여기서, 부등호는 양자 Fisher 정보 F의 부가 특성(additive property)에 기인한다. 그러나, 싱글릿 상태와 연관된 양자 이점(quantum advantage)을 이용하여, 양자 Fisher 정보는 사용된 프로브 상태의 카피 수의 제공으로 스케일링될 수 있다. 이러한 이점은 하이젠베르크 스케일링을 유도한다. 여기서, N 당사자 간 최대 얽힘 상태의 경우에, 파라미터 예측의 변동은 아래의 수학적 22와 같이 스케일링 (한정)된다.

수학적 22

$$\delta^2(\chi_n) \geq \frac{1}{F_n(\chi)}$$

[0113]

[0114] 이러한 경우에 대한 양자 Fisher 정보가 획득될 수 있으며, 여기서 프로브 상태는 순수 스핀 싱글릿이고, 아래의 수학적 23과 같이 표현된다.

수학식 23

$$\mathcal{F} = 4\Delta H = \langle H^2 \rangle - \langle H \rangle^2$$

[0115]

[0116] 스핀(spin)-1/2 벨 상태에 대한 로컬 측정은 하이젠베르크 대신에 스케일링이 제한된 샷 노이즈(shot noise)를 제공한다. 따라서, 본 발명에서는 최대 정확도를 달성하기 위한 결합 측정을 필요로 한다. 재동기화를 비동기화 검출 및 파라미터 예측과 구별하는 이점은 (싱글릿에서 모든 입자들이 파라미터를 인코딩하는 유니터리를 경험하기 때문에) 모든 2n 입자들이 파라미터 예측을 위해 사용될 수 있다는 것이다. 이에 따라 단일 2-큐비트 상태에 대해 최대 Fisher 정보는 $F_{\max} = 4$ 로 증가한다.

[0117] 본 발명에서는 도 7에 도시된 바와 같은 전형적인 계측 시나리오(metrology scenario)에서 프로브 싱글릿 상태 및 유니터리 연산 $U \otimes U$ 을 고려한다. 즉, 도 7은 본 발명에 따른 주파수 편이 예측의 간섭 유추(interferometric analogy)에 대한 개념도를 나타낸다. 수학식 2에서 표현된 hamiltonian H는 σ_x 에 선형적으로 변화함에 따라 주파수 드리프트 χ 와 관련된다.

[0118] 도 7을 참조하면, 본 발명에서 논의되는 측정 방식은 수학식 12의 POVM을 이용하여 측정을 수행할 수 있다. 아이디어 그 자체는 U 형태의 개방 시스템 변화하에서 환경과 얽힐 수 있는 시스템이 상이한 광자 자유도로 존재할 수 있는 측정 셋업을 갖는 얽힌 양자 시스템과 관련된 약한 측정(weak measurement)의 세부 사항을 제공한다. 이는 아이디어에 기반한다.

[0119] 결과적인 상태는 양자 시스템 DOF의 측정에 의해 추적되고, 자신의 양자 Fisher 정보와 동일한 일반 Fisher 정보를 제공하는 확률 분포를 달성한다. 이러한 아이디어의 확장은 초얽힘(hyperentangled) DOF 간에 상호 작용에 해당하고, 여기서 POL DOF는 SPA DOF의 상태의 변화를 제어한다. 초얽힘 상태의 모든 광자는 다중 DOF 양자전송을 이용하여 Alice 측에 존재할 수 있고 아래의 수학식 24와 같은 유니터리 변화 $U \otimes U$ 하에서 변화한다.

수학식 24

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

[0120]

[0121] 여기서, H' 은 POL DOF에 대해 측정가능한 반면에 $\hat{x}$ 는 SPA DOF에 대해 측정가능하다. g 는 두 개의 DOF의 커플링 세기인 반면에 H' 은 주파수 드리프트 χ 의 정보를 포함하고, $t = \pi/\Omega$ 은 두 개의 DOF가 상호작용하는 총 듀레이션을 표시한다.

