



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2018-0128646
(43) 공개일자 2018년12월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H04L 7/00 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H04L 7/0075 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2017-0064007

(22) 출원일자 2017년05월24일

심사청구일자 2017년05월24일

(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)

울라 무하마드 아사드

경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 경희대학교 국제캠퍼스 전자정보관 559호

(74) 대리인

김동용, 김홍석

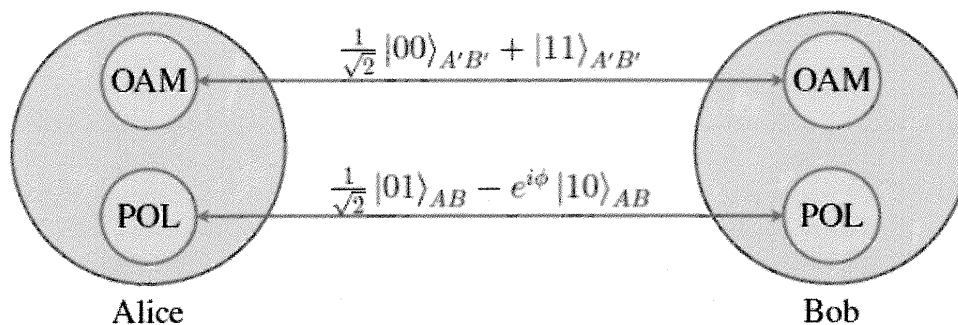
전체 청구항 수 : 총 18 항

(54) 발명의 명칭 양자 네트워크에서 동기화 방법

(57) 요약

본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화 방법에 있어서, 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고, 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 수신 기기인 제2 기기로 시간 정보를 송신하여 상기 제2 기기와 시간 동기화(synchronization)를 수행하는 시간 동기화 과정; 및 위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클럭(standard clock)과 통신하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행하는 주파수 동조화 과정을 포함하고, 양자 네트워크에서 기기 간 시간 정보를 이용하여 시간 동기화를 수행할 수 있다.

대표도 - 도3



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2016R1A2B2014462
 부처명 미래창조과학부
 연구관리전문기관 한국연구재단
 연구사업명 개인연구지원사업(중견연구)
 연구과제명 양자 초업힘을 이용한 하이브리드 양자통신 핵심기술 연구
 기 여 율 1/2
 주관기관 경희대학교 산학협력단
 연구기간 2016.06.01 ~ 2017.05.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 R0190-15-2030
 부처명 미래과학창조부
 연구관리전문기관 정보통신기술진흥센터
 연구사업명 정보통신방송연구개발사업
 연구과제명 비밀성증폭 후처리 기술 개발
 기 여 율 1/2
 주관기관 경희대학교 산학협력단
 연구기간 2016.07.01 ~ 2017.04.30

명세서

청구범위

청구항 1

양자 네트워크 동기화 방법에 있어서, 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고,

일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 수신 기기인 제2 기기로 시간 정보를 송신하여 상기 제2 기기와 시간 동기화(synchronization)를 수행하는 시간 동기화 과정; 및

위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클록(standard clock)과 통신하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행하는 주파수 동조화 과정을 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 시간 동기화 과정은,

상기 제1 기기가 자신의 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보를 갱신하는 DOF 갱신 과정;

상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태를 상기 제2 기기로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)하는 DOF 변환 과정; 및

상기 제1 기기가 자신의 클록에 관한 시간 정보를 상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제2 기기로 전달하는 시간 정보 전달 과정을 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 3

제2 항에 있어서,

상기 시간 정보 전달 과정에서,

상기 광자의 편광 DOF가 시간 변화(time evolution) 상태로 전환(convert)되고, 상기 제2 에너지 DOF와 상기 전환된 편광 DOF를 이용하여 상기 시간 정보가 전달되는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 4

제1 항에 있어서,

상기 주파수 동조화 과정은,

상기 제1 기기가 제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성하는 벨 쌍 생성 과정 — 상기 제1 벨 쌍은 상기 제1 기기의 클록과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기의 제1 보조(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클록과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기의 제2 보조 비트 간에 생성됨 —;

상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제1 기기와 상기 표준 클록 간의 제2 양자 채널을 통해 상기 표준 클록으로 양자 전송(telepration)하는 정보 전송 과정 — 상기 제1 기기와 상기 표준 클록 간의 제2 일반 채널을 통해 추가 정보를 상기 표준 클록으로 전송하는 것을 포함 —; 및

상기 표준 클록에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신하는 정보 수신 과정을 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 5

제4 항에 있어서,

상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제1 기기와 상기 표준 클록 간의 얽힘 상태를 공유하는 얽힘 상태 공유 과정;

상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제1 기기와 상기 표준 클록의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클록과 공유하는 부정합 식별 과정; 및

주파수 조정 신호(frequency deviation signal)를 상기 위상 안정화 링크를 통해 상기 표준 클록으로부터 수신하고, 상기 제1 기기의 국부 발진기(L0: Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정하는 로컬 주파수 조정 과정을 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 6

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

일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 송신 기기인 제1 기기로부터 시간 정보를 수신하여 상기 제1 기기와 시간 동기화(synchronization)를 수행하는 시간 동기화 과정; 및

위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클록(standard clock)과 통신하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행하는 주파수 동조화 과정을 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 7

제6 항에 있어서,

상기 시간 동기화 과정은,

에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)로 특정 에너지 수준을 지정하는 시간 동작 이전에, 상기 제2 기기가 상기 제1 기기와 핸드셰이킹을 수행하는 핸드셰이킹 과정 - 상기 핸드셰이킹에 따라 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보가 갱신되고, 상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태는 상기 제2 기기로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)됨 -;

상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제1 기기로부터 송신된 클록에 관한 시간 정보를 상기 제1 기기로부터 수신하는 시간 정보 수신 과정을 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 8

제6 항에 있어서,

상기 시간 정보 수신 과정에서,

상기 제2 에너지 DOF와 광자의 편광 DOF를 이용하여 상기 제1 기기로부터 전달된 상기 시간 정보가 수신되고,

상기 광자의 편광 DOF는 상기 제1 기기에 의해 시간 변화(time evolution) 상태로 전환(convert)된, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 9

제6 항에 있어서,

상기 주파수 동조화 과정은,

상기 제2 기기가 제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성하는 벨 쌍 생성 과정 - 상기 제1 벨 쌍은 상기 제2 기기의 클록과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제1 보조(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클록과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제2 보조 비트 간에 생성됨 -;

상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제2 기기와 상기 표준 클록 간의 제2 양자 채널을 통해 상기 표준 클록으로 양자 전송(telepration)하는 정보 전송 과정 - 상기 제2 기기와 상기 표준 클록 간의 제2 일반 채널을 통해 추가 정보를 상기 표준 클록으로 전송하는 것을 포함 -; 및

상기 표준 클록에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신하는 정보 수신 과정을 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 10

제9 항에 있어서,

상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제2 기기와 상기 표준 클록 간의 얽힘 상태를 공유하는 얽힘 상태 공유 과정;

상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제2 기기와 상기 표준 클록의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클록과 공유하는 부정합 식별 과정; 및

주파수 조정 신호(frequency deviation signal)를 상기 위상 안정화 링크를 통해 상기 표준 클록으로부터 수신하고, 상기 제2 기기의 국부 발진기(LO: Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정하는 로컬 주파수 조정 과정을 포함하는, 양자 네트워크 동기화 방법.

청구항 11

양자 네트워크 기기에 있어서, 상기 양자 네트워크 기기는 송신 기기인 제1 기기이고,

일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 수신 기기인 제2 기기로 시간 정보를 송신하고, 위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클록(standard clock)과 통신하도록 구성된 송수신부; 및

상기 송신된 시간 정보에 기반하여 상기 제2 기기와 시간 동기화(synchronization)를 수행하고, 상기 위상 안정화 링크를 통해 교환된 정보에 기반하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행하도록 구성된 제어부를 포함하는, 양자 네트워크 기기.

청구항 12

제11 항에 있어서,

상기 제어부는, 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보를 갱신하고, 상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태를 상기 제2 기기로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)하도록 더 구성되고,

상기 송수신부는, 클록에 관한 시간 정보를 상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제2 기기로 전달하도록 더 구성되는, 양자 네트워크 기기.

청구항 13

제12 항에 있어서,

상기 제어부는,

제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성 - 상기 제1 벨 쌍은 상기 제1 기기의 클록과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기의 제1 보조(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클록과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기의 제2 보조 비트 간에 생성됨 - 하고,

상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제1 기기와 상기 표준 클록 간의 제2 양자 채널을 통해 상기 표준 클록으로 양자 전송(telepration)하도록 상기 송수신부를 제어하고,

상기 표준 클록에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신하도록 상기 송수신부를 제어하도록 더 구성되는, 양자 네트워크 기기.

청구항 14

제12 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제1 기기와 상기 표준 클록 간의 얽힘 상태를 공유하고,

상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제1 기기와 상기 표준 클록의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클록과 공유하고,

주파수 조정 신호(frequency deviation signal)를 상기 위상 안정화 링크를 통해 상기 표준 클록으로부터 수신

하도록 상기 송수신부를 제어하고, 상기 제1 기기의 국부 발진기(LO: Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정하도록 더 구성되는, 양자 네트워크 기기.

청구항 15

양자 네트워크 기기에 있어서, 상기 양자 네트워크 기기는 수신 기기인 제2 기기이고,

일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 송신 기기인 제1 기기로부터 시간 정보를 수신하고, 위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클록(standard clock)과 통신하도록 구성된 송수신부; 및

상기 수신된 시간 정보에 기반하여 상기 제1 기기와 시간 동기화(synchronization)를 수행하고, 상기 위상 안정화 링크를 통해 교환된 정보에 기반하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행하도록 구성된 제어부를 포함하는, 양자 네트워크 기기.

