



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2019년03월04일
(11) 등록번호 10-1953720
(24) 등록일자 2019년02월25일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H04B 10/70 (2013.01)

(52) CPC특허분류

H04B 10/70 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2017-0113985

(22) 출원일자 2017년09월06일

심사청구일자 2017년09월06일

(56) 선행기술조사문헌

Laszlo Gyongyosi, "The structure and quantum capacity of a partially degradable quantum channel," IEEE Access, 2014*

KR1020160079924 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

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)

(74) 대리인

김동용, 김홍석

전체 청구항 수 : 총 16 항

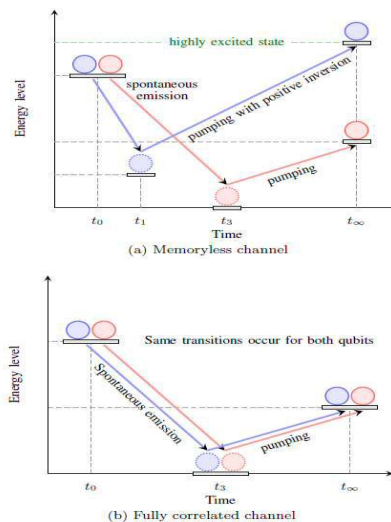
심사관 : 신상길

(54) 발명의 명칭 양자 채널 예측을 수행하는 양자 시스템 및 양자 채널 모델링 방법

(57) 요약

본 발명에 따른 양자 채널 예측을 수행하는 방법에 있어서, 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고, N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 수신 기기인 제2 기기로 전송하는 제1 양자 상태 전송 단계; 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신하는 제2 양자 상태 정보 수신 단계; 및 상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정하는 양자 채널 추정 단계를 포함하고, 양자 상태의 양자 상관 특성을 이용하여, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공할 수 있다.

대표도 - 도3



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2016R1A2B2014462
 부처명 미래과학창조부
 연구관리전문기관 한국연구재단
 연구사업명 개인연구지원사업(중견연구)
 연구과제명 양자 초업힘을 이용한 하이브리드 양자통신 핵심기술 연구
 기 여 율 1/2
 주관기관 경희대학교 산학협력단
 연구기간 2017.06.01 ~ 2018.05.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

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

명세서

청구범위

청구항 1

양자 채널 예측을 수행하는 방법에 있어서, 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고,

N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 수신 기기인 제2 기기로 전송하는 제1 양자 상태 전송 단계;

상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신하는 제2 양자 상태 정보 수신 단계; 및

상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정하는 양자 채널 추정 단계를 포함하고,

상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

로 결정되고,

여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이고, $\dagger$ 는 생성(creation) 연산자이고, μ 는 큐비트의 연속적인 사용의 전환(transitions of consecutive uses of qubit)이 동일할 확률이고,

상기 양자 채널 추정 단계는,

상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1 항에 있어서,

상기 양자 채널 추정 단계는,

시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 양자 부조화(quantum discord) 연산을 수행하는 단계;

상기 양자 부조화(quantum discord)에 기반하여, 상기 양자 채널이 위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장(thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정하는 채널 유형 결정 단계; 및,

상기 결정된 채널에 따라, 서로 다른 방식으로 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 제2 크라우스 연산자 추정 단계를 포함하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 4

제1 항에 있어서,

상기 양자 채널 추정 단계는,

상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대하여 WM (Weak Measurement) 및 QMR (Quantum Measurement Reversal) 중 적어도 하나를 수행하는 WM/QMR 수행 단계; 및

상기 WM/QMR과 연관된 측정 세기(measurement strength)와 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 컨커런스에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 제2 크라우스 연산자 추정 단계를 포함하는, 양자

채널 예측 수행 방법.

청구항 5

제3 항 또는 제4 항에 있어서,

상기 양자 채널 추정 단계는,

양자 채널(TCMQC: Time-correlated Markov quantum channel)에 의해 유도되는 두 번의 연속적인 채널의 사용(two consecutive use of channel) 간의 채널 메모리 및 채널 비상관(decoherence) 효과를 분석하는 채널 메모리/비상관 분석 단계를 더 포함하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 6

제1 항에 있어서,

상기 추정된 양자 채널에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터를 상기 제2 기기로 전달하는 채널 파라미터 전달 단계를 더 포함하고,

상기 제2 기기는 상기 전달된 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터 및 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 N개의 큐비트 시퀀스를 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 7

양자 채널 예측을 수행하는 방법에 있어서, 상기 방법은 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되고,

N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 송신 기기인 제1 기기로부터 수신하는 제1 양자 상태 수신 단계 - 상기 제1 양자 상태(ρ)는 상기 양자 채널을 통해 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)로 수신됨 -; 및

상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정하는 양자 채널 추정 단계를 포함하고,

상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

로 결정되고,

여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이고, $\dagger$ 는 생성(creation) 연산자이고, μ 는 큐비트의 연속적인 사용의 전환(transitions of consecutive uses of qubit)이 동일할 확률이고,

상기 양자 채널 추정 단계는,

상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 8

삭제

청구항 9

제7 항에 있어서,

상기 양자 채널 추정 단계는,

시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 양자 부조화(quantum discord) 연산을 수행하는 단계;

상기 양자 부조화(quantum discord)에 기반하여, 상기 양자 채널이 위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장(thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정하는 채널 유형 결정 단계; 및,

상기 결정된 채널에 따라, 서로 다른 방식으로 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 제2 크라우스 연산자 추정 단계를 포함하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 10

제7 항에 있어서,

상기 양자 채널 추정 단계는,

상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대하여 WM (Weak Measurement) 및 QMR (Quantum Measurement Reversal) 중 적어도 하나를 수행하는 WM/QMR 수행 단계; 및

상기 WM/QMR과 연관된 측정 세기(measurement strength)와 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 컨커런스에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 제2 크라우스 연산자 추정 단계를 포함하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 11

제9 항 또는 제10 항에 있어서,

상기 양자 채널 추정 단계는,

양자 채널(TCMQC: Time-correlated Markov quantum channel)에 의해 유도되는 두 번의 연속적인 채널의 사용(two consecutive use of channel) 간의 채널 메모리 및 채널 비상관(decoherence) 효과를 분석하는 채널 메모리/비상관 분석 단계를 더 포함하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 12

제7 항에 있어서,

상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터 및 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 N개의 큐비트 시퀀스를 추정하는 큐비트 시퀀스 추정 단계; 및

상기 추정된 양자 채널에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터를 상기 제1 기기로 전달하는 채널 파라미터 전달 단계를 더 포함하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 13

양자 채널 예측을 수행하는 양자 송신 기기에 있어서,

N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 수신 기기인 제2 기기로 전송하고, 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신하는 송수신부; 및

상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정하는 제어부를 포함하고,

상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

로 결정되고,

여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이고, $\dagger$ 는 생성(creation) 연산자이고, μ 는 큐비트의 연속적인 사용의 전환(transitions of consecutive uses of qubit)이 동일할 확률이고,

상기 제어부는, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 송신 기기.

청구항 14

삭제

청구항 15

제13 항에 있어서,

상기 제어부는,

시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 양자 부조화(quantum discord) 연산을 수행하고,

상기 양자 부조화(quantum discord)에 기반하여, 상기 양자 채널이 위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장(thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정하고, 그리고

상기 결정된 채널에 따라, 서로 다른 방식으로 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 송신 기기.

청구항 16

제13 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대하여 WM (Weak Measurement) 및 QMR (Quantum Measurement Reversal) 중 적어도 하나를 수행하고, 그리고

상기 WM/QMR과 연관된 측정 세기(measurement strength)와 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 킨커런스에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 송신 기기.

청구항 17

양자 채널 예측을 수행하는 양자 수신 기기에 있어서,

N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 송신 기기인 제1 기기로부터 수신하는 송수신부 - 상기 제1 양자 상태(ρ)는 상기 양자 채널을 통해 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)로 수신됨 -; 및

상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정하는 제어부를 포함하고,

상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

로 결정되고,

여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이고, $\dagger$ 는 생성(creation) 연산자이고, μ 는 큐비트의 연속적인 사용의 전환(transitions of consecutive uses of qubit)이 동일할 확률이고,

상기 제어부는, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 수신 기기.

청구항 18

삭제

청구항 19

제17 항에 있어서,

상기 제어부는,

양자 채널(TCMQC: Time-correlated Markov quantum channel)에 의해 유도되는 두 번의 연속적인 채널의 사용(two consecutive use of channel) 간의 채널 메모리 및 채널 비상관(decoherence) 효과를 분석하는 것을 특징으로 하는, 양자 수신 기기.

청구항 20

제17 항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터 및 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 N개의 큐비트 시퀀스를 추정하고, 그리고

상기 추정된 양자 채널에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터를 상기 제1 기기로 전달하는 것을 특징으로 하는, 양자 수신 기기.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 양자 채널 변환 방법 및 양자 채널 변환 시스템에 관한 것이다. 보다 상세하게는, 양자 네트워크에서 복수의 채널 중 어느 하나의 채널을 선택하는 방법 및 이를 수행하는 양자 송수신 기기에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 양자 상관(quantum correlation)은 양자 정보 과학의 다양한 잠재적인 응용을 위한 중요한 자원이다. 가장 널리 활용되는 양자 상관은 양자 얽힘(quantum entanglement)이고, 이는 양자 키 양자 기법 등에 활용될 수 있다. 또한, 이분 양자 상태에 대해 양자 상호 정보 및 일반 상관 사이에 차이로서 정의되는 일반 개념의 양자 상관으로서 양자 부조화(quantum discord)가 도입되었다.

[0003] 한편, 양자 얽힘과 달리, 양자 부조화는 특정한 분리 가능한 혼합 상태에 대해서도 양자 상관을 설명할 수 있는 장점을 갖고 있다.