[0122] 수학식 24의 결과는 하이브리드 얽힘 상태이고 SPA DOF의 변화는 파라미터 χ 에 의해 지배된다. 최종적으로, 결과적인 상태의 POL DOF 부분에 관한 측정은 수학식 12의 POVM을 이용하여 측정된다. POVM을 통해, 본 발명에서

는 $P_{\chi} = |\langle \Psi_{post} | \Psi_{post} \rangle|$ 을 이용하여 SPA DOF의 결과 상태에서부터 확률 분포를 획득할 수 있다. 이러한 확률

분포의 파라미터 χ 에 대한 미분(derivative)은 $F_n(\chi) = \sum_y \left(\frac{\partial P_{\chi}}{\partial \chi} \right)^2 / P_{\chi} = 4\delta^2(H)$ 의 관계를 통해 QFI를 찾는 데 도움이 되고, 본 발명에서 이 값은 $16\sigma^2$ 이 된다. 두 개의 DOF 간에 상호작용의 세기 g 의 알려진 값에 대하여, 본 발명에서 제시된 상한 관계를 이용하여 관련된 입자의 수의 제곱에 따른 파라미터의 변화를 예측할 수 있다.

[0123] 한편, 본 발명에서는 초얽힘 보조 계측(hyperentanglement assisted metrology)의 간섭 구현(interferometric implementation)을 제공한다. 이를 위해 본 발명에서는 POL DOF와 가우시안 분포를 갖는 공간적으로 얽힌 상태에서 동일한 편광을 갖는 입자와 함께 벨 상태를 이용하였다.

[0124] 본 발명의 결과 및 효과에 대해 살펴보면 다음과 같다. 본 발명에서는 검출 및 예측 시나리오 모두에 대해 초얽

힘 이분 상태(hyperentangled bipartite states)를 이용하였다. 이러한 시나리오는 준비에 있어서 용이함 및 잡음에 덜 민감하기 때문에 로컬 다분 얽힘(local multipartite entanglement)에 비해 이점을 갖는다. 파라미터 예측을 위하여 논의된 접근방식이 하이젠베르크 스케일링을 갖는 주파수 드리프트를 예측하기 위하여 동일한 POVM을 사용하기 때문에, 비동기화 검출에 대해 사용된 측정 셋업은 중요하다.

- [0125] 이러한 프로토콜은 클록 네트워크의 정규 프로빙(regular probing)에 대하여 이용가능한 초얽힘 자원의 소모 및 일반 정보에 의존한다. 초얽힘 기반 정밀 주파수 제어는 페루프 클록 비동기화 검출 및 재동기화 시스템을 달성하기 위한 약한 측정과 결합될 수 있고, 양자 네트워크에서 클록 정확성과 안정성을 달성할 수 있다.
- [0126] 이상에서는 본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화 방법을 수행하는 양자 기기와 이에 대한 원리에 대해 상세하게 살펴보았다. 이하에서는 본 발명의 다른 측면에 따른 양자 네트워크 동기화 방법에 대해 살펴보기로 한다.
- [0127] 이와 관련하여, 도 8은 본 발명에 따른 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되는 양자 네트워크 동기화 방법의 흐름도를 나타낸다. 한편, 도 9는 본 발명에 따른 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되는 양자 네트워크 동기화 방법의 흐름도를 나타낸다.
- [0128] 도 8을 참조하면, 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되는 양자 네트워크 동기화 방법은 주파수 동기화 구성 단계(S110), 비동기화 검출 단계(S120) 및 주파수 재동기화 단계(S130)를 포함한다.
- [0129] 주파수 동기화 구성 단계(S110)에서, 수신 기기인 제2 기기와 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)를 이용하여 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행한다.
- [0130] 또한, 비동기화 검출 단계(S120)에서, 상기 클록 네트워크에서 주파수 드리프트에 기인하는 비동기화(desynchronization)를 검출한다. 구체적으로, 비동기화 검출 단계(S120)에서, 상기 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득한다. 이때, 상기 싱글릿 상태에 벨-기저(Bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상태를 변화(evolve)시킬 수 있다.
- [0131] 한편, 비동기화 검출 단계(S120)에서, 광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)을 수행할 수 있다. 또한, 상기 벨 상태 측정에 기반하여 광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제2 기기로 전송할 수 있다. 또한, 상기 제2 기기로부터 상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 수신할 수 있다. 한편, 상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 검출과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우 주파수 재동기화 단계(S130)를 수행할 수 있다.
- [0132] 이에 대응하여, 주파수 재동기화 단계(S130)에서, 위상 예측(phase estimation)을 통해 주파수 재동기화(resynchronization)를 수행한다. 구체적으로, 주파수 재동기화 단계(S130)에서, 초얽힘 상태(hyperentangled