청구항 16

제15항에 있어서,

상기 제어부는,

에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)로 특정 에너지 수준을 지정하는 시간 동작 이전에, 상기 제2 기기가 상기 제1 기기와 핸드셰이킹을 수행하도록 상기 송수신부를 제어 - 상기 핸드셰이킹에 따라 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보가 갱신되고, 상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태는 상기 제2 기기로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)됨 - 하도록 더 구성되고,

상기 송수신부는, 상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제1 기기로부터 송신된 클록에 관한 시간 정보를 상기 제1 기기로부터 수신하도록 더 구성되는, 양자 네트워크 기기.

청구항 17

제15항에 있어서,

상기 제어부는,

제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성 - 상기 제1 벨 쌍은 상기 제2기기의 클록과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제1 보조(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클록과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제2 보조 비트 간에 생성됨 - 하고,

상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제2 기기와 상기 표준 클록 간의 제2 양자 채널을 통해 상기 표준 클록으로 양자 전송(telepration) - 상기 제2 기기와 상기 표준 클록 간의 제2 일반 채널을 통해 추가 정보를 상기 표준 클록으로 전송하는 것을 포함 - 하도록 상기 송수신부를 제어하고,

상기 표준 클록에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신하도록 상기 송수신부를 제어하도록 더 구성되는, 양자 네트워크 기기.

청구항 18

제15항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제2 기기와 상기 표준 클록 간의 얽힘 상태를 공유하고,

상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제2 기기와 상기 표준 클록의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클록과 공유하고,

주파수 조정 신호(frequency deviation signal)를 위상 안정화 링크를 통해 상기 표준 클록으로부터 수신하도록 상기 송수신부를 제어하고, 상기 제2 기기의 국부 발진기(LO: Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정하도록 더 구성되는, 양자 네트워크 기기.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 양자 네트워크에서 동기화 방법에 관한 것이다. 보다 상세하게는, 양자 네트워크에서 시간 동기화 방법 및 주파수 동조화 방법에 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. 이러한 아이디어는, W 상태로 확장되어서 네트워크의 클록이 $t=0$ 에서 동기 시작을 되도록 하는 것을 가능하게 한다. 이러한 아이디어는, GHZ 상태에서도, 다분 얽힘(multipartite entanglement)은 임의의 두 대상에 이용 가능한 이분 얽힘을 감소시키지 않는다.

[0003] 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 계산된다.

[0004] 하지만, 지금까지 알려진 바에 의하면, 실제 변화 모델(realistic evolution models)의 경우에, LO의 주파수의 변동에 의해 영향을 받는 노드에서, 클록 주파수를 시간 동기화(syntonize)하고 주파수 동조화(syntonize)하는 능력을 부여하여, 시간 동기화와 주파수 동조화 모두에 대하여 필요성으로 이끄는 프로토콜이 제공된 바는 전혀 없다는 문제점이 있다.

[0005] 즉, 네트워크 기기 또는 엔티티 간의 복수의 채널에서 어떠한 정보를 서로 교환하여 시간 동기화와 주파수 동조화를 동시에 수행할 수 있는 방법 및 프로토콜이 전혀 제시된 바가 없다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 따라서, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 양자 네트워크에서 시간 동기화 방법을 제공하는 것을 목표로 한다.

[0007] 또한, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 양자 네트워크에서 주파수 동조화 방법을 제공하는 것을 목표로 한다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화 방법에 있어서, 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고, 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 수신 기기인 제2 기기로 시간 정보를 송신하여 상기 제2 기기와 시간 동기화(synchronization)를 수행하는 시간 동기화 과정; 및 위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클록(standard clock)과 통신하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행하는 주파수 동조화 과정을 포함하고, 양자 네트워크에서 기기 간 시간 정보를 이용하여 시간 동기화를 수행할 수 있다.

[0009] 일 실시 예에서, 상기 시간 동기화 과정은, 상기 제1 기기가 자신의 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보를 갱신하는 DOF 갱신 과정; 상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태를 상기 제2 기기로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)하는 DOF 변환 과정; 및 상기 제1 기기가 자신의 클록에 관한 시간 정보를 상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제2 기기로 전달하는 시간 정보 전달 과정을 포함할 수 있다.

[0010] 일 실시 예에서, 상기 시간 정보 전달 과정에서, 상기 광자의 편광 DOF가 시간 변화(time evolution) 상태로 전환(convert)되고, 상기 제2 에너지 DOF와 상기 전환된 편광 DOF를 이용하여 상기 시간 정보가 전달될 수 있다.

[0011] 일 실시 예에서, 상기 주파수 동조화 과정은, 상기 제1 기기가 제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성하는 벨 쌍 생성 과정 - 상기 제1 벨 쌍은 상기 제1기기의 클록과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기의 제1 보조

(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클럭과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기의 제2 보조 비트 간에 생성됨 -; 상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제1 기기와 상기 표준 클럭 간의 제2 양자 채널을 통해 상기 표준 클럭으로 양자 전송(teleportation)하는 정보 전송 과정 - 상기 제1 기기와 상기 표준 클럭 간의 제2 일반 채널을 통해 추가 정보를 상기 표준 클럭으로 전송하는 것을 포함 -; 및 상기 표준 클럭에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신하는 정보 수신 과정을 포함할 수 있다.

[0012] 일 실시 예에서, 상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제1 기기와 상기 표준 클럭 간의 얽힘 상태를 공유하는 얽힘 상태 공유 과정; 상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제1 기기와 상기 표준 클럭의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클럭과 공유하는 부정합 식별 단계; 및 주파수 조정 신호(frequency deviation signal)를 상기 위상 안정화 링크를 통해 상기 표준 클럭으로부터 수신하고, 상기 제1 기기의 국부 발진기(LO: Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정하는 로컬 주파수 조정 과정을 포함할 수 있다.

[0013] 본 발명의 다른 양상에 따른, 양자 네트워크 동기화 방법에 있어서, 상기 방법은 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되고, 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 송신 기기인 제1 기기로부터 시간 정보를 수신하여 상기 제1 기기와 시간 동기화(synchronization)를 수행하는 시간 동기화 과정; 및 위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클럭(standard clock)과 통신하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행하는 주파수 동조화 과정을 포함한다.

[0014] 일 실시 예에서, 상기 시간 동기화 과정은, 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)로 특정 에너지 수준을 지정하는 시간 동작 이전에, 상기 제2 기기가 상기 제1 기기와 핸드셰이킹을 수행하는 핸드셰이킹 과정 - 상기 핸드셰이킹에 따라 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보가 갱신되고, 상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태는 상기 제2 기기로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)됨 -; 및 상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제1 기기로부터 송신된 클럭에 관한 시간 정보를 상기 제1 기기로부터 수신하는 시간 정보 수신 과정을 포함할 수 있다.

[0015] 일 실시 예에서, 상기 시간 정보 수신 과정에서, 상기 제2 에너지 DOF와 광자의 편광 DOF를 이용하여 상기 제1 기기로부터 전달된 상기 시간 정보가 수신되고, 상기 광자의 편광 DOF는 상기 제1 기기에 의해 시간 변화(time evolution) 상태로 전환(convert)될 수 있다.

[0016] 일 실시 예에서, 상기 주파수 동조화 과정은, 상기 제2 기기가 제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성하는 벨 쌍 생성 과정 - 상기 제1 벨 쌍은 상기 제2 기기의 클럭과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제1 보조(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클럭과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제2 보조 비트 간에 생성됨 -; 상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제2 기기와 상기 표준 클럭 간의 제2 양자 채널을 통해 상기 표준 클럭으로 양자 전송(teleportation)하는 정보 전송 과정 - 상기 제2 기기와 상기 표준 클럭 간의 제2 일반 채널을 통해 추가 정보를 상기 표준 클럭으로 전송하는 것을 포함 -; 및 상기 표준 클럭에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신하는 정보 수신 과정을 포함할 수 있다.

[0017] 일 실시 예에서, 상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제2 기기와 상기 표준 클럭 간의 얽힘 상태를 공유하는 얽힘 상태 공유 과정; 상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제2 기기와 상기 표준 클럭의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클럭과 공유하는 부정합 식별 단계; 및 주파수 조정 신호(frequency deviation signal)를 상기 위상 안정화 링크를 통해 상기 표준 클럭으로부터 수신하고, 상기 제2 기기의 국부 발진기(LO: Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정하는 로컬 주파수 조정 과정을 포함할 수 있다.

[0018] 본 발명의 또 다른 양상에 따른, 양자 네트워크 기기에 있어서, 상기 양자 네트워크 기기는 송신 기기인 제1 기기이고, 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 수신 기기인 제2 기기로 시간 정보를 송신하고, 위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클럭(standard clock)과 통신하도록 구성된 송수신부; 및 상기 송신된 시간 정보에 기반하여 상기 제2 기기와 시간 동기화(synchronization)를 수행하고, 상기 위상 안정화 링크를 통해 교환된 정보에 기반하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행하도록 구성된 제어부를 포함한다.

[0019] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보를 갱신

하고, 상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태를 상기 제2 기기로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)하도록 더 구성되고, 상기 송수신부는, 클록에 관한 시간 정보를 상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제2 기기로 전달하도록 더 구성될 수 있다.

[0020] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성 — 상기 제1 벨 쌍은 상기 제1기기의 클록과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기의 제1 보조(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클록과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기의 제2 보조 비트 간에 생성됨 — 하고, 상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제1 기기와 상기 표준 클록 간의 제2 양자 채널을 통해 상기 표준 클록으로 양자 전송(teleportation)하도록 상기 송수신부를 제어하고, 상기 표준 클록에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신하도록 상기 송수신부를 제어하도록 더 구성될 수 있다.

[0021] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제1 기기와 상기 표준 클록 간의 얽힘 상태를 공유하고, 상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제1 기기와 상기 표준 클록의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클록과 공유하고, 주파수 조정 신호(frequency deviation signal)를 상기 위상 안정화 링크를 통해 상기 표준 클록으로부터 수신하도록 상기 송수신부를 제어하고, 상기 제1 기기의 국부 발진기(LO: Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정하도록 더 구성될 수 있다.