[0004] 또한, 이러한 양자 상태와 관련된 양자 비-국부성(non-localities)은 환경과의 상호 작용에 쉽게 취약해질 수 있다는 문제점이 있다. 즉, 양자 잡음 또는 비-상관(decoherence)에 의해 양자 비-국부성은 쉽게 취약해질 수 있다는 문제점이 있다. 따라서, 양자 통신 및 보안에 있어서, 시간에 따른 양자 채널의 정확한 추정이 요구된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 따라서, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공하는 것을 목표로 한다.

[0006] 또한, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공하기 위해 양자 상태에 대한 여러 파라미터에 따른 최적의 양자 채널 추정 방법을 제공하는 것을 목표로 한다.

과제의 해결 수단

[0007] 상기와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명에 따른 양자 채널 예측을 수행하는 방법에 있어서, 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고, N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 수신 기기인 제2 기기로 전송하는 제1 양자 상태 전송 단계; 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신하는 제2 양자 상태 정보 수신 단계; 및 상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정하는 양자 채널 추정 단계를 포함하고, 양자 상태의 양자 상관 특성을 이용하여, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공할 수 있다.

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

[0008] 일 실시 예에서, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는 로 결

정되고, 여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이고, 상기 양자 채널 추정 단계는, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0009] 일 실시 예에서, 상기 양자 채널 추정 단계는, 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 양자 부조화(quantum discord) 연산을 수행하는 단계; 상기 양자 부조화(quantum discord)에 기반하여, 상기 양자 채널이

위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장(thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정하는 채널 유형 결정 단계; 및, 상기 결정된 채널에 따라, 서로 다른 방식으로 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 제2 크라우스 연산자 추정 단계를 포함할 수 있다.

[0010] 일 실시 예에서, 상기 양자 채널 추정 단계는, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대하여 WM (Weak Measurement) 및 QMR (Quantum Measurement Reversal) 중 적어도 하나를 수행하는 WM/QMR 수행 단계; 및 상기 WM/QMR과 연관된 측정 세기(measurement strength)와 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 컨커런스에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 제2 크라우스 연산자 추정 단계를 포함할 수 있다.

[0011] 일 실시 예에서, 상기 양자 채널 추정 단계는, 양자 채널(TCMQC: Time-correlated Markov quantum channel)에 의해 유도되는 두 번의 연속적인 채널의 사용(two consecutive use of channel) 간의 채널 메모리 및 채널 비상관(decoherence) 효과를 분석하는 채널 메모리/비상관 분석 단계를 더 포함할 수 있다.

[0012] 일 실시 예에서, 상기 추정된 양자 채널에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터를 상기 제2 기기로 전달하는 채널 파라미터 전달 단계를 더 포함하고, 상기 제2 기기는 상기 전달된 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터 및 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 N개의 큐비트 시퀀스를 추정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0013] 본 발명의 다른 양상에 따른, 양자 채널 예측을 수행하는 방법에 있어서, 상기 방법은 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되고, N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 송신 기기인 제1 기기로부터 수신하는 제1 양자 상태 수신 단계 - 상기 제1 양자 상태(ρ)는 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)로 수신됨 -; 및 상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정하는 양자 채널 추정 단계를 포함한다.

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

[0014] 일 실시 예에서, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는 로 결정되고, 여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이고, 상기 양자 채널 추정 단계는, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 한다.

[0015] 일 실시 예에서, 상기 양자 채널 추정 단계는, 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 양자 부조화(quantum discord) 연산을 수행하는 단계; 상기 양자 부조화(quantum discord)에 기반하여, 상기 양자 채널이 위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장(thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정하는 채널 유형 결정 단계; 및, 상기 결정된 채널에 따라, 서로 다른 방식으로 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 제2 크라우스 연산자 추정 단계를 포함할 수 있다.

[0016] 일 실시 예에서, 상기 양자 채널 추정 단계는, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대하여 WM (Weak Measurement) 및 QMR (Quantum Measurement Reversal) 중 적어도 하나를 수행하는 WM/QMR 수행 단계; 및 상기 WM/QMR과 연관된 측정 세기(measurement strength)와 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 컨커런스에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 제2 크라우스 연산자 추정 단계를 포함할 수 있다.

[0017] 일 실시 예에서, 상기 양자 채널 추정 단계는, 양자 채널(TCMQC: Time-correlated Markov quantum channel)에 의해 유도되는 두 번의 연속적인 채널의 사용(two consecutive use of channel) 간의 채널 메모리 및 채널 비상관(decoherence) 효과를 분석하는 채널 메모리/비상관 분석 단계를 더 포함할 수 있다.

[0018] 일 실시 예에서, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터 및 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 N개의 큐비트 시퀀스를 추정하는 큐비트 시퀀스 추정 단계; 및 상기 추정된 양자 채널에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터를 상기 제1 기기로부터 전달하는 채널 파라미터 전달 단계를 더 포함할 수 있다.

[0019] 본 발명의 또 다른 양상에 따른, 양자 채널 예측을 수행하는 양자 송신 기기에 있어서, N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 수신 기기인 제2 기기로 전송하고, 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신하는 송수신부; 및 상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정하는 제어부를 포함한다.

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

[0020] 일 실시 예에서, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는 로 결정되고, 여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이고, 상기 제어부는, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0021] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 양자 부조화(quantum discord) 연산을 수행하고, 상기 양자 부조화(quantum discord)에 기반하여, 상기 양자 채널이 위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장(thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정하고, 그리고 상기 결정된 채널에 따라, 서로 다른 방식으로 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0022] 본 발명의 또 다른 양상에 따른, 양자 채널 예측을 수행하는 양자 수신 기기에 있어서, N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 송신 기기인 제1 기기로부터 수신하는 송수신부 - 상기 제1 양자 상태(ρ)는 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)로 수신됨 -; 및 상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정하는 제어부를 포함한다.

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

[0023] 일 실시 예에서, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는 로 결정되고, 여기서, $\mathcal{L}R_i = \lambda_i R_i$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이고, 상기 제어부는, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0024] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 양자 채널(TCMQC: Time-correlated Markov quantum channel)에 의해 유도되는 두 번의 연속적인 채널의 사용(two consecutive use of channel) 간의 채널 메모리 및 채널 비상관(decoherence) 효과를 분석하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0025] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터 및 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 N개의 큐비트 시퀀스를 추정하고, 그리고 상기 추정된 양자 채널에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터를 상기 제1 기기로 전달하는 것을 특징으로 할 수 있다.

발명의 효과

[0026] 본 발명에 따른 방법은, 양자 상태의 양자 상관 특성을 이용하여, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

[0027] 본 발명에 따른 방법은, 채널 유형별로 서로 다른 양자 상관 특성을 이용하여, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공하기 위해 양자 상태에 대한 여러 파라미터에 따른 최적의 양자 채널 추정 방법을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0028] 도 1은 본 발명에 따른 양자 채널 예측 방법을 수행하는 양자 시스템을 도시한다.

도 2는 본 발명에 따른 양자 기기의 상세 구성을 도시한다.

도 3은 본 발명에 따른 (a) 비-메모리(memoryless) 채널, 및 (b) 완전 상관(fully correlated) 채널에 대한 TCMQC (time-correlated Markov quantum channel)에서의 두 개의 큐비트의 전개를 도시한다.

도 4는 본 발명에 따른 (α, β)의 함수로서 밀도 함수의 컨커런스를 도시한다.

도 5 내지 8은 본 발명의 일 실시 예에 따른 서로 다른 파라미터 값과 시간의 변화에 따른 TCMQC의 컨커런스 값을 나타낸 그래프들이다. 구체적으로, 도 5는 (1, β , -1, 0.2)에서 β 와 t의 변화에 따른 컨커런스를 나타낸다. 도 6은 (1, 1, -1, μ)에서 μ 와 t의 변화에 따른 컨커런스를 나타낸다. 도 7은 (0, 2, 0 μ)에서 μ

와 t 의 변화에 따른 컨커런스를 나타낸다. 도 8은 $(1, 0.5, \omega, \mu)$ 에서 μ 와 ω 의 변화에 따른 컨커런스를 나타낸다.

도 9는 본 발명에 따른 (α, β) 의 함수로서 밀도 함수의 양자 부조화를 도시한다.

도 10 내지 13은 본 발명에 따른 서로 다른 β , 또는 μ 에 대하여 시간(t)/상태(ω)에 따른 양자 부조화를 나타낸다. 구체적으로, 도 10은 서로 다른 β 에 대하여 $(1, \beta, -1, 0.2)$ 에서 t 의 함수로서 양자 부조화를 나타낸다. 도 11은 서로 다른 μ 에 대하여 $(1, 1, -1, \mu)$ 에서 t 의 함수로서 양자 부조화를 나타낸다. 도 12는 서로 다른 μ 에 대하여 $(0, 2, 0, \mu)$ 에서 t 의 함수로서 양자 부조화를 나타낸다. 반면에, 도 13은 서로 다른 μ 에 대하여 $(1, 0.5, \omega, \mu)$ 에서 ω 의 함수로서 양자 부조화를 나타낸다.

도 14는 본 발명에 따른 서로 다른 a, b 값에 대하여 시간(t)에 따른 컨커런스 및 양자 부조화를 도시한다. 또한, 도 15는 본 발명에 따른 서로 다른 a, b 값에 대하여 상태(ω)에 따른 컨커런스 및 양자 부조화를 도시한다.

도 16는 본 발명에 따른 시간(t)의 함수로서 컨커런스 및 성공 확률 P_s 를 나타낸다.

도 17는 본 발명에 따른 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되는 양자 채널 추정 방법의 흐름도를 나타낸다. 한편, 도 18는 본 발명에 따른 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되는 양자 채널 추정 방법의 흐름도를 나타낸다.

도 19 및 도 20은 본 발명의 실시 예들에 따른 양자 채널 추정 방법의 상세 흐름도를 도시한다.