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

state)의 광자를 $U'' \otimes U''$ 에 의한 유니터리 $U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시킬 수 있다. 이때, 상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 의해 결정될 수 있다. 이때, 상기 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기반하여 상기 주파수 재동기화를 수행할 수 있다.

- [0133] 도 9를 참조하면, 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되는 양자 네트워크 동기화 방법은 주파수 동기화 구성 단계(S210), 비동기화 검출 단계(S220) 및 주파수 재동기화 단계(S230)를 포함한다.
- [0134] 주파수 동기화 구성 단계(S210)에서, 동기화된 양자 시계(synchronized quantum clock)에 관한 정보를 전송하여 송신 기기인 제1 기기와 주파수 동기화 위한 클록 네트워크 구성을 수행한다. 구체적으로, 주파수 동기화 구성 단계(S210)에서, 상기 제1 기기와 상기 제2 기기 간에 공유되는 N개의 싱글릿(singlet) 상태에 관한 정보를 획득할 수 있다. 또한, 상기 싱글릿 상태에 벨-기저(Bell basis)의 정현파 성분을 도입하여 상기 싱글릿 상태를 변화(evolve)시킬 수 있다.
- [0135] 한편, 비동기화 검출 단계(S220)에서, 상기 클록 네트워크에서 클록 큐비트의 주파수 드리프트를 검출하여 비동기화(desynchronization)를 예측한다. 구체적으로, 비동기화 검출 단계(S220)에서, 광자에 대한 벨 상태 측정(Bell state measurement)에 기반하는 광자에 대한 편광 자유도(POL DOF)에 관한 정보를 상기 제1 기기로부터 수신할 수 있다. 또한, 상기 POL DOF에 대한 상호 측정(joint measurement) 결과를 획득할 수 있다. 또한, 상기 상호 측정 결과에 기반하여 상기 주파수 드리프트로 인한 주파수 편이(deviation)가 상기 비동기화 예측과 연관된 허용가능 범위를 넘는 경우 주파수 재동기화 단계(S230)가 수행될 수 있다.

[0136] 한편, 주파수 재동기화 단계(S230)에서, 초얽힘 상태(hyperentangled state)의 광자를

$$U'' = \exp(-i(gt/\hbar)H'\hat{x})$$

에 의한 유니터리 $U'' \otimes U''$ 를 이용하여 변화(evolution)시킬 수 있다.

이때, 상기 변화에 의한 SPA DOF의 변화는 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 의해 결정될 수 있다. 또한, 상기 주파수 드리프트 파라미터(χ)에 관한 확률 분포를 통해 상기 위상 예측을 수행하고, 상기 위상 예측에 기반하여 상기 주파수 재동기화를 수행할 수 있다.

[0137] 이상에서는 본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화 방법을 수행하는 양자 시스템 및 양자 네트워크 동기화 방법에 대해 살펴보았다. 본 발명에 따른 효과와 활용 분야 및 기술사업화전망에 대해 살펴보면 다음과 같다.