[0022] 본 발명의 또 다른 양상에 따른, 양자 네트워크 기기에 있어서, 상기 양자 네트워크 기기는 수신 기기인 제2 기기이고, 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 송신 기기인 제1 기기로부터 시간 정보를 수신하고, 위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클록(standard clock)과 통신하도록 구성된 송수신부; 및 상기 수신된 시간 정보에 기반하여 상기 제1 기기와 시간 동기화(synchronization)를 수행하고, 상기 위상 안정화 링크를 통해 교환된 정보에 기반하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행하도록 구성된 제어부를 포함한다.

[0023] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)로 특정 에너지 수준을 지정하는 시간 동작 이전에, 상기 제2 기기가 상기 제1 기기와 핸드셰이킹을 수행하도록 상기 송수신부를 제어 — 상기 핸드셰이킹에 따라 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보가 갱신되고, 상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태는 상기 제2 기기로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)됨 — 하도록 더 구성되고, 상기 송수신부는, 상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제1 기기로부터 송신된 클록에 관한 시간 정보를 상기 제1 기기로부터 수신하도록 더 구성된다.

[0024] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성 — 상기 제1 벨 쌍은 상기 제2기기의 클록과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제1 보조(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클록과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제2 보조 비트 간에 생성됨 — 하고, 상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제2 기기와 상기 표준 클록 간의 제2 양자 채널을 통해 상기 표준 클록으로 양자 전송(teleportation) — 상기 제2 기기와 상기 표준 클록 간의 제2 일반 채널을 통해 추가 정보를 상기 표준 클록으로 전송하는 것을 포함 — 하도록 상기 송수신부를 제어하고, 상기 표준 클록에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신하도록 상기 송수신부를 제어하도록 더 구성될 수 있다.

[0025] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제2 기기와 상기 표준 클록 간의 얽힘 상태를 공유하고, 상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제2 기기와 상기 표준 클록의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클록과 공유하고, 주파수 조정 신호(frequency deviation signal)를 위상 안정화 링크를 통해 상기 표준 클록으로부터 수신하도록 상기 송수신부를 제어하고, 상기 제2 기기의 국부 발진기(LO: Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정하도록 더 구성될 수 있다.

발명의 효과

[0026] 본 발명에 따른 방법은, 양자 네트워크에서 기기 간 시간 정보를 이용하여 시간 동기화를 수행할 수 있다는 장점이 있다.

[0027] 본 발명에 따른 방법은, 양자 네트워크에서 표준 클록으로부터 특정 링크를 이용하여 정보를 이용하여 주파수 동조화를 수행할 수 있다는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

- [0028] 도 1은 본 발명에 따른 복수의 네트워크 기기와 표준 클록을 포함하는 양자 네트워크 시스템을 나타낸다.
- 도 2는 본 발명에 따른 양자 네트워크 기기의 상세 구성을 도시한다.
- 도 3은 본 발명에 따른 스왑 동작의 시스템 상태의 개념도를 도시한다.
- 도 4는 본 발명에 따른 제1 및 제2 기기와 표준 클록을 포함하는 양자 시스템에서, 세 개의 클록 간에 존재하는 채널의 형태를 나타낸다.
- 도 5는 본 발명에 따른 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되는 양자 네트워크 동기화 방법의 흐름도를 나타낸다.
- 도 6은 본 발명에 따른 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되는 양자 네트워크 동기화 방법의 흐름도를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0029] 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.
- [0030] 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용한다.
- [0031] 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.
- [0032] 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.
- [0033] 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.
- [0034] 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않아야 한다.
- [0035] 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.
- [0036] 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.
- [0037] 이하, 본 발명에 따른 양자 네트워크 동기화 방법 및 동기화를 수행하는 기기에 대해 살펴보기로 하자.
- [0038] 이와 관련하여, 도 1은 본 발명에 따른 복수의 네트워크 기기와 표준 클록을 포함하는 양자 네트워크 시스템을 나타낸다. 도 1에 도시된 바와 같이, 양자 네트워크 시스템은 제1 기기(100), 제2 기기(200) 및 표준 클록(300)을 포함한다. 이때, 제1 기기(100)와 제2 기기(200)는 각각 Alice와 Bob에 의해 소지되는 것으로 간주할 수 있다.
- [0039] 도 1에 도시된 바와 같이, 제1 기기(100)와 제2 기기(200) 간에는 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)이 형성된다. 또한, 제1 기기(100) 또는 제2 기기(200)와 표준 클록(300) 간에는 제2 일반 채널, 제2 양자 채널, 위상 안정화 링크(phase stabilized link)가 형성된다.

- [0040] 한편, 도 2는 본 발명에 따른 양자 네트워크 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 그 역도 성립한다.
- [0041] 제1 기기(100)는 제어부(110), 송수신부(120) 및 메모리(130)를 포함한다. 마찬가지로, 제2 기기(200)도 제어부(210), 송수신부(220) 및 메모리(230)를 포함한다. 도 1과 도 2를 참조하여, 본 발명에 따른 양자 네트워크 기기에 의한 동기화 동작을 살펴보면 다음과 같다.
- [0042] 먼저, 송신 기기에 해당하는 제1 기기(100)에서의 동작에 대해 살펴보면 다음과 같다.
- [0043] 송수신부(120)는 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 수신 기기인 제2 기기(200)로 시간 정보를 송신하도록 구성된다. 또한, 송수신부(120)는 상기 일반 채널과 상기 양자 채널을 통해 제2 기기(200)로부터 시간 정보를 수신할 수 있다.
- [0044] 제어부(110)는 상기 송신된 시간 정보에 기반하여 상기 제2 기기(200)와 시간 동기화(synchronization)를 수행하도록 구성된다. 또한, 제어부(110)는 상기 위상 안정화 링크를 통해 교환된 정보에 기반하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행하도록 더 구성된다.
- [0045] 메모리(130)는 양자 정보 또는 일반 정보를 저장하도록 구성된다. 보다 상세하게는, 메모리(130)는 시간 동기화와 주파수 동조화와 관련된 양자 정보 또는 일반 정보를 저장하도록 구성된다.
- [0046] 시간 동기화와 관련하여, 상기 제어부(110)는, 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보를 갱신하도록 더 구성될 수 있다. 또한, 상기 제어부(110)는 상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태를 상기 제2 기기(200)로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)하도록 더 구성될 수 있다.
- [0047] 상기 송수신부(110)는, 클럭에 관한 시간 정보를 상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제2 기기(200)로 전달하도록 더 구성될 수 있다.
- [0048] 주파수 동조화와 관련하여, 상기 제어부(110)는, 제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성하도록 더 구성될 수 있다. 이때, 상기 제1 벨 쌍은 상기 제1 기기(100)의 클럭과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기(100)의 제1 보조(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클럭(300)과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기(100)의 제2 보조 비트 간에 생성된다.
- [0049] 또한, 상기 제어부(110)는 상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제1 기기(100)와 상기 표준 클럭(300) 간의 제2 양자 채널을 통해 상기 표준 클럭으로 양자 전송(teleportation)하도록 상기 송수신부(120)를 제어하도록 더 구성될 수 있다. 또한, 상기 제어부(110)는 상기 표준 클럭(300)에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신하도록 상기 송수신부(120)를 제어하도록 더 구성될 수 있다.
- [0050] 주파수 동조화에서, 얽힘 상태와 주파수 조정에 대해 살펴보면 다음과 같다. 상기 제어부(110)는 상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제1 기기(100)와 상기 표준 클럭(300) 간의 얽힘 상태를 공유하도록 더 구성될 수 있다. 또한, 상기 제어부(110)는 상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제1 기기(100)와 상기 표준 클럭(300)의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클럭(300)과 공유하도록 더 구성될 수 있다. 또한, 상기 제어부(110)는 주파수 조정 신호(frequency deviation signal)를 상기 위상 안정화 링크를 통해 상기 표준 클럭(300)으로부터 수신하도록 상기 송수신부(110)를 제어하고, 상기 제1 기기(100)의 국부 발진기(LO: Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정하도록 더 구성될 수 있다.
- [0051] 전송된 얽힘 상태와 관련하여, 과잉 얽힘(Hyper-entanglement)이 고려될 수 있다. 과잉 얽힘은 복수의 자유도를 갖는 동시 얽힘을 의미한다. 과잉 얽힘에 대한 일반적 표현은 다음과 같이 주어질 수 있다.