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 채널 예측 방법 및 양자 채널 예측 시스템에 대해 살펴보기로 하자.
- [0038] 이와 관련하여, 도 1은 본 발명에 따른 양자 채널 예측 방법을 수행하는 양자 시스템을 도시한다. 도 1에 도시

된 바와 같이, 양자 시스템은 복수의 서브 시스템을 포함하고, 편의상 제1 서브 시스템(100)과 제2 서브 시스템(200)이 포함된 것으로 표현할 수 있다. 하지만, 상기 제1 및 제2 서브 시스템(100, 200)에만 한정되는 것이 아니라, 임의의 개수의 서브 시스템 간에도 적용될 수 있다. 한편, 상기 제1 및 제2 서브 시스템(100, 200)은 임의의 양자 기기일 수 있다. 즉, 제1 및 제2 서브 시스템(100, 200)은 각각 송신 기기인 제1(양자) 기기와 수신 기기인 제2(양자) 기기일 수 있다. 한편, 상기 제1(양자) 기기(100)와 제2(양자) 기기(200)는 어느 한 기기가 송신 기기이면 나머지 기기는 수신 기기일 수 있다. 한편, 상기 제1(양자) 기기(100)가 복수의 제2(양자) 기기(200)들을 제어하는 제어국(또는 기지국)인 경우도 포함된다.

[0039] 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 성립하고, 또한 송신/수신 기기로 동시에 동작할 수 있다.

[0040] 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. 여기서, 송수신부(120, 220)는 양자 채널을 통해 양자 데이터를 송수신하므로 양자 송수신부라고 지칭될 수 있다. 또한, 송수신부(120, 220)는 일부 제어 데이터 또는 관련된 정보를 일반 채널(classical channel)을 통해 송수신할 수 있으므로, 일반 송수신부로도 지칭될 수 있다. 즉, 송수신부(120, 220)는 물리적으로 구분된 양자 송수신부와 일반 송수신부를 구비하거나, 또는 논리적으로 구분된 양자 송수신부와 일반 송수신부를 구비할 수 있다. 따라서, 송수신부(120)는 일반 채널(classical channel)과 양자 채널(quantum channel)을 통해 수신 기기인 제2 기기(200)로 양자 정보를 송신하도록 구성된다. 여기서, 양자 정보는 상태(state) (예컨대, 양자 상태)에 관한 정보를 포함한다. 또한, 송수신부(120)는 상기 일반 채널을 통해 상기 제2 기기(200)로부터 피드백 정보 (예컨대, 양자 채널 정보, 상관 피드백)를 수신할 수 있다.

[0041] 송수신부(120)는 N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 수신 기기인 제2 기기로 전송하고, 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신하도록 구성된다.

[0042] 제어부(110)는 상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정하도록 구성

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

된다. 이와 관련하여, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는

결정되고, 여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이다. 한편, 제어부(110)는 전술된 상기 제2 크라우스 연산자를 추정할 수 있다.

[0043] 또한, 제어부(110)는 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 양자 부조화(quantum discord) 연산을 수행하고, 상기 양자 부조화(quantum discord)에 기반하여, 상기 양자 채널이 위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장(thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정할 수 있다. 또한, 제어부(110)는 상기 결정된 채널에 따라, 서로 다른 방식으로 상기 제2 크라우스 연산자를 추정할 수 있다.

[0044] 또한, 제어부(110)는 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대하여 WM (Weak Measurement) 및 QMR (Quantum Measurement Reversal) 중 적어도 하나를 수행할 수 있다. 또한, 제어부(110)는 상기 WM/QMR과 연관된 측정 세기(measurement strength)와 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 컨커런스에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정할 수 있다.

[0045] 또한, 제어부(110)는 양자 채널(TCMQC: Time-correlated Markov quantum channel)에 의해 유도되는 두 번의 연속적인 채널의 사용(two consecutive use of channel) 간의 채널 메모리 및 채널 비상관(decoherence) 효과를 분석할 수 있다.

[0046] 한편, 메모리(130)는 양자 채널 추정 및 상태 전송과 관련하여, 양자 정보 및 일반 정보를 저장하도록 구성될 수 있다.

[0047] 다음으로, 수신 기기에 해당하는 제2 기기(200)에 의해 수행되는 동작에 대해 살펴보면 다음과 같다.

[0048] 송수신부(210)는 N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 송신 기기인 제1 기기로

부터 수신하도록 구성된다. 이때, 상기 제1 양자 상태(ρ)는 상기 양자 채널을 통해 송수신부(210)에서 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)로 수신될 수 있다. 한편, N개의 큐비트 시퀀스는 제2 기기(200)가 이미 알고 있는 트레이닝 시퀀스(known training sequence)이거나, 또는 미지의 양자 데이터(unknown quantum data)일 수 있다.

[0049] 제어부(220)는 상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정하도록 구성될 수 있다. 이와 관련하여, 양자 채널 추정은 전술한 바와 같이, 제1 기기(100)의 제어부(120)에 의해 수행될 수 있으나, 제2 기기(200)의 제어부(220)에 의해 수행될 수 있다. 본 발명의 일 실시 예에 따르면, N개의 큐비트 시퀀스는 제2 기기(200)가 이미 알고 있는 트레이닝 시퀀스(known training sequence)인 경우에는 제2 기기(200)의 제어부(220)에 의해 양자 채널 추정이 이루어질 수 있다. 또한, N개의 큐비트 시퀀스가 미지의 양자 데이터(unknown quantum data)라고 하여도, 제1 기기(100)로부터의 상태 정보 및 블라인드 추정 방법을 이용하여 제어부(220)가 양자 채널 추정을 수행할 수 있다. 한편, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

로 결정되고, 여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관

(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이다.

이때, 제어부(220)는 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0050] 또한, 제어부(220)는 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 양자 부조화(quantum discord) 연산을 수행할 수 있다. 이에 따라, 제어부(220)는 상기 양자 부조화(quantum discord)에 기반하여, 상기 양자 채널이 위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장(thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정할 수 있다. 또한, 제어부(220)는 상기 결정된 채널에 따라, 서로 다른 방식으로 상기 제2 크라우스 연산자를 추정할 수 있다.

[0051] 또한, 제어부(220)는 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대하여 WM (Weak Measurement) 및 QMR (Quantum Measurement Reversal) 중 적어도 하나를 수행할 수 있다. 또한, 제어부(220)는 상기 WM/QMR과 연관된 측정 세기(measurement strength)와 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 컨커런스에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정할 수 있다.

[0052] 또한, 제어부(220)는 양자 채널(TCMQC: Time-correlated Markov quantum channel)에 의해 유도되는 두 번의 연속적인 채널의 사용(two consecutive use of channel) 간의 채널 메모리 및 채널 비상관(decoherence) 효과를 분석할 수 있다.

[0053] 또한, 제어부(220)는 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터 및 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 N개의 큐비트 시퀀스를 추정할 수 있다. 이에 따라, 송수신부(210)는 상기 추정된 양자 채널에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터를 상기 제1 기기(100)로 전달할 수 있다.

[0054] 한편, 전술된 양자 채널 예측 시스템과 관련하여, 양자 송신/수신 기기에서의 구체적인 동작과 관련된 본 발명에 따른 일련의 절차에 대해 다음과 같이 자세히 살펴보기로 하자. 이와 관련하여, **시간-상관 마르코프 양자 채널(TIME-CORRELATED MARKOV QUANTUM CHANNELS)**에 대해 살펴보기로 하자. 먼저, **A. 마르코프 양자 채널(Markov Quantum Channel)**에 대해 살펴보기로 하자.

[0055] 본 발명에서의 양자 채널 추정 및 이에 따른 양자 상태 전송/수신과 관련하여, 양자 채널은 아래의 수학적 1과 같이 확률 맵(stochastic map)에 의해 정의될 수 있다.

수학적 1

$$\Phi : \rho \rightarrow \Phi(\rho)$$

[0056]

[0057] 여기서, 양자 상태(ρ)는 밀도 연산자($\Phi(\rho)$)에 의해 기술되는 양자 상태로 변환되고, $\Phi(\rho) \geq 0$ 이라는 양성(positive) 특성, 및 트레이스 보존 특성(trace preserving properties), $\text{tr}(\Phi(\rho)) = 1$ 을 만족할 수 있다. 마스터 방정식 이론에서, 확률 맵 Φ 는 밀도 연산자 ρ 가 아래의 수학적 2에 따른 구조의 마스터 방정식을 만족시킴을 기술한다.

수학식 2

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar} [H, \rho] + \mathcal{L}\rho$$

[0058]

[0059] 여기서, 수학식 2의 첫 번째 부분은 교환자(commutator)에 관련된 유니터리 (코히어런트) 전개(unitary (coherent) evolution)을 기술하고, 비왜곡(undamped) 시스템과의 상호 작용에 대한 시스템 해밀토니안 (Hamiltonian) $H[\cdot, \cdot]$ 를 갖는다. 반면에, 두 번째 부분은 왜곡 시스템을 설명하는 비-유니터리 전개를 기술한다. 비-유니터리 전개 부분은 Lindblad 형태로 아래의 수학식 3과 같이 표현될 수 있다.

수학식 3

$$\mathcal{L}\rho = \sum_{j=1}^{d-1} 2L_j\rho L_j^\dagger - \left\{ L_j^\dagger L_j, \rho \right\}$$

[0060]

[0061] 여기서, Lindblad 형태는 d-차원 힐버트 공간에 대해 유효하고, 여기서 L_j 는 자신의 환경과 시스템 간의 커플링을 나타내는 Lindblad 연산자이고, $\{\cdot, \cdot\}$ 는 반-교환자(anti-commutator)를 나타낸다.

[0062] 2차원 힐버트 공간에서 2-레벨 원자에 대하여, 특정 Lindblad 연산자가 아래의 수학식 4와 같이 표현될 수 있다.