[0138] 본 발명의 적어도 일 실시 예에 따르면, 양자 네트워크(QN)에서 단일 광자의 다중 자유도(DOF: degrees of freedom)를 이용하여, 양자 시계 동기화의 정확성을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.

[0139] 또한, 본 발명의 적어도 일 실시 예에 따르면, 클록 동기화에서 궁극적인 양자 자원 한계를 달성하여, 양자 인터넷의 다른 장점을 제거하여 양자 네트워크를 현실화할 수 있다는 장점이 있다.

[0140] 본 발명의 활용분야는 양자 네트워크를 이용하는 양자 컴퓨터와 통신 분야이고, 이러한 분야에서 네트워크가 적절히 동작하도록 분산된 노드 간에 매우 정확한 동기화를 필요로 한다.

[0141] 본 발명의 기술사업화전망과 관련하여, 양자 암호화 통신 링크 구축에 활용될 수 있다. 이와 관련하여, 초얽힘(hyperentangled) 양자 통신 시스템(QCS: Quntum Communication System)은 네트워크 노드에서 클록의 동기화 정확성을 향상시켜 더 빠른 통신을 가능하게 한다.

[0142] 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

[0143] 100: 제1 서버 시스템 200: 제2 서버 시스템

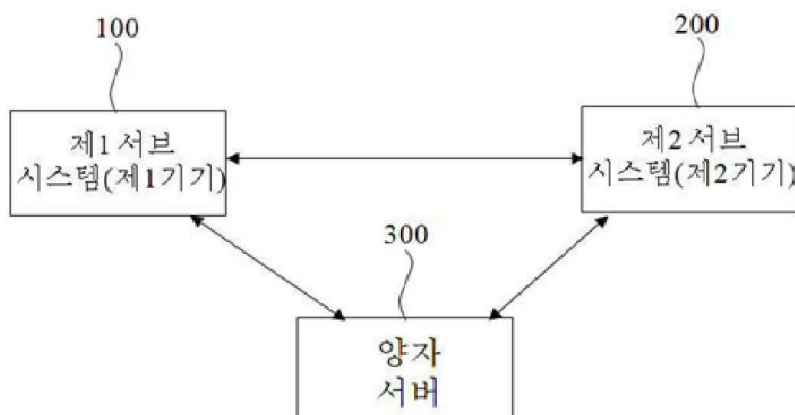
300: 양자 서버

110, 210: 제어부 120, 220: 인터페이스부