수학식 1

$$|\phi\rangle \propto \left(|0\rangle_A^{\text{spin}} |0\rangle_B^{\text{spin}} + |1\rangle_A^{\text{spin}} |1\rangle_B^{\text{spin}} \right) \otimes \left(|0\rangle_A^{\text{OAM}} |0\rangle_B^{\text{OAM}} + |1\rangle_A^{\text{OAM}} |1\rangle_B^{\text{OAM}} \right)$$

[0052]

- [0053] 여기서, 'A'와 'B'는 스핀, 궤도 각 운동(OAM: orbital angular momentum) 상태에서 얽힘을 공유하는 두 개의 클록을 의미한다.
- [0054] 다음으로, 수신 기기에 해당하는 제2 기기(200)에서의 동작에 대해 살펴보면 다음과 같다.
- [0055] 송수신부(220)는 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 송신 기기인 제1 기기(100)로부터 시간 정보를 수신하고, 위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클록(standard clock, 300)과 통신하도록 구성된다.
- [0056] 제어부(210)는 상기 수신된 시간 정보에 기반하여 상기 제1 기기(100)와 시간 동기화(synchronization)를 수행하고, 상기 위상 안정화 링크를 통해 교환된 정보에 기반하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행하도록 구성된다.
- [0057] 시간 동기화와 관련하여, 상기 제어부(210)는, 상기 제2 기기(200)가 상기 제1 기기(100)와 핸드셰이킹을 수행하도록 상기 송수신부를 제어하도록 더 구성될 수 있다. 이와 관련하여, 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)로 특정 에너지 수준을 지정하는 시간 동작 이전에, 제어 동작이 이루어질 수 있다. 한편, 상기 핸드셰이킹에 따라 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보가 갱신될 수 있다. 또한, 상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태는 상기 제2 기기(200)로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)될 수 있다. 상기 송수신부(220)는, 상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제1 기기(100)로부터 송신된 클록에 관한 시간 정보를 상기 제1 기기(100)로부터 수신하도록 더 구성될 수 있다.
- [0058] 주파수 동조화와 관련하여, 상기 제어부(210)는, 제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성하도록 더 구성될 수 있다. 이때, 상기 제1 벨 쌍은 상기 제2기기의 클록과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제1 보조(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클록과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제2 보조 비트 간에 생성될 수 있다.
- [0059] 또한, 상기 제어부(210)는, 상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제2 기기(200)와 상기 표준 클록(300) 간의 제2 양자 채널을 통해 상기 표준 클록(300)으로 양자 전송(telepration)하도록 더 구성될 수 있다. 이때, 상기 제2 기기(200)와 상기 표준 클록(300) 간의 제2 일반 채널을 통해 추가 정보가 상기 표준 클록(300)으로 전송될 수 있다. 또한, 상기 제어부(210)는, 상기 표준 클록(300)에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신하도록 상기 송수신부(220)를 제어하도록 더 구성될 수 있다.
- [0060] 주파수 동조화에서, 얽힘 상태와 주파수 조정에 대해 살펴보면 다음과 같다. 상기 제어부(210)는, 상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제2 기기(200)와 상기 표준 클록(300) 간의 얽힘 상태를 공유하도록 더 구성될 수 있다. 또한, 상기 제어부(210)는, 상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제2 기기(200)와 상기 표준 클록(300)의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클록(300)과 공유할 수 있다. 또한, 상기 제어부(210)는, 주파수 조정 신호(frequency deviation signal)를 위상 안정화 링크를 통해 상기 표준 클록(300)으로부터 수신하도록 상기 송수신부(220)를 제어하고, 상기 제2 기기(200)의 국부 발진기(LO: Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정하도록 더 구성될 수 있다.
- [0061] 이상에서는 양자 네트워크 기기의 동기화 동작에 대하여 구성 요소 측면에서 살펴보았다. 아래에서는, **1) 시스템 모델, 2) 프로토콜, 3) 결과 및 4) 논의 사항** 측면에서 양자 네트워크 기기의 동기화에 대하여 상세하게 살펴보기로 한다.
- [0062] **1) 시스템 모델**
- [0063] 본 발명에서는 Alice와 Bob에 해당하는 제1 및 제2 기기가 모두 자신의 국부 발진기(LO: Local Oscillator)를 가지는 것을 가정한다. Alice와 Bob은 다음 절에서 논의된 프로토콜을 이용하여 각자 시간 정보를 동기화할 수 있다. 이와 별도로, 이들은 LO 주파수를 정정하기 위해 가능할 때마다 표준 클록과 개별적으로 동조화(syntonize)할 수 있다. 세 개의 클록 (두 개는 Alice와 Bob에 의해 보유하고, 나머지 하나는 표준 클록임)의 내부에는, n개의 물리 양자 시스템이 존재한다. 이때, 편광 자유도(Polarization DOF)의 큐비트가 시간 정보를 위하여 사용된다. 큐비트는 LO에 의해 제공되는 주파수에 대응하는 시간 변화(time evolution)를 경험하게 된다.
- [0064] 임의의 연속적 DOF, 예컨대 물리 시스템과 연관된 에너지는 시간 정보의 주기적 저장을 위하여 사용된다. 클록의 기동(start) 이전에, 두 명의 당사자들, Alice와 Bob은 편광 DOF의 특정 시간 변화에 대응하여 (그들의 처분에 따라서 양자 시스템의) 에너지 DOF로 에너지 수준이 설정되는 것에 동의할 수 있다. 이러한 정보는 시간을

에너지 DOF로 주기적으로 업데이트하도록 사용된다.

[0065] Alice와 Bob 사이에는 클록 동기화를 달성하기 위해 양자 및 일반 채널이 존재한다. 일반 채널은 다음 절에서 논의되는 바와 같이 클록 동작을 위하여 사용될 양상블에 두 당사자가 동의하는 경우에 초기 설정 동안에서만 사용된다. 양자 채널은 일부 이동 양자 시스템(flying quantum systems), 예컨대 광자(photons)의 편광과 에너지 DOF를 모두 충실하게 송신한다.

[0066] 광자의 편광 DOF의 변화가 Alice와 Bob에 의한 양자 시스템의 편광 DOF의 변화를 따라간다는 것이 중요하다. Alice에서 Bob으로 광자가 진행 동안 소요되는 시간 Δ 를 계산하는데 광자의 편광 DOF가 사용된다. 에너지 DOF는 동기화 프로토콜이 시작(invoked)되는 순간에 Alice 측에서의 시간 변화 정보를 전달한다.

[0067] 양자 게이트는 Alice와 Bob 측 모두에 존재한다. Alice 측에서의 시각으로서 사용되는 양자 시스템의 에너지 DOF에서 광자에 연관된 대응하는 에너지 DOF로 시간 정보가 송신된다. Bob 측에서는, 광자와 연관된 에너지 DOF가 이러한 정보를 Bob 측의 클록으로 전달한다. 이에 후속하여, Bob의 클록으로 광자의 이동 시간을 제공하는 광자의 편광 DOF가 뒤따른다. 이러한 절차는 서로 다른 입자들의 DOF들 간에 공유하는 이러한 정보를 위한 양자 게이트의 사용을 요구한다. 이러한 게이트의 이용에 대한 설명은 논의에 관한 절에서 주어진다.

[0068] 주파수 동조(syntonization)의 목적으로, 위상 동기 링크가 두 당사자에 의해 보유되는 두 개의 클록 중 하나와 표준 클록 간에 제공된다. 이러한 링크의 목적은 Alice/Bob의 클록과 연관된 LO의 주파수를 분석을 위한 표준 클록으로 전달하는 것이다. 또한, 두 당사자들 각각과 표준 클록 간에 양자 채널이 존재한다; 이는 엔드 파티들 간에 얽힘을 구축할 수 있도록 한다. Alice 측에서 벨 기저 측정(ell basis measurement)을 이용하고, 사실상 큐비트의 전달(teleportation)에 영향을 미치는 일반 채널에 대한 측정 결과를 송신하여 비-로컬 당사자들 간에 얽힘이 공유된다.

[0069] Alice/Bob과 표준 클록 간 통신의 이용 가능성이 제한되어, 정규 동기화를 위한 기본 자원으로서 두 개의 클록 간에 시간 동기화의 이용 가능성을 유도하는 것으로 가정된다.

[0070] 2) 프로토콜

[0071] 클록 동작 이전에, Alice와 Bob은 클록으로서 사용될 싱글릿(singlet) 상태를 공유한다. 동일한 상태하에서 Alice와 Bob의 클록 모두에서 싱글릿 상태가 시간에 따라 변화하지 않기 때문에, $t = 0$ 이전에 티킹(ticking)이 존재하지 않을 것이다. 시간 $t = 0$ 에서, Alice는 $\{|pos\rangle, |neg\rangle\}$ 기저로 얽힘 쌍의 절반에 관한 측정을 수행한다.

[0072] 이는 두 가지 유형의 양상블들을 아래의 수학적식과 같이 유도한다.

수학적식 2

$$\begin{aligned} |\psi^1\rangle &= |pos\rangle_{\text{Alice}} |neg\rangle_{\text{Bob}} \\ |\psi^2\rangle &= |neg\rangle_{\text{Alice}} |pos\rangle_{\text{Bob}} \end{aligned}$$

[0073]

[0074] 일반 통신을 통해, Alice와 Bob은 클록 동작을 위해 선택된 양상블에 대하여 필요한 사항을 결정한다. 두 개의 클록에 대하여 동기화된 시각을 보증할 것이기 때문에, 전체적인 초기 설정은 유용하다. Alice 및 Bob 측 모두에서 발생하는 동일한 변화를 이용하여, 이들은 계속하여 동기화된 클록을 보유하게 될 것이지만, LO 주파수의 임의의 변동(fluctuations)은 두 개의 클록 중 하나에 상이한 변화를 초래할 것이므로 클록이 비동기 상태가 되도록 한다.

[0075] 전술된 문제점을 해결하기 위해, 클록은 재-동기화될 필요가 있고, 이를 위하여 두 가지 옵션: 동기화(synchronization) 및 동조화(syntonization)를 갖는다. 동기화는 Alice와 Bob의 클록 간에 직접 대응에 의해 달성되는 반면에, 동조화는 Alice/Bob과 연관된 LO의 변동을 제거하기 위하여 표준 클록을 이용하여 달성된다. 이러한 두 가지 관점의 상세사항 및 이들 연구에 관하여, 다음 절에서 설명될 것이다.

[0076] 한편, 전술된 프로토콜과 이후에 설명된 시간 동기화 및 주파수 동조화와 관련하여, 설명하면 다음과 같다.

[0077] A. 얽힘은 분포된 대상(distributed parties)과 연관된 양자 시스템의 편광과 궤도 각 운동으로 준비된다.

이때, 얽힘은 과잉 얽힘일 수 있다.

[0078] B. 동기화된 클록은 편광 DOF로 각각의 대상 측에서 생성된다.

[0079] C. 편광 DOF로 얽힌 네트워크의 클록의 임의의 위상을 추적하기 위해 궤도 각 운동 DOF가 사용된다. 클록의 국부 변화의 이상(anomaly)이 편광 DOF의 다분 얽힌 상태에서 임의의 위상 값을 발생시키면, 위상 값은 양자 스왑 게이트를 이용하여 궤도 운동 DOF로 변환된다.