수학식 4

$$L_1 = \sigma, \quad L_2 = \sigma^\dagger, \quad L_3 = \frac{\sigma_z}{\sqrt{2}}$$

[0063]

[0064] 여기서, $\sigma^\dagger = \frac{1}{2}(\sigma_x + i\sigma_y)$ 및 $\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_x - i\sigma_y)$ 는 각각 생성(creation) 및 소멸 (annihilation) 연산자이고, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 는 Pauli 행렬이고, 수학식 3에서의 비-유니터리 전개 부분은 아래의 수학식 5와 같은 형태를 갖는다.

수학식 5

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\rho(\alpha, \beta, w) = & -\frac{\alpha}{4}(1-w) \left(\sigma^\dagger \sigma \rho + \rho \sigma^\dagger \sigma - 2\sigma \rho \sigma^\dagger \right) \\ & -\frac{\alpha}{4}(1+w) \left(\sigma \sigma^\dagger \rho + \rho \sigma \sigma^\dagger - 2\sigma^\dagger \rho \sigma \right) \\ & -\left(\frac{\beta}{2} - \frac{\alpha}{4} \right) \left(\rho - \sigma_z \rho \sigma_z \right) \end{aligned}$$

[0065]

[0066] 여기서, $\omega \in [-1, 1]$ 는 원자 반전(atomic inversion)의 평형 상태(equilibrium state)이고, $\alpha \in \mathbb{R}^+$ 및 $\beta \in \mathbb{R}^+ (\beta \geq \alpha/2)$ 가 원자 감쇠 비율(atomic decay rates)이다.

[0067] 한편, 양자 시스템의 에너지 상태의 변화 과정과 관련하여, 다음과 같은 두 가지 과정이 있다.

[0068] 1. 비-코히어런트 펌핑 과정(Incoherent Pumping Process): 자발적 방출(spontaneous emission)은 양자 시스템이 여기(excited) 에너지 상태에서 바닥 에너지 상태로 광자(photon)의 형태로 양자를 방출하면서 비가역적으로 감쇠되는 과정이다. 예를 들어, 원자 반전의 평형 상태 $\omega = -1$ 은 원자가 바닥 상태에 있음을 나타낸다. 반면에, 펌핑 과정은 $\omega > -1$ 인 경우에 발생하고, 이때 저 에너지 상태에서 고 에너지 상태로 전이가 있다. 특히, $\omega > 0$ 인 경우에, 반전은 양성이고 원자 개체가 증가한다. 펌핑 과정의 개념은 다중레벨 에너지 시스템을 위한 레이저 이론에서 근본적으로 중요하다.

[0069] 2. 가상 과정(Virtual Process): $\beta > \alpha/2$ 인 경우에, 전개는 원자 개체의 손실 없이 양자 코히어런스의 손실이 발생하는 가상 과정을 포함하는 것으로 해석된다. 2-레벨 원자 시스템에서, 원자 감쇠 비율 β 는 역학의 Bloch 벡터 표현으로 원자 다이폴의 현상적 감쇠 비율(phenomenological decay rate)을 설명한다.

[0070] 다음으로, B. 시간-상관 채널(Time-Correlated Channel)에 대해 살펴보기로 하자.

[0071] 본 발명에 따른 실질적인 양자 전송 시스템에서, 연속적인 사용을 통해 동작하는 상관 채널 (잡음)이 발생할 수 있다. 양자 채널이 진술한 바와 같이 CTPP(completely positive and trace preserving) 특성이 있다고 가정하면, 수학적 1의 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 아래의 수학적 6과 같이 표현될 수 있다.

수학적 6

$$\Phi(\rho) = \sum_i A_i \rho A_i^\dagger$$

[0072]

[0073] 여기서, $A_i = \sqrt{P_{i_1, \dots, i_N}} E_i$ 는 길이 N의 랜덤 시퀀스 (또는 N 큐비트의 시퀀스)에 대하여 확률 $P_{i_1, \dots, i_N}$ 를 갖는 크라우스 연산자이고, $\sum_i P_{i_1, \dots, i_N} = 1$ 을 만족한다. 연속적인 채널을 통한 메모리 효과를 위한 수학적 구성은 아래의 수학적 7과 같이 $P_{i_1, \dots, i_N}$ 이 마르코프 체인 특성을 갖는다.

수학적 7

$$P_{i_1, \dots, i_N} = P_{i_1} P_{i_2 | i_1} \dots P_{i_N | i_{N-1}}$$

[0074]

[0075] 여기서, $P_{i_N | i_{N-1}}$ 는 조건부 확률이고, 본 발명의 일 실시 예에서는 두 번의 연속적인 채널 사용을 가정할 수 있다. 채널 메모리의 정도 $\mu \in [0, 1]$ 를 이용하여, 시간-상관 채널에 대한 확률 맵 $\Phi(\rho)$ 은 아래의 수학적 8과 같이 표현될 수 있다.

수학적 8

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

[0076]

[0077] 여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이다. 수학적 8의 확률 맵은 복합 채널(composite channel)로 해석될 수 있고, 여기서 큐비트의 연속적인 사용의 전환(transitions of consecutive uses of qubit)은 μ 의 확률로 동일한 반면에, 큐비트

의 연속적인 사용의 전환은 $1-\mu$ 의 확률로 비-상관된다.

[0078] 시간-상관 Pauli 채널 또는 시간-상관 위상 왜곡 채널 (편광 완화(depolarizing) 채널)에 대한 크라우스 연산자 A_k^c 는 Pauli 연산자의 크로넥커 곱(Kronecker product)으로 단순히 구성될 수 있다. 또한, Lindblad에 대한 왜곡 고유 연산자(damping eigenoperator)를 이용하여, 시간-상관 진폭 왜곡 채널에 대한 CTP 맵을 관측할 수 있다.

[0079] 한편, 메모리를 갖는 Markovian 양자 채널에 대하여, 아래의 수학적 식 9와 같이 수정된 Lindbladian 방정식의 해를 구하는 것에 의해 크라우스 연산자 A_k^c 를 구할 수 있다.

수학적 식 9

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\rho(\alpha, \beta, w) = & -\frac{\alpha}{4}(1-w) \left(\sigma^\dagger \sigma \rho + \rho \sigma^\dagger \sigma - 2\sigma \rho \sigma^\dagger \right) \\ & -\frac{\alpha}{4}(1+w) \left(\sigma \sigma^\dagger \rho + \rho \sigma \sigma^\dagger - 2\sigma^\dagger \rho \sigma \right) \\ & - \left(\frac{\beta}{2} - \frac{\alpha}{4} \right) \left(\rho - \sigma_z \rho \sigma_z \right) \end{aligned}$$

[0080]

[0081] 여기서, $\sigma^\dagger = \sigma^\dagger \otimes \sigma^\dagger$, $\sigma = \sigma \otimes \sigma$, 및 $\sigma_z = \sigma_z \otimes \sigma_z$ 이다.

[0082] 이와 관련하여, 도 4는 본 발명에 따른 (a) 비-메모리(memoryless) 채널, 및 (b) 완전 상관(fully correlated) 채널에 대한 TCMQC (time-correlated Markov quantum channel)에서의 두 개의 큐비트의 전개를 도시한다. 비-메모리 채널에서, 두 개의 큐비트는 독립적으로 전개되는 데 비하여, 완전 상관 채널에서는 두 개의 큐비트가 동일한 과정으로 전개된다.

[0083] 다음으로, C. Lindbladian 및 클라우스 분해 해법(Solution of Lindbladian and Kraus Decomposition)에 대해 살펴보기로 하자.

[0084] 이와 관련하여, 수학적 식 8에서 크라우스 연산자 A_k^c 는 수학적 식 9에서의 Lindbladian을 구하여 획득될 수 있다. 마스터 방정식의 해법은 아래의 수학적 식 10과 같이, 임의의 시간에서 밀도 연산자를 확장시키는 직교 왜곡 기저(orthogonal damping basis)를 이용하여 고유값 방정식의 해를 구하는 것과 관련된다.

수학적 식 10

$$\begin{aligned} \Phi(\rho) &= \exp(\mathcal{L}t) \rho \\ &= \sum_i \text{tr}(L_i \rho) \exp(\lambda_i t) R_i \end{aligned}$$

[0085]

[0086] 여기서, $\mathcal{L}$ 는 Liouville superoperator이다. 첫 번째 단계는 아래의 수학적 식 11과 같은 고유값 방정식을 만족하는 우측의 고유 연산자 R_i 를 결정하는 것이다.

수학적 식 11

$$\mathcal{L}R_i = \lambda_i R_i$$

[0087]

[0088] 여기서, λ_i 는 대응하는 고유값이다. 우측의 고유 연산자 R_i , 및 좌측의 고유 연산자 L_i 간의 대응성(duality) 관계로부터, 좌측의 고유 연산자 L_i 가 아래의 수학식 12와 같이 결정될 수 있다.

수학식 12

[0089]
$$\text{tr}(L_i R_j) = \delta_{ij}$$

[0090] 이와 관련하여, 우측의 고유 연산자 R_i , 및 좌측의 고유 연산자 L_i 는 다음과 같은 아래의 수학식 13의 관계를 만족한다.

수학식 13

[0091]
$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_8^{\pm} = 0 \\ \lambda_4 = -\alpha \\ \lambda_5^{\pm} = \lambda_6^{\pm} = -\frac{1}{4}(4\beta - \alpha(1+w)) \\ \lambda_7^{\pm} = -\alpha/2 \\ \lambda_9^{\pm} = \lambda_{10}^{\pm} = -\frac{1}{4}(4\beta - \alpha(1-w)) \end{cases}$$

[0092] 결과적으로, 이에 따른 CPTP 맵은 아래의 수학식 14와 같이 나타내어질 수 있다.