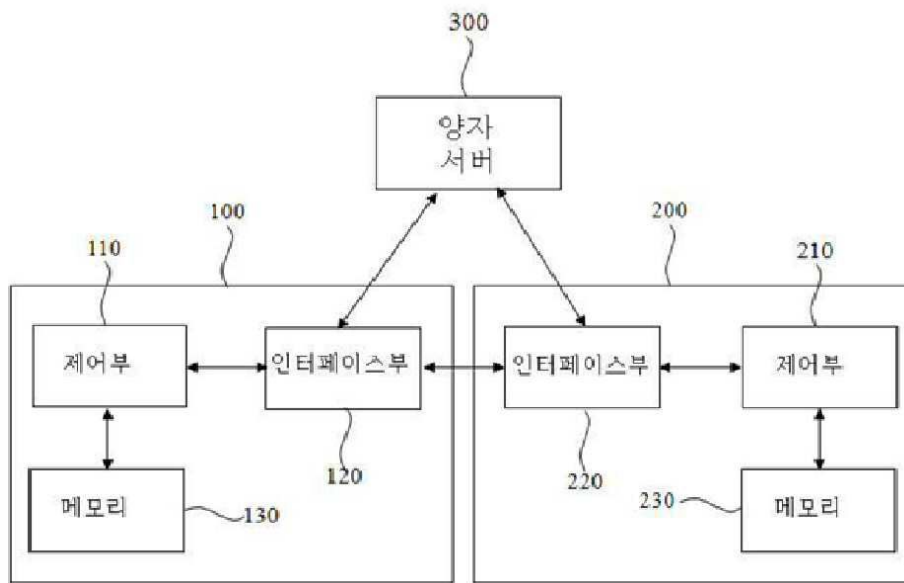
130, 230: 메모리

도면

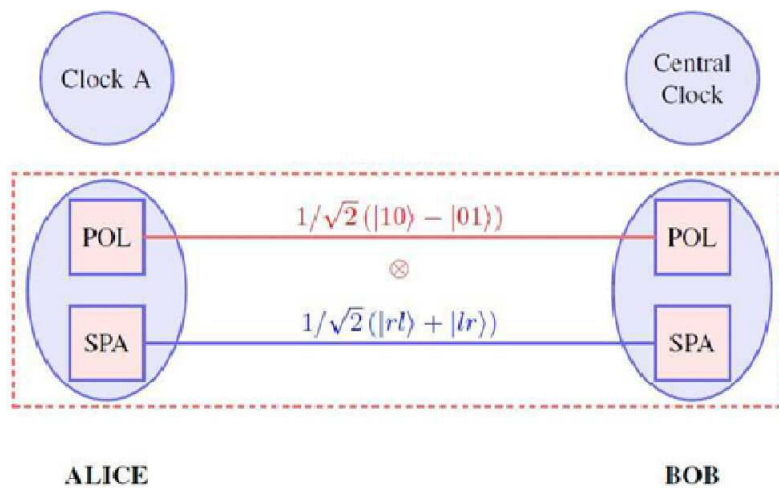
도면1



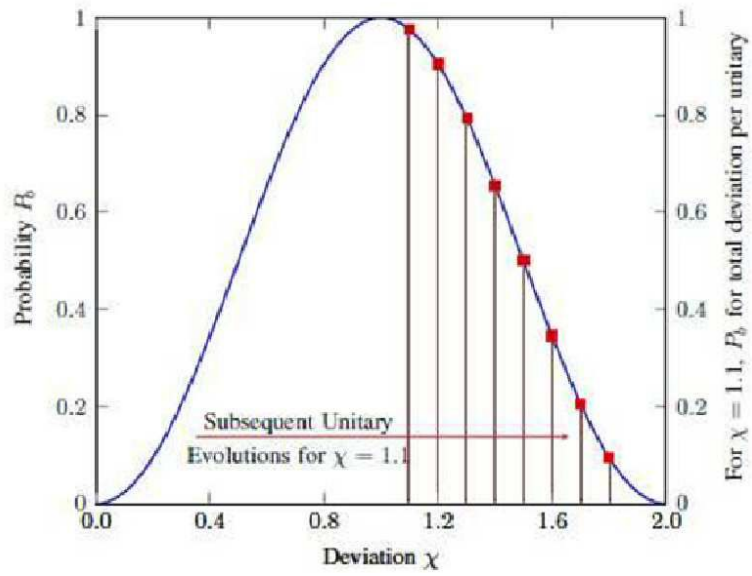
도면2



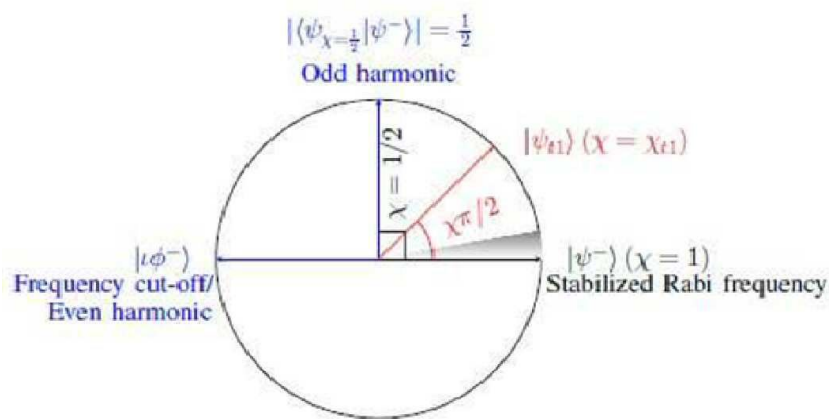
도면3



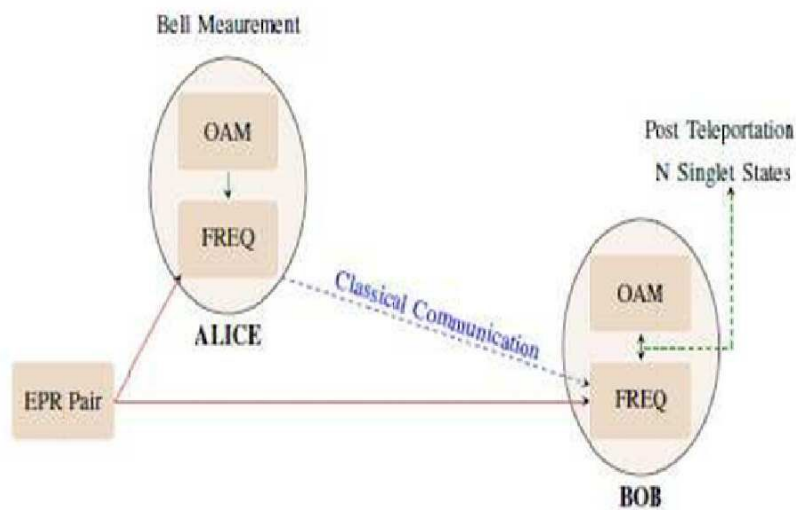
도면4



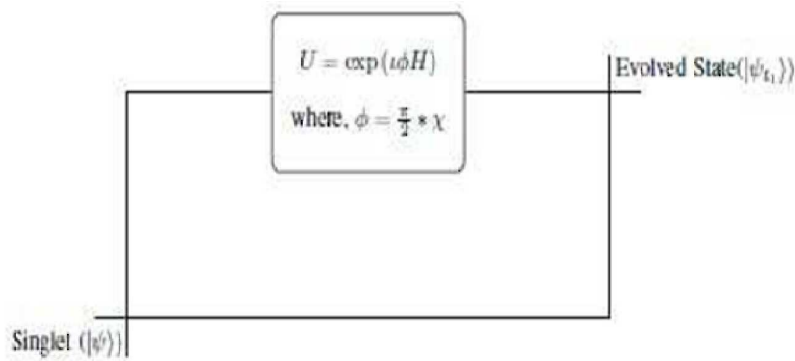
도면5



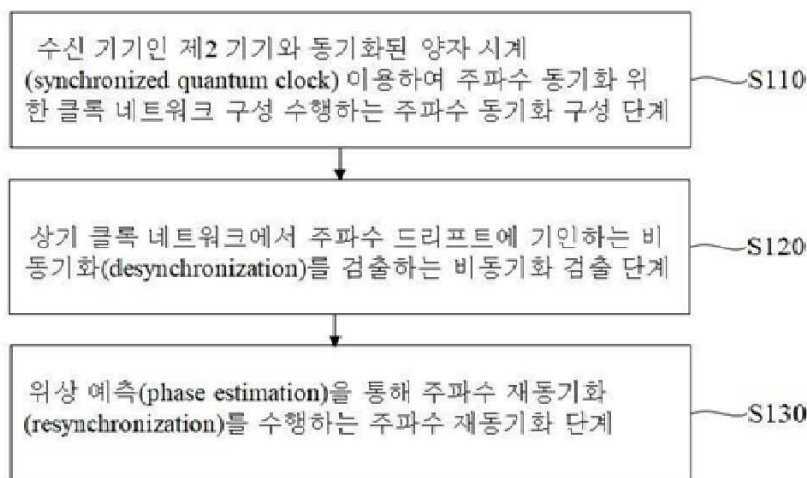
도면6



도면7



도면8



도면9