[0080] D. 궤도 DOF에서 측정이 수행되고, 도입된 위상 값이 예측된다.

[0081] E. 이후에, 이러한 도입된 위상 값이 위상-안정화된 링크를 통해 각각의 클록으로 평균 정정 주파수 신호를 송신하여, 편광 DOF에서 상쇄된다.

[0082] A. 동기화(synchronization)

[0083] 동기화의 목표는 Bob의 클록을 Alice의 클록과 동일한 시간으로 설정하는 것이다. 이를 달성하기 위해, Alice와 Bob은 클록 동작 이전에 핸드셰이크를 수행하여, 특정 에너지 레벨을 특정 시간에 대응하는 에너지 DOF로 지정한다. 편광 DOF의 시간 변동에 대응하여 자신의 클록을 통해 보여지는 시간에 따라, Alice는 자신의 에너지 DOF를 갱신한다.

[0084] 동기화를 위한 시나리오의 도식적 표현이 도 1에 도시되고, 여기서 Alice는 Bob측으로 시간 정보를 전송하기 위해 일반 및 양자 채널 모두를 활용한다. 동기화 프로토콜이 시작되는 경우, Alice는 양자 시스템의 에너지 DOF로 보유되는 상태를 Bob에게 송신될 광자의 에너지 DOF로 변환한다. 이동 양자 시스템을 달성하기 위하여 효율적인 자원 중 하나이기 때문에, 광자가 사용된다. 초기에, 광자의 편광은, 예컨대, $|E_0\rangle$ 고유 상태에서 정상 상태(stationary)이므로, 시간에 따라 변화하지 않는다. 시간 t_0 에서, 광자의 편광 DOF가 하다마드 변환을 이용하는 시간-변화 상태로 전환되는 동안에, Alice는 자신의 클록에 관한 시간 정보를 광자의 에너지 DOF로 전달한다. 이때, 하다마드 변환을 이용하는 시간-변화 상태는 아래의 수식과 같이 표현된다.

수학식 3

$$|\text{pos}\rangle = \mathcal{H} |E_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|E_0\rangle + |E_1\rangle)$$

[0085]

[0086] 여기서, $|E_0\rangle$ 와 $|E_1\rangle$ 는 두 개의 정상 상태를 나타내고, $|\text{pos}\rangle$ 는 시간-변화 상태이다. 공간을 통해 전파되는 광자의 시간 변화는 Alice와 Bob의 클록에 대한 해밀토니언(hamiltonian)과 같은 형태의 해밀토니언을 갖는다.

[0087] 이제 편광 DOF는 Bob 측에 도달하는 광자에 의해 소요된 시간을 누적할 것이다. 각각의 광자가 Bob 측에 도달할 때, 아래의 수식식에 따라 국부 위상만큼 변화될 것이다.

수학식 4

$$|\text{pos}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{i\omega t} |E_0\rangle + e^{-i\omega t} |E_1\rangle)$$

[0088]

[0089] 이동하는 광자에 의해 소요되는 시간 Δ 의 관점에서, 전체 광자 펄스는 편광 DOF에서 동일한 변화를 경험한다. Bob 측에서, 측정은 광자의 편광 DOF에 대하여 수행되고, 광자의 이동의 예측 시간에 관한 정보는 Bob의 클록에 추가된다. 동시에, 광자의 에너지 DOF가 Bob의 클록의 시간을 갱신하고, 두 클록은 동일한 시간을 갖게 된다.

[0090] B. 동조화(Syntonization)

[0091] Alice 및/또는 Bob의 클록이 자신의 주파수를 표준 클록으로 조정하는 권한을 가질 때마다, 동조화 프로토콜이 활성화된다. 이러한 프로토콜과 관련하여, Alice/Bob에 의해 보유되는 클록 중 하나와 표준 클록 간의 큐비트의 얽힌 네트워크를 달성하기 위해 보조(ancilla) 큐비트가 사용되는 반면에 표준 클록은 또한 n 큐비트를 갖는다. 이

때, n개의 초기 양상블의 제1 또는 제2 부분에 실제로 대응하는 Alice와 Bob과 연관된 n 큐비트를 고려하기로 하자.

[0092] 동조화 방식은 도 1에 도시되고, 여기서, Alice/Bob은 일반, 양자 및 위상-안정화 링크를 통해 표준 클럭과 통신한다. Alice가 표준 클럭과 통신할 수 있어서 자신의 LO 주파수를 안정화시킬 수 있다고 가정하자. Alice는 자신의 클럭의 제1 큐비트 1_{Alice} 와 자신의 보조 비트 a_1 간에 벨 쌍을 생성하고, 이는 $|00\rangle_{a_1 1_{\text{Alice}}} + |11\rangle_{a_1 1_{\text{Alice}}} / \sqrt{2}$ 에 해당한다. 또한, Alice는 자신의 제2 보조 비트 b_1 과 표준 클럭의 제1 큐비트 1_{Stan} 간에 다른 벨 쌍을 생성할 수 있고, 이는 $|00\rangle_{b_1 1_{\text{Stan}}} + |11\rangle_{b_1 1_{\text{Stan}}} / \sqrt{2}$ 에 해당한다. Alice의 두 개의 보조 큐비트에 관한 로컬 벨 기저 측정과 대응하는 일반 측정 결과의 송신은 큐비트의 전달을 유도한다. 이는 결과적으로 아래의 수학적식에 의해 제공되는 바와 같이, Alice와 표준 클럭의 제1 클럭 큐비트에 의해 공유되는 얽힌 상태를 초래한다.

수학적식 5

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle_{1_{\text{Alice}} 1_{\text{Stan}}} + |11\rangle_{1_{\text{Alice}} 1_{\text{Stan}}})$$

[0093]

[0094] 최종적으로, 표준 클럭과 Alice의 클럭 각각에서, 나머지 n-1 큐비트를 위한 두 클럭에서의 다른 클럭 큐비트를 타겟하고, 1_{Alice} 와 1_{Stan} 에 기반하는 집합적인 얽힘 동작을 이용하여, GHZ 상태는 아래의 수학적식에 의해 달성된다.

수학적식 6

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle)$$

[0095]

[0096] 여기서, $|0\rangle$ 과 $|1\rangle$ 은 모든 큐비트의 상태이고, Alice와 표준 클럭 모두에 연관된다.

[0097] 일단 얽힘이 공유되면, Alice의 LO의 표준화는 Alice의 클럭과 표준 클럭을 피딩하는 두 개의 발진기(oscillators)의 주파수들 간의 임의의 부정합을 찾아내는 것이다. 부정합이 있으면, GHZ 상태에서 아래의 수학적식과 같이 상대적인 위상 값이 도입(introduce)될 수 있다.

수학적식 7

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + e^{i(\chi + N\phi)} |1\rangle)$$

[0098]

[0099] 여기서, χ 는 초기 위상을 나타내고, ϕ 는 Alice와 표준 클럭의 총 큐비트 개수인 N으로 스케일링된 표준 주파수로부터의 LO의 주파수의 변동에 대한 측정이므로, 하이젠베르크 스케일을 유도한다. N이 클수록, 위상 ϕ 의 예측은 정확하게 될 것이다. 일단 위상 ϕ 가 예측되면, 주파수 편차(δ)는 아래의 수학적식과 같이 결정된다.

수학적식 8

$$\phi = N\delta T$$

[0100]

[0101] 여기서, δ 는 표준 클록으로부터 Alice의 클록의 주파수 편차이고, T 는 위상 예측을 위한 큐빗 질의 (interrogation) 동안에 소요된 시간이다.

[0102] 최종적으로, Alice에게 위상 안정화 링크를 통한 주파수 편차 신호가 주파수(ω_0)로 제공되고, 주파수 편차 δ 와 LO 주파수 ν 와 관련하여, 클록의 미래 동작을 위하여 아래의 수학적식과 같은 관계가 성립한다.

수학적식 9

[0103]
$$\omega_0 = \nu - \delta$$

[0104] 3) 결과

[0105] 동기화 프로토콜은 구성된 클록에 대하여 시간에 따른 주기적 동기화를 달성한다. 이러한 프로토콜의 정확성은 동기화 시간과 클록의 자율 동작(free-run) 간의 관계에 직접적으로 의존하며, 아래의 수학적식과 같은 관계가 성립한다.

수학적식 10

[0106]
$$T_{\text{sync}} \leq T_{\text{corr}}$$

[0107] 여기서, T_{corr} 은 클록 동작의 정격(nominal) 듀레이션으로, 시간 정보의 부정확성은 상기 듀레이션 동안 허용 가능하다. 이러한 정격 듀레이션은 인공 지능 네트워크와 유사한 임의의 예측 감시 머신 러닝 알고리즘을 이용하여 계산될 수 있다.

[0108] T_{sync} 는 광자의 편광과 에너지 DOF 및 Bob의 클록 사이의 스왑 동작에 의해 한정되는 동기화 시간이다.

[0109] 한편, 스왑 동작과 관련하여 상세하게 살펴보면 다음과 같다. 2차원의 자유도는 분리가능한 양자 시스템을 구성한다. 각각의 양자 서브 시스템은 얽힌 벨 쌍을 이룬다. 두 개의 양자 서브 시스템에는 공간적으로 이격된 광자들이 존재한다. 한편, 이러한 시스템의 전체적인 상태 $|\psi\rangle$, 로컬 위상의 도입에 의한 변화된 상태 $|\psi'\rangle$ 와 원하는 상태 $|\psi''\rangle$ 는 아래의 수학적식과 같이 결정된다.