수학식 14

[0093]
$$\Phi(\rho) = \sum_i \text{tr}(L_i \rho) (\exp(\lambda_i t)) R_i$$

[0094] 이와 관련하여, 크라우스 연산자는 Λ_k 를 이용하여 표현될 수 있고, Λ_k 는 다음과 같이 표현될 수 있다. 여기서, $\bar{\Lambda}_k = 1 - \Lambda_k$ 로 편의상 표현될 수 있으며, 이와 관련하여 크라우스 연산자와 밀도 행렬에 대해 구체적으로 살펴보도록 한다.

[0095]
$$\begin{cases} \Lambda_1 = e^{-\frac{1}{4}(4\beta - \alpha(1+w))t} \\ \Lambda_2 = e^{-\frac{1}{4}(4\beta - \alpha(1-w))t} \\ \Lambda_3 = e^{-\frac{1}{2}\alpha t} \\ \Lambda_4 = e^{-2\beta t} \\ \Lambda_5 = \frac{1+w}{2}(1 - e^{-\alpha t}) \\ \Lambda_6 = \frac{1-w}{2}(1 - e^{-\alpha t}) \end{cases}$$

[0096] (클라우스 연산자) 밀도 행렬 ρ 의 요소들이 $\rho_{ij} \in \mathbb{C}$ 로 주어지는 경우에, 출력 상태($\Phi(\rho)$)는 초기 상태(ρ)를 이용하여 아래의 수학식 15와 같이 표현될 수 있다.

수학식 15

$$\Phi(\rho) = \begin{pmatrix} \bar{\Lambda}_6 \rho_{11} + \Lambda_5 \rho_{44} & \Lambda_1 \rho_{12} & \Lambda_1 \rho_{13} & \Lambda_3 \rho_{14} \\ \Lambda_1 \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} & \Lambda_2 \rho_{24} \\ \Lambda_1 \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} & \Lambda_2 \rho_{34} \\ \Lambda_3 \rho_{41} & \Lambda_2 \rho_{42} & \Lambda_2 \rho_{43} & \Lambda_6 \rho_{11} + \bar{\Lambda}_5 \rho_{44} \end{pmatrix}$$

[0097]

[0098]

여기서, 완전 상관 TCMQC에 대한 대응하는 CPTP 맵은 아래의 수학식 16 내지 22의 여섯 개의 크라우스 연산자로 구성될 수 있다.

수학식 16

$$A_1^c = \begin{pmatrix} \Lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Lambda_2 \end{pmatrix}$$

[0099]

수학식 17

$$A_2^c = \begin{pmatrix} \sqrt{\Lambda_3 - \Lambda_1 \Lambda_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{\Lambda_3 - \Lambda_1 \Lambda_2} \end{pmatrix}$$

[0100]

수학식 18

$$A_3^c = \begin{pmatrix} \sqrt{1 - \Lambda_1 (\Lambda_1 - \Lambda_2) - \Lambda_3 - \Lambda_6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0101]

수학식 19

$$A_4^c = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{1 + \Lambda_2 (\Lambda_1 - \Lambda_2) - \Lambda_3 - \Lambda_5} \end{pmatrix}$$

[0102]

수학식 20

$$A_5^c = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \Lambda_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0103]

수학식 21

$$A_6^c = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Lambda_6 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0104]

[0105] 한편, CPTP 맵과 superoperator 사이에는 아래의 수학식 22와 같은 관계가 성립한다.

수학식 22

$$\sum_i \text{tr}(L_i \rho) \exp(\lambda_i t) R_i = \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

[0106]

[0107] (밀도 행렬) 초기 상태로서 X 상태에 대한 밀도 행렬 ρ_X 는 아래의 수학식 23과 같다.

수학식 23

$$\rho_X = \begin{pmatrix} \rho_{11} & 0 & 0 & \rho_{14} \\ 0 & \rho_{22} & \rho_{23} & 0 \\ 0 & \rho_{23}^* & \rho_{33} & 0 \\ \rho_{14}^* & 0 & 0 & \rho_{44} \end{pmatrix}$$

[0108]

[0109] 여기서, $\rho_{11}, \rho_{22}, \rho_{33}, \rho_{44} \in \mathbb{R}$, $\rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} + \rho_{44} = 1$, 및 $\rho_{14}, \rho_{23} \in \mathbb{C}$ 를 만족한다. 이후에, 완전 상관된 TCMQC에 대한 CPTP 맵 $\Phi(\rho_X)$ 는 β 의 함수가 아니고, CPTP 맵 $\Phi(\rho_X)$ 의 크라우스 연산자 A_k^c 는 아래의 수학식 24 내지 27과 같이 주어지고, 여기서, P, k는 아래의 수학식 28 및 29로 표현된다.

수학식 24

$$A_1^c = \sqrt{P} \begin{pmatrix} \sqrt{1-\kappa} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

[0110]

수학식 25

$$A_2^c = \sqrt{P} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{\kappa} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0111]

수학식 26

$$A_3^c = \sqrt{1-P} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{1-\kappa} \end{pmatrix}$$

[0112]

수학식 27

$$A_4^c = \sqrt{1-P} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \sqrt{\kappa} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0113]

수학식 28

$$P = \frac{1-w}{2}$$

[0114]

수학식 29

$$\kappa = 1 - e^{-\alpha t}$$

[0115]

다음으로, 양자 채널의 유형에 따라 크라우스 연산자 A_k^c 를 획득하는 방법에 대해 살펴보기로 하자.

[0116]

1. 시간-상관 위상 왜곡 채널(Time-Correlated Phase Damping Channel)

[0117]

위상 왜곡 채널은 원자 충돌에 의해 유도되는 원자 다이폴의 위상 랜덤화 과정이 수반된다. 이러한 채널에서, 채널 비상관(decoherence) 파라미터는 아래의 수학식 30과 같이 주어진다.

[0118]

수학식 30

$$\alpha = 0, \beta = \Gamma, w = 0$$

[0119]

여기서, Γ 는 충돌에 기인한 왜곡 파라미터이다. 수학식 9에서 시간-상관 위상 왜곡 채널에 대한 Lindbladian은 아래의 수학식 31과 같이 표현될 수 있다.

[0120]

수학식 31

$$\mathcal{L}\rho(\Gamma) = -\frac{\Gamma}{2}(\rho - \sigma_z \rho \sigma_z)$$

[0121]

$k = 3, \dots, 6$ 에 대하여, $A_k^c = 0$ 이기 때문에, 완전 상관 위상 왜곡 채널에 대하여 아래의 수학식 32 및 33과 같이 단지 두 개의 크라우스 연산자만이 필요하다.

[0122]

수학식 32

$$A_1^c = \begin{pmatrix} \sqrt{e^{-2\Gamma t}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{e^{-2\Gamma t}} \end{pmatrix}$$

[0123]

수학식 33

$$A_2^c = \begin{pmatrix} \sqrt{1-e^{-2\Gamma t}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{1-e^{-2\Gamma t}} \end{pmatrix}$$

[0124]

[0125] 또한, A_1^c 및 A_2^c 는 아래의 수학식 34와 같이 주어질 수 있다.

수학식 34

$$A_1^c = \sqrt{1-p} \mathbf{I} \otimes \mathbf{I}, \quad A_2^c = \sqrt{p} \sigma_z$$

[0126]

여기서, $p = \frac{1}{2} (1 - \exp(-\Gamma t))$ 이다.

[0127]

2. 시간-상관 진폭 왜곡 채널(Time-Correlated Amplitude Damping Channel)

[0128]

진폭 왜곡(감쇠) 채널은 2-레벨 원자에 대한 자발적 방출과 일치한다. 진공 변동(vacuum fluctuation)에 기인하여 여기 상태에서 바닥 상태로의 지수적 감쇠가 이루어진다. 이러한 채널에서, 비상관 파라미터는 아래의 수학식 35와 같이 주어진다.

수학식 35

$$\alpha = \Omega, \quad \beta = \frac{\Omega}{2}, \quad w = -1$$

[0130]

여기서, Ω 는 자발적 방출에 대한 계수를 나타내고, 시간-상관 진폭 왜곡 채널에 대한 Lindbladian은 아래의 수학식 36과 같이 주어진다.

수학식 36

$$\mathcal{L}\rho(\Omega) = -\frac{\Omega}{2} (\sigma^\dagger \sigma \rho + \rho \sigma^\dagger \sigma - 2\sigma \rho \sigma^\dagger)$$

[0132]

$k = 2, \dots, 5$ 대하여, $A_k^c = 0$ 이기 때문에, 완전 상관 위상 왜곡 채널에 대하여 아래의 수학식 37 및 38과 같이 단지 두 개의 크라우스 연산자만이 필요하다.

수학식 37

$$A_1^c = \begin{pmatrix} \sqrt{e^{-\Omega t}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

[0134]

수학식 38

$$A_6^c = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{1-e^{-\Omega t}} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0135]

[0136] A_1^c 및 A_2^c 가 시간-상관 위상 왜곡 채널의 경우(수학식 34 참조)와 달리 두 개의 행렬의 텐서 곱으로 재구성될 수 없음을 주목하라. 이는 비-메모리 진폭 왜곡 채널과 대조적으로, spooky action으로 해석될 수 있다. 여기서, 두 개의 큐비트는 독립적으로 감쇠 되고, 완전 시간-상관 (풀 메모리) 진폭 왜곡 채널은 두 개의 큐비트의 동기 전환만을 허용한다.

[0137] 3. 시간-상관 일반 진폭 왜곡 채널 (열장 채널) (Time-Correlated Generalized Amplitude Damping Channel (Thermal Field Channel))

[0138] 일반화된 진폭 왜곡 채널은 환경과의 상호 작용에 의해 유도되는 이득 여기 및 손실을 모두 설명할 수 있다. 특정 확률을 갖는 유한-온도 환경에서 에너지를 흡수하는 것은 또한 바닥 상태에서 여기 상태로의 원자 전환을 가능하게 한다. 진폭 왜곡 채널과 달리, 충분한 시간 경과 이후에 포화 상태는 Bloch sphere의 z축을 따른 지점에 위치한다. 이러한 채널에서, 비상관 파라미터는 수학식 39와 같이 주어진다.

수학식 39

$$\alpha = \Omega(2N+1), \beta = \frac{\Omega(2N+1)}{2}, w = -\frac{1}{2N+1}$$

[0139]

[0140] 여기서, N은 광자 개수이다. $N \rightarrow 0$ 이면, 진폭 왜곡 채널로 단순화된다. 수학식 40은 일반화된 진폭 왜곡 채널에 대한 Lindbladian을 나타낸다.

수학식 40

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\rho(\Omega, N) = & -\frac{\Omega(N+1)}{2}(\sigma^\dagger\sigma\rho + \rho\sigma^\dagger\sigma - 2\sigma\rho\sigma^\dagger) \\ & -\frac{\Omega N}{2}(\sigma\sigma^\dagger\rho + \rho\sigma\sigma^\dagger - 2\sigma^\dagger\rho\sigma). \end{aligned}$$

[0141]

[0142] 여기서, $A_2^c = 0$ 이기 때문에, 5개의 크라우스 연산자만을 갖는다. 시간-상관 일반화된 진폭 왜곡 채널에 대한 크

라우스 연산자는 수학식 24-27로 주어지고, 여기서 $P = \frac{N+1}{2N+1}$ 및 $K = 1 - e^{-\Omega(2N+1)t}$ 로 주어진다.

[0143] 한편, 전형적 양자 채널의 제약(Restriction of Typical Quantum Channels)에 대해 살펴보면 다음과 같다. 이 때, 양성 전환을 이용하는 펌핑 과정이 없다는 것을 의미하는 원자 전환 파라미터 $-1 \leq \omega \leq 0$ 의 평형에 의해 제약한다. 가상 과정의 존재($\beta > \alpha/2$)를 이용하여, 양자 채널은 위상 왜곡 및 일반화된 진폭 왜곡 채널로 혼합된 것으로 해석될 수 있고, 위상 왜곡에 의해 유도되는 비상관 심각도(decoherence severity)는 $\gamma = \beta - \alpha/2$ 에 의해 정량화될 수 있다.

[0144] 다음으로, 양자 상관 역학(DYNAMICS OF QUANTUM CORRELATION)에 대해 살펴보기로 하자. 여기서는, 두 번의 연

속적인 채널의 사용(two consecutive use of channel) 간의 채널 메모리 및 채널 비상관(decoherence) 효과를 분석한다. 밀도 행렬 $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$ 을 초기 상태로 고려하고, 여기서 $|\psi\rangle$ 는 수학식 41과 같이 두 개의 큐비트에 대한 얽힌 순수 상태(entangled pure state)이고, 여기서, $a, b \in \mathbb{C}$, $|a|^2 + |b|^2 = 1$ 이다.

수학식 41

$$|\psi\rangle = a|00\rangle + b|11\rangle$$

초기 상태 $|\psi\rangle$ 가 TCMQC를 통과하고, 변형 상태(contaminated state) $\Phi(\rho) = \rho_0$ 로 전개되고, 밀도 행렬은 수학식 42로 주어지고, 여기서 ρ_{11} 내지 ρ_{44} 는 수학식 43으로 표현된다.

수학식 42

$$\rho_0 = \begin{pmatrix} \rho_{11} & 0 & 0 & \rho_{14} \\ 0 & \rho_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{33} & 0 \\ \rho_{14}^* & 0 & 0 & \rho_{44} \end{pmatrix}$$

수학식 43

$$\begin{aligned} \rho_{11} &= (\bar{\Lambda}_6^2 |a|^2 + \Lambda_5^2 |b|^2) (1 - \mu) + (\bar{\Lambda}_6 |a|^2 + \Lambda_5 |b|^2) \mu \\ \rho_{22} &= (\Lambda_6 \bar{\Lambda}_6 |a|^2 + \Lambda_5 \bar{\Lambda}_5 |b|^2) (1 - \mu) \\ \rho_{33} &= (\Lambda_6 \bar{\Lambda}_6 |a|^2 + \Lambda_5 \bar{\Lambda}_5 |b|^2) (1 - \mu) \\ \rho_{44} &= (\Lambda_6^2 |a|^2 + \bar{\Lambda}_5^2 |b|^2) (1 - \mu) + (\Lambda_6 |a|^2 + \bar{\Lambda}_5 |b|^2) \mu \\ \rho_{14} &= ab^* \Lambda_4 (1 - \mu) + ab^* \Lambda_3 \mu. \end{aligned}$$

A. 양자 얽힘 역학(Dynamics of Quantum Entanglement)

TCMQC를 통과하는 두 개의 큐비트 간의 양자 얽힘 역학을 고려하면 다음과 같다. 이분 얽힘을 정량화하기 위해 컨커런스(concurrence) $\mathfrak{C}(\cdot)$ 를 정의할 수 있다. 임의의 두 개의 큐비트에 대하여, 컨커런스는 밀도 행렬 ρ 로부터 수학식 44와 같이 연산될 수 있다.

수학식 44

$$\mathfrak{C}(\rho) = \max \left\{ 0, \sqrt{\lambda_{(1)}} - \sqrt{\lambda_{(2)}} - \sqrt{\lambda_{(3)}} - \sqrt{\lambda_{(4)}} \right\}$$

여기서, $\lambda_{(1)} > \lambda_{(2)} > \lambda_{(3)} > \lambda_{(4)}$ 는 밀도 행렬 $\rho \sigma_y \rho^* \sigma_y$ 의 내림 차순 형태의 고유값이다.

수학식 23에서의 상태에 대하여, 컨커런스는 수학식 45와 같이 나타내어진다.

수학식 45

$$\mathfrak{C}(\rho_X) = 2 \max \{0, |\rho_{23}| - \sqrt{\rho_{11}\rho_{44}}, |\rho_{14}| - \sqrt{\rho_{22}\rho_{33}}\}$$

이와 관련하여, 컨커런스에 대해 좀 더 살펴보면 다음과 같다. 두 개의 큐비트에 대하여 전송된 얽힌 상태 $|\psi\rangle = a|00\rangle + b|11\rangle$ 를 이용하여 초기 상태로서 밀도 행렬 $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$ 를 고려할 수 있다. TCMQC를 통과한 이후에, 변형 상태의 컨커런스 $\mathfrak{C}(\rho_o)$ 는 수학식 46으로 주어지고, 여기서, 일부 파라미터는 수학식 47 및 48과 같이 표현된다.

수학식 46

$$\mathfrak{C}(\rho_o) = 2 \max \{0, (1 - \mu) \mathfrak{C}^u + \mu \mathfrak{C}^c\}$$

수학식 47

$$\mathfrak{C}^u = |ab| \Lambda_4 - \left(|a|^2 \Lambda_6 \bar{\Lambda}_6 + |b|^2 \Lambda_5 \bar{\Lambda}_5 \right)$$

수학식 48

$$\mathfrak{C}^c = |ab| \Lambda_3$$

다음으로, 몇몇 특수한 경우에서, 컨커런스는 다음과 같이 획득될 수 있다. 이와 관련하여, 제1 및 제2 기기 (100, 200)는 특수한 상황에 따라 컨커런스를 다음과 같이 간단한 방법으로 획득할 수 있다. 또는, 시간에 따라 컨커런스를 획득한 다음, 양자 채널에 대한 특수한 상황을 추정할 수 있다.

- 비상관(uncorrelated) 채널 ($\mu \rightarrow 0$): 컨커런스 $\mathfrak{C}(\rho_o)$ 는 수학식 49로 표현되고, ESD (entanglement sudden death)는 수학식 50을 만족하면 발생한다.

수학식 49

$$\mathfrak{C}(\rho_o) = 2 \max \{0, \mathfrak{C}^u\}$$

수학식 50

$$\Lambda_4 \leq \left| \frac{a}{b} \right| \Lambda_6 \bar{\Lambda}_6 + \left| \frac{b}{a} \right| \Lambda_5 \bar{\Lambda}_5$$

[0162] 완전 상관 양자 채널($\mu \rightarrow 1$): β 의 효과는 사라지고, 컨커런스 $\mathfrak{C}(\rho_o)$ 는 원자 다이폴 감쇠 비율 α , 시간 t , 및 초기 상태 파라미터 a, b 에 따라 수학식 51과 같이 표현된다.

수학식 51

$$\mathfrak{C}(\rho_o) = 2|ab|e^{-\frac{1}{2}\alpha t}$$

[0163]

[0164] $\alpha = \omega = 0$ 에 대하여, 즉, 양자 채널에 에너지 손실이 없는 경우 (예컨대, 위상 왜곡 채널)에, 컨커런스는 수학식 52와 같이 표현된다.

수학식 52

$$\mathfrak{C}(\rho_o) = 2|ab|((1-\mu)e^{-2\beta t} + \mu)$$

[0165]

[0166] 초기에, 컨커런스는 $2|ab|$ 이고, 시간이 경과함에 따라 지수적으로 단조 감소하고, 충분한 시간이 흐르면 수학식 53과 같이 수렴한다.

수학식 53

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathfrak{C}(\rho_o) = 2\mu|ab|$$

[0167]

[0168] 이러한 양자 채널에서 임의의 초기 상태 파라미터에 대하여 ESD가 결코 발생하지 않는다는 것을 의미한다.

[0169] 다음으로, 채널 메모리 임계 정도(Critical Degree of Channel Memory)에 대해 살펴보자. 이와 관련하여, 채널 메모리 임계 정도를 수학식 54와 같이 정의할 수 있고, TCMQC에 대해서는 수학식 55와 같이 표현될 수 있다.