수학적식 11

[0110]
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|10\rangle_{AB} - |01\rangle_{AB}) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle_{A'B'} + |10\rangle_{A'B'})$$

[0110]
$$|\psi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|10\rangle_{AB} - e^{i\phi} |01\rangle_{AB}) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle_{A'B'} + |11\rangle_{A'B'})$$

[0110]
$$|\psi''\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|10\rangle_{AB} - |01\rangle_{AB}) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle_{A'B'} + e^{i\phi} |11\rangle_{A'B'})$$

[0111] 양자 시스템 A와 A'의 밀도 행렬은 아래의 수학적식과 같이 결정된다.

수학식 12

$$\rho_A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i2\phi} \end{bmatrix}$$

$$\rho_{A'} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0112]

[0113] 한편, 도 3은 본 발명에 따른 스왑 동작의 시스템 상태의 개념도를 도시한다. 도 3에 도시된 바와 같이, 궤도 각 운동(OAM)에 대한 정보(상태)에 스왑 동작과 편광(POL: Polarization)에 대한 정보(상태)에 스왑 동작이 제1 기기 (Alice)와 제2 기기(Bob)에 수행될 수 있다.

[0114] 한편, 두 개의 시스템의 결합된 상태는 아래의 수학식과 같이 표현될 수 있다.

수학식 13

$$\rho_{AA'} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i2\phi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i2\phi} \end{bmatrix}$$

[0115]

[0116] 여기에 스왑 동작을 적용하면, 아래의 수학식과 같이 표현될 수 있다.

수학식 14

$$\sigma_{AA'} = S \rho_{AB} S^\dagger = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i2\phi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i2\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0117]

[0118] 스왑 동작이 적용된 최종적인 상태는, 아래의 수학식과 같이 표현될 수 있다.

수학식 15

$$\sigma_{AA'} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i2\phi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i2\phi} \end{bmatrix}$$

[0119]

[0120] 그러므로, 두 개의 밀도 행렬 간의 스왑 동작이 수행되면, 결과적으로 새로운 밀도 행렬이 아래의 수식식과 같이 표현될 수 있다. 한편, 스왑 동작이 수행됨에 따라, 시스템 A와 A' 간의 밀도 행렬이 스왑 이전의 상대 시스템의 밀도 행렬로 대체되었음을 알 수 있다.

수학식 16

$$\rho_A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\rho_{A'} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i2\phi} \end{bmatrix}$$

[0121]

[0122] 이로 인하여, 양자 시스템의 스왑을 유도하고, 즉, B는 A가 아니라, 이제 A'에 얽히게 된다. 원하는 상태를 달성하기 위해, Bpb 측에도 스왑을 적용할 필요가 있다. 한편, 이는 두 개의 얽힌 시스템 간의 상태 스왑을 초래하므로, 원하는 상태는 아래의 수식식과 같이 표현될 수 있다.

수학식 17

$$|\psi''\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|10\rangle_{AB} - |01\rangle_{AB}) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle_{A'B'} + e^{i\phi} |11\rangle_{A'B'})$$

[0123]

[0124] 한편, 위상 편차와 관련하여, 전술된 프로토콜과 하이젠베르크 스케일링을 이용하여 동조화를 달성할 수 있다. 이와 관련하여, 위상 편차의 예측의 불확실성은 동조화의 목적으로 사용되는 큐비트의 개수에 비례하여 감소한다. 아래의 수식식은 위상 편차의 예측의 불확실성을 나타낸다.

수학식 18

$$\Delta\phi_{LO} = \frac{8}{\pi} \log(N)/N$$

[0125]

[0126] 여기서, N은 보조 큐비트를 포함하는 표준 클록과 Alice/Bob에 의해 보유되는 큐비트의 총 개수이다.

[0127] 4) 논의 사항

- [0128] 본 발명에서 논의된 프로토콜은 이용 가능한 자원하에서 복수의 당사자들(복수의 기기들)이 정확한 시간 정보를 유지하는 것을 가능하게 한다. 고려되는 자원은 Alice/Bob의 클록의 국부 발진기의 주파수에서의 임의의 변동을 조정하기 위해 사용될 수 있는 표준 클록의 이용가능성이다. 표준 클록이 이용 가능하면, 전술된 절차는 하이젠베르크 스케일링을 이용하는 위상 예측과 관련되고, 이는 차례로 Alice/Bob의 LO에서의 주파수 편차의 측정에 해당한다. 수학적 8을 통해 주파수 조정이 수행되고, 조정된 주파수가 위상 안정화 채널을 이용하여 Alice/Bob측에 전달된다.
- [0129] 시간 동기화의 목적으로, Bob의 클록은 자신의 시간을 Alice의 클록으로 조정한다. 이를 달성하기 위해, Alice는 양자 시스템과 연관된 에너지 DOF로 시간 정보를 주기적으로 저장한다. 이후에, Alice는 이러한 정보를 Bob측에 이러한 정보를 전송할 수 있는 광자로 변환한다.
- [0130] 프로토콜 시작 순간에 시간 정보는 광자 시스템의 에너지 DOF로 저장되고, 동시에 편광 DOF가 시간에 따라 변화하기 시작하도록 구성된다. 따라서, 광자의 편광 DOF는 광자의 이동 시간의 정보를 유지한다. Bob 측에서는, Bob의 클록 시간을 갱신하기 위해 이러한 DOF들이 사용된다. 양자 시스템들의 에너지 DOF들 간의 정보 전달을 위하여 양자 게이트가 요구된다. 이러한 프로토콜의 이점은 양자 클록 동기화를 위한 자원 활용에 있다. 프로토콜은 양측에 교란이 존재하는 경우에도 양 당사자들 간에 시간을 동기화할 수 있을 뿐만 아니라, 당사자들에게 잘못된 시간을 잘못 갱신하는 것을 방지하도록 표준 클록을 이용하는 클록의 주파수 조정을 할 수 있다.
- [0131] 미래 연구의 관점에서, 타이밍 정보와 클록 동기화를 계속하는 것과 관련되는 응용을 위하여 LO들의 온라인 주파수 조정을 달성하고 자원의 이용을 더 감소시키도록, 두 가지 프로토콜을 위한 기법들에 연구의 초점을 맞추는 것이다. 본 발명에서 제시된 프로토콜은 개 루프(open loop) 제어를 이용하고, 여기서 클록은 몇 개의 듀레이션 경과 후에 동기화된다. 하지만, 본 발명은 이에 한정되는 것은 폐 루프(closed loop) 제어를 구현하는 것에 초점을 맞출 수 있으므로, 클록 동기화의 임의의 부정확성에 대해 가장 빠르게 제거할 수 있다. 예를 들어, 폐 루프 제어 방식은 시간 동기화와 관련하여 수행될 수 있다. 이때, 제1 기기와 제2 기기(Alice와 Bob) 간에 시간 정보를 교환할 뿐만 아니라, 표준 클록으로부터 시간 동기화를 위한 시간 관련 정보를 교환할 수 있다.
- [0132] 또한, 폐 루프 제어 방식은 주파수 동조화와 관련하여 수행될 수 있다. 이때, 관련하여 수행될 수 있다. 이때, 제1 기기와 제2 기기(Alice와 Bob)는 위상 제어 링크를 통해서 표준 클록으로부터 주파수 조정 정보를 수신할 뿐만 아니라, 상대 측 기기와의 주파수 조정 관련 정보를 교환할 수 있다.
- [0133] 또한, 폐 루프 제어 방식과 관련하여, 제1 기기, 제2 기기(Alice와 Bob) 및 표준 클록 간에 모두 일반 채널, 양자 채널 및 위상 안정화 채널(링크)가 모두 존재하는 경우를 고려할 수 있다. 이와 관련하여, 도 4는 본 발명에 따른 제1 및 제2 기기와 표준 클록을 포함하는 양자 시스템에서, 세 개의 클록 간에 존재하는 채널의 형태를 나타낸다. 도 4에 도시된 바와 같이, 제1 기기, 제2 기기(Alice와 Bob) 및 표준 클록 간에 모두 일반 채널, 양자 채널 및 위상 안정화 채널 (링크)가 모두 존재한다. 예를 들어, clock A, B, C를 각각 제1 기기, 제2 기기, 및 표준 클록일 수 있다. 이때, 시간 동기화와 관련하여, 제2 기기는 제1 기기뿐만 아니라, 표준 클록으로부터 시간 관련 정보를 수신할 수 있다. 또한, 주파수 동조화와 관련하여, 제2 기기는 표준 클록뿐만 아니라, 제1기로부터 주파수 조정 관련 정보를 수신할 수 있다.
- [0134] 한편, 다른 측면에서의 초점은 위상 변동의 예측을 위한 머신 러닝 기법을 활용하고 동기화 네트워크의 정확성을 향상시키기 위해 채널 잡음 효과를 다루는 적응적인 방식을 이용하는 것이다.
- [0135] 전술된 내용을 토대로, 본 발명의 다른 측면에 따른 양자 네트워크 동기화 방법에 대해 살펴보면 다음과 같다. 이와 관련하여, 도 5는 본 발명에 따른 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되는 양자 네트워크 동기화 방법의 흐름도를 나타낸다. 한편, 도 6은 본 발명에 따른 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되는 양자 네트워크 동기화 방법의 흐름도를 나타낸다.
- [0136] 도 5를 참조하면, 양자 네트워크 동기화 방법은 시간 동기화 과정(S100), 주파수 동조화 과정(S200)을 포함한다. 시간 동기화 과정(S100)은 DOF 갱신 과정(S110), DOF 변환 과정(S120) 및 시간 정보 전달 과정(S130)을 포함할 수 있다. 또한, 주파수 동조화 과정(S200)은 벨 쌍 생성 과정(S210), 정보 전송 과정(S220) 및 정보 수신 과정(S230)을 포함한다. 또한, 주파수 동조화 과정(S200)은 얽힘 상태 공유 과정(S240), 부정합 식별 과정(S250) 및 로컬 주파수 조정 과정(S260)을 더 포함할 수 있다.
- [0137] 시간 동기화 과정(S100)에서, 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 수신 기기

인 제2 기기로 시간 정보를 송신하여 상기 제2 기기와 시간 동기화(synchronization)를 수행한다.

- [0138] 구체적으로, DOF 갱신 과정(S110)에서, 상기 제1 기기가 자신의 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보를 갱신한다.
- [0139] DOF 변환 과정(S120)에서, 상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태를 상기 제2 기기로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)한다.
- [0140] 시간 정보 전달 과정(S130)에서, 상기 제1 기기가 자신의 클럭에 관한 시간 정보를 상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제2 기기로 전달한다. 이때, 상기 시간 정보 전달 과정(S130)에서, 상기 광자의 편광 DOF가 시간 변화(time evolution) 상태로 전환(convert)되고, 상기 제2 에너지 DOF와 상기 전환된 편광 DOF를 이용하여 상기 시간 정보가 전달될 수 있다.
- [0141] 한편, 주파수 동조화 과정(S200)에서, 위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클럭(standard clock)과 통신하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행한다.
- [0142] 구체적으로, 벨 쌍 생성 과정(S210)에서, 상기 제1 기기가 제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성한다. 이때, 상기 제1 벨 쌍은 상기 제1기기의 클럭과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기의 제1 보조(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클럭과 관련된 큐비트와 상기 제1 기기의 제2 보조 비트 간에 생성된다.
- [0143] 정보 전송 과정(S220)에서, 상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제1 기기와 상기 표준 클럭 간의 제2 양자 채널을 통해 상기 표준 클럭으로 양자 전송(telepration)한다. 이때, 상기 제1 기기와 상기 표준 클럭 간의 제2 일반 채널을 통해 추가 정보를 상기 표준 클럭으로 전송하는 것을 포함할 수 있다. 한편, 정보 수신 과정(S230)에서, 상기 표준 클럭에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신한다.
- [0144] 얽힘 상태 공유 과정(S240)에서, 상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제1 기기와 상기 표준 클럭 간의 얽힘 상태를 공유한다. 한편, 부정합 식별 과정(S250)에서, 상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제1 기기와 상기 표준 클럭의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클럭과 공유한다. 또한, 로컬 주파수 조정 과정(S260)에서, 상기 제1 기기의 국부 발진기(L0: Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정한다.
- [0145] 도 6을 참조하면, 양자 네트워크 동기화 방법은 시간 동기화 과정(S300), 주파수 동조화 과정(S400)을 포함한다. 시간 동기화 과정(S300)은 핸드셰이킹 과정(S310) 및 시간 정보 수신 과정(S320)을 포함할 수 있다. 또한, 주파수 동조화 과정(S400)은 벨 쌍 생성 과정(S410), 정보 전송 과정(S420) 및 정보 수신 과정(S430)을 포함한다. 또한, 주파수 동조화 과정(S400)은 얽힘 상태 공유 과정(S440), 부정합 식별 과정(S450) 및 로컬 주파수 조정 과정(S460)을 더 포함할 수 있다.
- [0146] 시간 동기화 과정(S300)에서, 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 송신 기기인 제1 기기로부터 시간 정보를 수신하여 상기 제1 기기와 시간 동기화(synchronization)를 수행한다.
- [0147] 구체적으로, 핸드셰이킹 과정(S310)에서, 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)로 특정 에너지 수준을 지정하는 시간 동작 이전에, 상기 제2 기기가 상기 제1 기기와 핸드셰이킹을 수행한다. 이때, 상기 핸드셰이킹에 따라 에너지 자유도(DOF: Degree of Freedom)인 제1 에너지 DOF에 관한 정보가 갱신되고, 상기 제1 에너지 DOF로 보유된 상태는 상기 제2 기기로 송신될 광자(photon)의 에너지 DOF인 제2 에너지 DOF로 변환(translate)된다.
- [0148] 또한, 시간 정보 수신 과정(S320)에서, 상기 제2 에너지 DOF를 이용하여 상기 제1 기기로부터 송신된 클럭에 관한 시간 정보를 상기 제1 기기로부터 수신한다. 이때, 상기 제2 에너지 DOF와 광자의 편광 DOF를 이용하여 상기 제1 기기로부터 전달된 상기 시간 정보가 수신되고, 상기 광자의 편광 DOF는 상기 제1 기기에 의해 시간 변화(time evolution) 상태로 전환(convert)된다.
- [0149] 한편, 주파수 동조화 과정(S400)에서, 위상 안정화 링크(phase stabilized link)를 통해 표준 클럭(standard clock)과 통신하여 주파수 동조화(syntonization)를 수행한다.
- [0150] 구체적으로, 벨 쌍 생성 과정(S410)에서, 상기 제2 기기가 제1 벨 쌍(Bell pair)과 제2 벨 쌍을 생성한다. 이때, 상기 제1 벨 쌍은 상기 제2기기의 클럭과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제1 보조(ancilla) 비트 간에 생성되고, 상기 제2 벨 쌍은 상기 표준 클럭과 관련된 큐비트와 상기 제2 기기의 제2 보조 비트 간에 생성된다. 한편, 정보 전송 과정(S420)에서, 상기 제1 및 제2 벨 쌍을 상기 제2 기기와 상기 표준 클럭 간의 제2 양자 채널

널을 통해 상기 표준 클록으로 양자 전송(teleportation)한다. 이때, 상기 제2 기기와 상기 표준 클록 간의 제2 일반 채널을 통해 추가 정보를 상기 표준 클록으로 전송하는 것을 포함한다.

[0151] 또한, 정보 수신 과정(S430)에서, 상기 표준 클록에 의한 상기 제1 및 제2 보조 비트의 로컬 벨 기저 측정과 상기 추가 정보에 대한 일반 측정에 대한 정보를 수신한다.

[0152] 한편, 얽힘 상태 공유 과정(S440)에서, 상기 수신된 로컬 벨 기저 측정과 일반 측정에 기반하여, 상기 제2 기기와 상기 표준 클록 간의 얽힘 상태를 공유한다. 또한, 부정합 식별 과정(S450)에서, 상기 공유된 얽힘 상태에 기반하여, 상기 제2 기기와 상기 표준 클록의 주파수 부정합(mismatch)과 위상 부정합에 대한 정보를 상기 표준 클록과 공유한다. 또한, 로컬 주파수 조정 과정(S460)에서, 주파수 조정 신호(frequency deviation signal)를 상기 위상 안정화 링크를 통해 상기 표준 클록으로부터 수신하고, 상기 제2 기기의 국부 발진기(Local Oscillator)의 로컬 주파수를 조정한다.

[0153] 전송된 프로토콜의 목적은, 새로운 양자 클록 동기화 방식을 제안하는 것이다. 또한, 이러한 방식은 효율적인 자원 활용을 달성하기 위해 파인 얽힘을 이용할 수 있다. 또한, 상기 프로토콜은 전체 네트워크 내의 각각의 클록에서 정확한 시간 정보를 연속적으로 임의의 다운타임 없이 온라인으로 제공하는 것과 관련된다.

[0154] 한편, 가능한 응용과 관련하여, 오프라인으로 진행하지 않고, 최소의 자원을 이용하여 스스로 동기화하는 네트워크의 클록을 제공하는 것이다. 따라서, 중력파(Gravitational waves)의 발견과 로컬화와 같은 복잡한 실험을 위하여 항상 정확한 시간 정보를 제공할 수 있다.

[0155] 예상되는 결과와 관련하여, 이용 가능한 자원을 효율적으로 활용하면서 오프라인 동기화에 요구되는 다운타임에서의 임의의 타이밍 정보의 손실을 방지하기 위한 온라인 클록 동기화를 달성할 수 있다.

[0156] 산업상 이용가능성과 관련하여, 서로 다른 시스템 간 실질적이고 정확한 시간 동기화를 제공할 수 있어, 제어 시스템과 응급 셧 다운 시스템과 같은 고도의 동기화를 요구하는 시스템에 이용 이용 가능하다.

[0157] 전송된 본 발명의 적어도 일 실시예에 따르면, 양자 네트워크에서 기기 간 시간 정보를 이용하여 시간 동기화를 수행할 수 있다는 장점이 있다.

[0158] 또한, 본 발명의 적어도 일 실시예에 따르면, 양자 네트워크에서 표준 클록으로부터 특정 링크를 이용하여 정보를 이용하여 주파수 동조화를 수행할 수 있다는 장점이 있다.