수학식 54

$$\mu^* \triangleq \min_{\mu \in (0,1]} \{\mu : \mathfrak{C} > 0\}$$

[0170]

수학식 55

$$\mu^* = \frac{\mathfrak{C}^u}{\mathfrak{C}^u - \mathfrak{C}^c}$$

[0171]

[0172] 한편, 충분히 큰 채널 메모리 임계 값 $\mu > \mu^*$ 에 대하여, 양자 채널의 상관 효과에 의해 ESD가 억제될 수 있다.

[0173] 한편, 도 5 내지 8은 본 발명의 일 실시 예에 따른 서로 다른 파라미터 값과 시간의 변화에 따른 TCMQC의 컨커런스 값을 나타낸 그래프들이다. 구체적으로, 도 5는 $(1, \beta, -1, 0.2)$ 에서 β 와 t 의 변화에 따른 컨커런스를 나타낸다. 도 6은 $(1, 1, -1, \mu)$ 에서 μ 와 t 의 변화에 따른 컨커런스를 나타낸다. 도 7은 $(0, 2, 0, \mu)$ 에서 μ 와 t 의 변화에 따른 컨커런스를 나타낸다. 도 8은 $(1, 0.5, \omega, \mu)$ 에서 μ 와 ω 의 변화에 따른 컨커런스를 나타낸다.

[0174] 도 5는 비자발적 방출과의 얽힘과 관련되고, 시간이 지남에 따라 컨커런스가 감소함을 알 수 있다. 한편, 도 5 내지 8은 양자 얽힘 역학과 관련되고, 전술한 바와 같이, 충분히 큰 채널 메모리 임계 값 $\mu > \mu^*$ 에 대하여, 양자 채널의 상관 효과에 의해 ESD가 억제될 수 있다.

[0175] 다음으로, B. 양자 부조화 역학(Dynamics of Quantum Discord)에 대해 살펴보기로 하자.

[0176] 수학적식 23에서 주어진 X 상태에 대하여, 양자 부조화는 수학적식 56과 같이 표현된다.

수학적식 56

[0177]
$$\mathcal{D}(\rho_X) = \min\{Q_1, Q_2\}$$

[0178] 여기서, Q_j 는 수학적식 57과 같이 표현된다.

수학적식 57

[0179]
$$Q_j = H(\rho_{11} + \rho_{33}) + \sum_{i=1}^4 \bar{\lambda}_i \log_2 \bar{\lambda}_i + D_j$$

[0180] 또한, $H(x) = -x \log_2 x - (1-x) \log_2 (1-x)$ 이고, ρ_X 의 고유값은 수학적식 58 내지 61과 같이 표현된다.

수학적식 58

[0181]
$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\rho_{22} + \rho_{33} - \sqrt{\rho_{22}^2 + 4|\rho_{23}|^2 - 2\rho_{22}\rho_{33} + \rho_{33}^2}}{2}$$

수학적식 59

[0182]
$$\bar{\lambda}_2 = \frac{\rho_{22} + \rho_{33} + \sqrt{\rho_{22}^2 + 4|\rho_{23}|^2 - 2\rho_{22}\rho_{33} + \rho_{33}^2}}{2}$$

수학적식 60

[0183]
$$\bar{\lambda}_3 = \frac{\rho_{11} + \rho_{44} - \sqrt{\rho_{11}^2 + 4|\rho_{14}|^2 - 2\rho_{11}\rho_{44} + \rho_{44}^2}}{2}$$

수학식 61

$$\bar{\lambda}_4 = \frac{\rho_{11} + \rho_{44} + \sqrt{\rho_{11}^2 + 4|\rho_{14}|^2 - 2\rho_{11}\rho_{44} + \rho_{44}^2}}{2}$$

[0184]

[0185] 또한, 수학식 57에서 D_1 및 D_2 는 수학식 62 및 63과 같이 표현된다.

수학식 62

$$D_1 = H \left(\frac{1 + \sqrt{(1 - 2(\rho_{33} + \rho_{44}))^2 + 4(|\rho_{14}| + |\rho_{23}|)^2}}{2} \right)$$

[0186]

수학식 63

$$D_2 = - \sum_{i=1} \rho_{ii} \log_2 \rho_{ii} - H(\rho_{11} + \rho_{33})$$

[0187]

[0188] 한편, X 상태에 대한 양자 부조화는 non-Markovian dissipative 환경뿐만 아니라 Markovian에 대해서 양자 얽힘보다 파라미터의 변화에 대해서 더 강인한 형태를 갖는다. 따라서, 파라미터의 좁은 범위 내에서 더 정확한 양자 채널 추정 요구되는 경우에는 양자 얽힘보다 양자 부조화가 사용되는 것이 더 바람직할 수 있다.

[0189] 한편, 양자 부조화 역학에 대해 살펴보면 다음과 같다. 이와 관련하여, 도 10 내지 13은 본 발명에 따른 서로 다른 β , 또는 μ 에 대하여 시간(t)/상태(ω)에 따른 양자 부조화를 나타낸다. 구체적으로, 도 10은 서로 다른 β 에 대하여 (1, β , -1, 0.2)에서 t의 함수로서 양자 부조화를 나타낸다. 도 11은 서로 다른 μ 에 대하여 (1, 1, -1, μ)에서 t의 함수로서 양자 부조화를 나타낸다. 도 12는 서로 다른 μ 에 대하여 (0, 2, 0, μ)에서 t의 함수로서 양자 부조화를 나타낸다. 반면에, 도 13은 서로 다른 μ 에 대하여 (1, 0.5, ω , μ)에서 ω 의 함수로서 양자 부조화를 나타낸다.

[0190] 도 10 및 11에서 시간이 증가함에 따라 양자 부조화가 0으로 수렴하는 것은 알 수 있다. 이는 가상 과정의 효과가 기대되는 바와 같이 양자 부조화의 감소를 초래하기 때문이다. 한편, 도 12에 도시된 바와 같이, $\mu=0$ (비-메모리 채널)에 대해서는 시간이 증가함에 따라 양자 부조화가 0으로 수렴하지만, $\mu \neq 0$ 이 아닌 나머지 채널(예컨대, $\mu=1$ 이면 완전 상관 채널)에 대해서는 시간이 증가함에 따라 양자 부조화가 0이 아닌 특정 값으로 수렴한다. 도 12에서, t가 증가하여 정상 상태에 이르면, 변형 양자 상태(contaminated quantum state)는 수학식 64와 같이 주어진다.

수학식 64

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \rho_0 = \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 & 0 & ab^* \mu \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ a^* b \mu & 0 & 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

[0191]

[0192] 한편, 수학식 64에서 $a = b = \sqrt{1/2}$ 이면, 양자 부조화는 수학식 65와 같이 주어진다.

수학식 65

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathcal{D}(\rho_o) = \min \left\{ 1, \frac{\mu \tanh^{-1}(\mu) + \ln \sqrt{1 - \mu^2}}{\ln 2} \right\}$$

[0193]

[0194] 한편, 도 13에서 작은 채널 메모리 값에 대하여, $D_1 > D_2$ 이기 때문에 양자 부조화는 주로 Q_1 에 의해 결정된다. 반면에, 큰 채널 메모리 값에 대하여, $D_1 < D_2$ 이기 때문에 양자 부조화는 주로 Q_2 에 의해 결정된다.

[0195] 다음으로, 양자 상관 역학에 비대칭 초기 상태의 영향에 대해 살펴보면 아래와 같다. 이와 관련하여, 도 14는 본 발명에 따른 서로 다른 a, b 값에 대하여 시간(t)에 따른 컨커런스 및 양자 부조화를 도시한다. 또한, 도 15는 본 발명에 따른 서로 다른 a, b 값에 대하여 상태(ω)에 따른 컨커런스 및 양자 부조화를 도시한다. 도 13의

(a) 내지 (c)에서 a, b 는 각각 $a = b = \sqrt{1/2}$, $a = \sqrt{1/4}, b = \sqrt{3/4}$, 및 $a = \sqrt{3/4}, b = \sqrt{1/4}$ 이다. 즉, 도 13의 (a)에서 큐빗은 최대 얽힘 상태이다. 한편, 비대칭 초기 상태는 컨커런스에는 큰 영향을 주지만, 양자 부조화에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 따라서, 양자 채널이 비대칭 초기 상태를 갖는 것으로 추정(또는 관측)된 경우에는 양자 부조화를 이용하여 이후에 양자 채널 추정을 하는 것이 더 바람직하다. 한편, 도 14

의 (a) 내지 (c)에서 a, b 는 도 13에서와 같이, 각각 $a = b = \sqrt{1/2}$, $a = \sqrt{1/4}, b = \sqrt{3/4}$, 및 $a = \sqrt{3/4}, b = \sqrt{1/4}$ 이다. 구체적으로, 서로 다른 a, b 에 대하여 $t=1$ 에서 $(1, 0.5, \omega, \mu)$ 의 상태(ω)의 함수로서 컨커런스와 양자 부조화를 나타낸다. 준비된 초기 상태가 최대 얽힘 상태가 아니라고 하더라도, 낮은 채널 메모리 영역에 대해 특히, 적절한 펌핑 과정이 양자 얽힘을 향상시킴을 알 수 있다. 또한, 비대칭 초기 상태를 갖는 펌핑 과정이 컨커런스에 더 큰 영향을 미치는데 비해, 낮은 채널 메모리 영역에 대해 양자 부조화에 대한 더 강인한 특성을 갖는다. 따라서, 양자 채널이 낮은 채널 메모리 특성을 갖는 것으로 추정(또는 관측)된 경우에는 양자 부조화를 이용하여 이후에 양자 채널 추정을 하는 것이 더 바람직하다.

[0196] 다음으로, C. 양자 상태 보호를 이용하는 양자 얽힘 역학(Dynamics of Quantum Entanglement with Quantum State Protecting)에 대해 살펴보기로 하자.