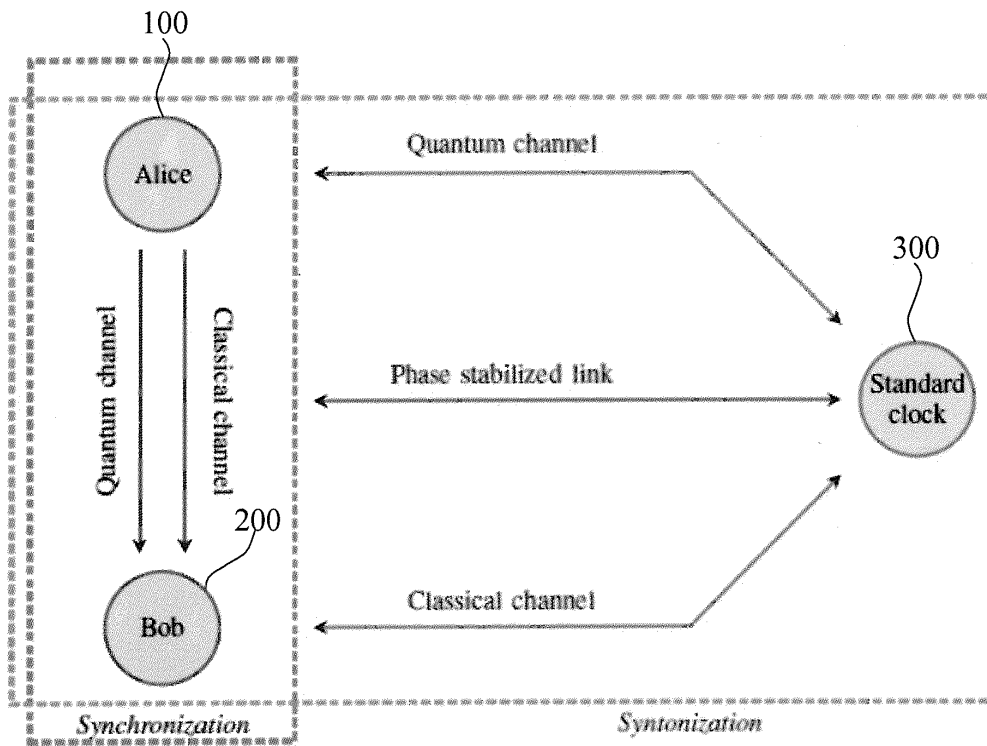
[0159] 소프트웨어적인 구현에 의하면, 본 명세서에서 설명되는 절차 및 기능뿐만 아니라 각각의 구성 요소들은 별도의 소프트웨어 모듈로도 구현될 수 있다. 상기 소프트웨어 모듈들 각각은 본 명세서에서 설명되는 하나 이상의 기능 및 작동을 수행할 수 있다. 적절한 프로그램 언어로 쓰여진 소프트웨어 어플리케이션으로 소프트웨어 코드가 구현될 수 있다. 상기 소프트웨어 코드는 메모리에 저장되고, 제어부(controller) 또는 프로세서(processor)에 의해 실행될 수 있다.

부호의 설명

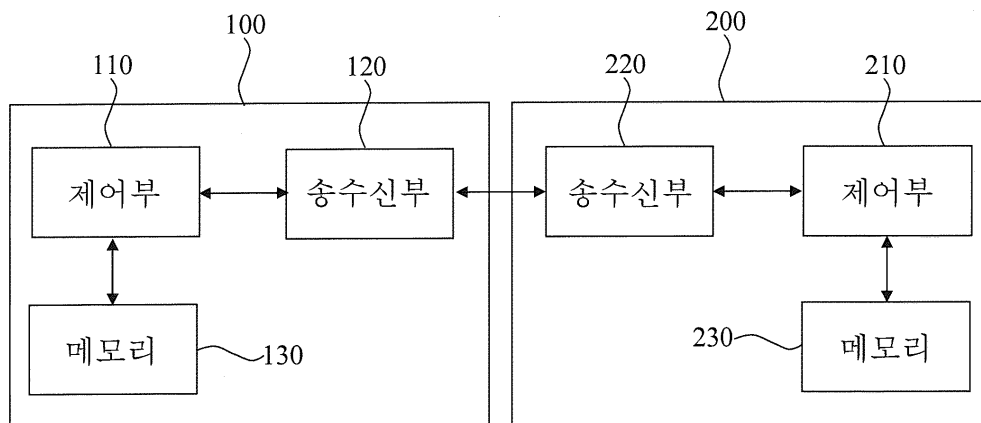
[0160] 100: 제1 기기 200: 제2 기기
300: 표준 클록
110, 210: 제어부 120, 220: 송수신부
130, 230: 메모리

도면

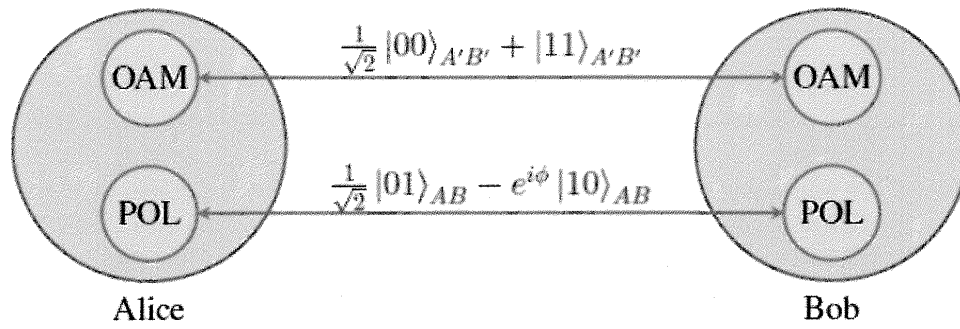
도면1



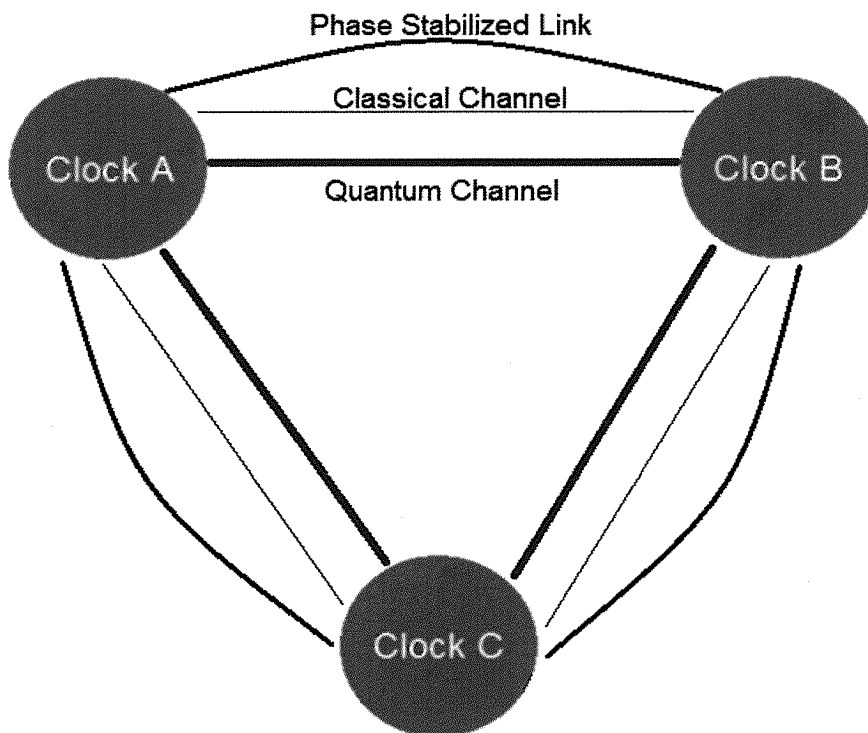
도면2



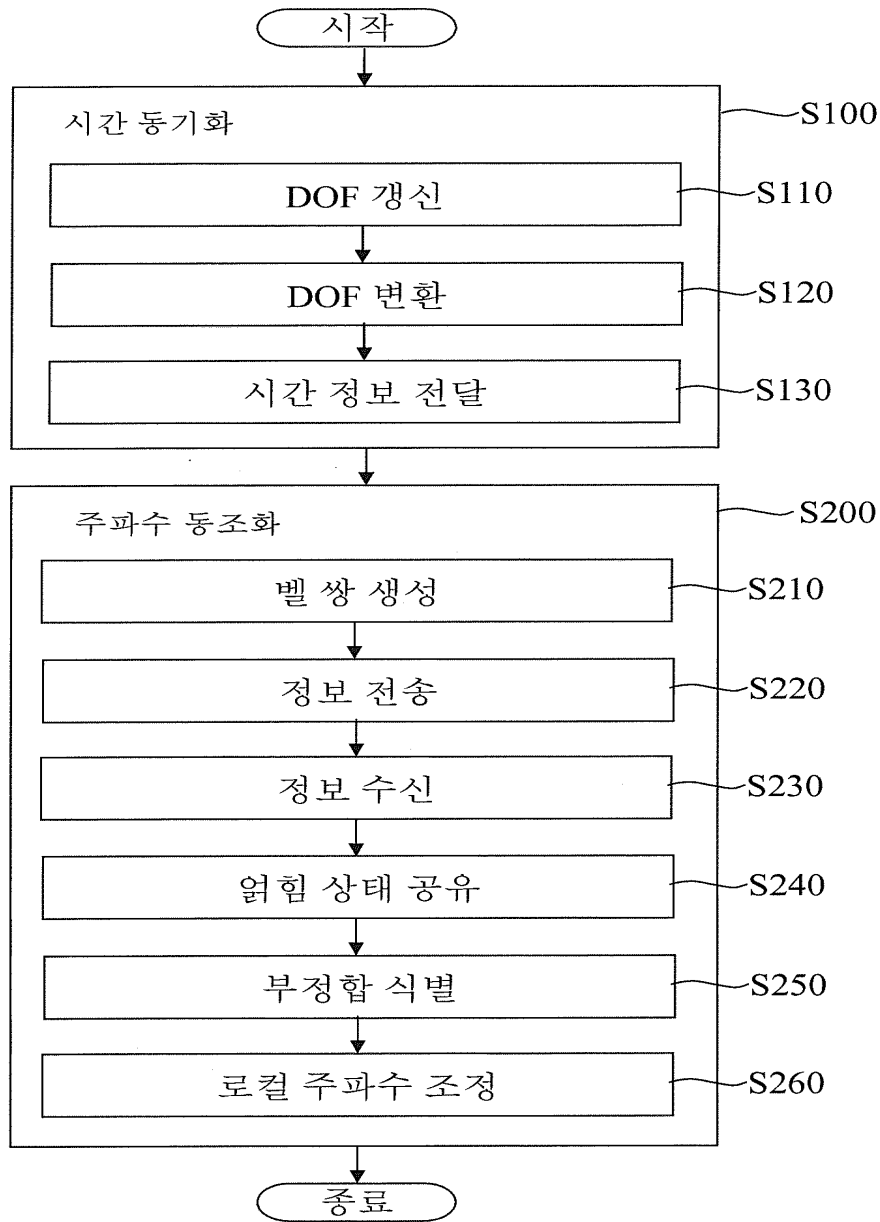
도면3



도면4



도면5



도면6