[0197] 구체적으로, WM (weak measurement) 및 QMR (quantum measurement reversal)을 이용하여 TCMQC (time-correlated Markov quantum channel)에서 양자 얽힘 역학에 대해 살펴보기로 하자. 순차적인 양자 연산을 수행한 이후에, 최종 상태의 양자 행렬 수학식 66과 같이 주어진다.

수학식 66

$$\hat{\rho}_o = M_{QMR} \left[\Phi \left(M_{WM} |\psi\rangle \langle \psi| M_{WM}^\dagger \right) \right] M_{QMR}^\dagger$$

[0198]

[0199] 여기서, WM 및 QMR에 대한 비-유니터리 연산은 각각 수학식 67 및 68과 같이 주어진다. 여기서, 측정 세기 $m_i \in [0, 1]$ 및 $n_i \in [0, 1]$ 의 범위의 값이다.

수학식 67

$$M_{WM} = \begin{pmatrix} 1-m_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1-m_2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

수학식 68

$$M_{QMR} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1-n_1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1-n_2 \end{pmatrix}$$

한편, 표기상 편의를 위하여, $\bar{m}_i = 1 - m_i$ and $\bar{n}_i = 1 - n_i$ 로 표시되었다. 한편, 초기 상태 $|\Psi\rangle = a|00\rangle + b|11\rangle$ 을 갖는 두 개의 큐비트에 대하여, 양자 상태 보호 기법을 이용하는 변형 상태에 대한 밀도 행렬은 수학식 69와 같이 주어진다.

수학식 69

$$\hat{\rho}_o = \frac{1}{N} \begin{pmatrix} \hat{\rho}_{11} & 0 & 0 & \bar{n}_1 \bar{n}_2 \hat{\rho}_{14} \\ 0 & \bar{n}_2^2 \hat{\rho}_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{n}_1^2 \hat{\rho}_{33} & 0 \\ \bar{n}_1 \bar{n}_2 \hat{\rho}_{14}^* & 0 & 0 & \bar{n}_1^2 \bar{n}_2^2 \hat{\rho}_{44} \end{pmatrix}$$

여기서, 행렬 내의 요소의 값은 아래의 수학식 70으로 주어지고, $N = \text{tr}\{\hat{\rho}_o\}$ 는 정규화 상수이다.

수학식 70

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_{11} &= \left(\bar{m}_1^2 \bar{m}_2^2 \bar{\Lambda}_6^2 |a|^2 + \Lambda_5^2 |b|^2 \right) (1 - \mu) \\ &\quad + \left(\bar{m}_1^2 \bar{m}_2^2 \bar{\Lambda}_6 |a|^2 + \Lambda_5 |b|^2 \right) \mu \\ \hat{\rho}_{22} &= \left(\bar{m}_1^2 \bar{m}_2^2 \Lambda_6 \bar{\Lambda}_6 |a|^2 + \Lambda_5 \bar{\Lambda}_5 |b|^2 \right) (1 - \mu) \\ \hat{\rho}_{33} &= \left(\bar{m}_1^2 \bar{m}_2^2 \Lambda_6 \bar{\Lambda}_6 |a|^2 + \Lambda_5 \bar{\Lambda}_5 |b|^2 \right) (1 - \mu) \\ \hat{\rho}_{44} &= \left(\bar{m}_1^2 \bar{m}_2^2 \Lambda_6^2 |a|^2 + \bar{\Lambda}_5^2 |b|^2 \right) (1 - \mu) \\ &\quad + \left(\bar{m}_1^2 \bar{m}_2^2 \Lambda_6 |a|^2 + \bar{\Lambda}_5 |b|^2 \right) \mu \\ \hat{\rho}_{14} &= ab^* \bar{m}_1 \bar{m}_2 \Lambda_4 (1 - \mu) + ab^* \bar{m}_1 \bar{m}_2 \Lambda_3 \mu \end{aligned}$$

다음으로, 최적 QMR 세기를 이용하는 최대 컨커런스에 대해 살펴보면 아래와 같다. 주어진 WM 세기 m_1 및 m_2 에 대하여, QMR을 이용하는 최대 컨커런스는 수학식 71과 같이 주어진다. 한편, 수학식 71의 분자에서 컨커런스와

관련된 두 인자는 수학적식 72 및 73으로 주어진다.

수학적식 71

$$\mathfrak{C}^*(\hat{\rho}_o) = 2 \max \left\{ 0, \frac{(1-\mu)\hat{\mathfrak{C}}^u + \mu\hat{\mathfrak{C}}^c}{2\sqrt{\hat{\rho}_{11}\hat{\rho}_{44}} + \hat{\rho}_{22} + \hat{\rho}_{33}} \right\}$$

수학적식 72

$$\hat{\mathfrak{C}}^u = \bar{m}_1^2 \bar{m}_2^2 |ab| \Lambda_4 - \left(\bar{m}_1^2 \bar{m}_2^2 |a|^2 \Lambda_6 \bar{\Lambda}_6 + |b|^2 \Lambda_5 \bar{\Lambda}_5 \right)$$

수학적식 73

$$\hat{\mathfrak{C}}^c = \bar{m}_1 \bar{m}_2 |ab| \Lambda_3$$

한편, 수학적식 71의 컨커런스는 아래와 같이 수학적식 74로 주어질 수 있다. 또한, 밀도 행렬에 대한 수학적식 75의 관계식을 이용하면, 컨커런스와 밀도 행렬과의 관계는 수학적식 76과 같이 주어진다.

수학적식 74

$$\mathfrak{C}(\hat{\rho}_o) = \frac{2\bar{n}_1 \bar{n}_2}{N} \max \left\{ 0, |\hat{\rho}_{14}| - \sqrt{\hat{\rho}_{22}\hat{\rho}_{33}} \right\}$$

수학적식 75

$$\hat{\rho}_{11} + \bar{n}_1^2 \bar{n}_2^2 \hat{\rho}_{44} \geq 2\bar{n}_1 \bar{n}_2 \sqrt{\hat{\rho}_{11}\hat{\rho}_{44}}$$

수학적식 76

$$\mathfrak{C}(\hat{\rho}_o) \leq \max \left\{ 0, \frac{|\hat{\rho}_{14}| - \sqrt{\hat{\rho}_{22}\hat{\rho}_{33}}}{\sqrt{\hat{\rho}_{11}\hat{\rho}_{44}} + \frac{\bar{n}_2}{2\bar{n}_1} \hat{\rho}_{22} + \frac{\bar{n}_1}{2\bar{n}_2} \hat{\rho}_{33}} \right\}$$

여기서, 측정 세기 $\bar{n}_1$, $\bar{n}_2$ 와 밀도 행렬과의 관계가 아래의 수학적식 77을 만족하는 경우에 수학적식 75에서 등식이 성립한다.

수학식 77

$$\bar{n}_1 \bar{n}_2 = \sqrt{\frac{\hat{\rho}_{11}}{\hat{\rho}_{44}}}.$$

[0215]

[0216]

이와 관련하여, $\bar{n}_1 = \bar{n}_2$ 이 성립하는 경우에, 전술된 변형들을 통해 원하는 결과를 획득할 수 있다.

[0217]

한편, 전술된 WM은 von Neumann 측정으로 일반화될 수 있다. 측정 세기 m_i 가 1이면, WM은 양성-연산자 값 측정과 연관된다.

[0218]

다음으로, 성공 확률(Success Probability)에 대해 살펴보면 다음과 같다. WM 세기 m_1 및/또는 m_2 가 증가함에 따라, 아래의 수학식 78로 주어지는 감소 성공 확률 P_s 에 따라 컨커런스는 향상된다.

수학식 78

$$P_s = N \prod_{\ell=1}^2 \min \left\{ 1, \frac{1}{\bar{m}_\ell^2} \right\} \min \left\{ 1, \frac{1}{\bar{n}_\ell^2} \right\}$$

[0219]

[0220]

여기서, 완전한 reversal 절차에 대하여 성공 확률은 0과 같다. 다음으로, 양자 상태 보호를 이용하는 컨커런스에 대해 살펴보자. 이와 관련하여, 도 16는 본 발명에 따른 시간(t)의 함수로서 컨커런스 및 성공 확률 P_s 를 나타낸다. 구체적으로, (1, 1, -1, 0.3)에서 t 의 함수로서 컨커런스 및 성공 확률 P_s 를 나타낸다. 여기서, 녹색 점선은 WM 및 QMR 없는 경우에 TCMQC를 나타내고, 적색 대쉬선은 WM 없는 경우에 최적 QMR을 나타내고, 청색 선은 WM이 있는 경우에 최적 QMR을 나타낸다. 도시된 바와 같이, 성공 확률을 희생하여 WM 및 QMR 측정 세기로 얽힘이 성공적으로 복원될 수 있음을 알 수 있다. 또한, ω 가 증가함에 따라 WM 및 QMR에 의한 얽힘 향상은 감소함을 알 수 있다. 이러한 양자 상태 보호 기법은 dissipative 환경에서도 잘 동작함을 알 수 있다.

[0221]

전술된 내용을 토대로, 본 발명의 다른 측면에 따른 양자 채널 예측 방법에 대해 살펴보면 다음과 같다. 이와 관련하여, 도 x는 본 발명에 따른 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되는 양자 채널 추정 방법의 흐름도를 나타낸다. 한편, 도 y는 본 발명에 따른 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되는 양자 채널 추정 방법의 흐름도를 나타낸다. 한편, 전술된 양자 채널 추정 시스템에서 설명된 내용은 이하에서 설명되는 양자 채널 변환 방법과 결합하여 이용될 수 있다.

[0222]

도 17를 참조하면, 양자 채널 추정 방법은 제1 양자 상태 전송 단계(S110), 제2 양자 상태 정보 수신 단계(S120), 양자 채널 추정 단계(S130), 및 채널 파라미터 전달 단계(S140)를 포함한다.

[0223]

제1 양자 상태 전송 단계(S110)에서, N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 수신 기기인 제2 기기로 전송한다. 또한, 제2 양자 상태 정보 수신 단계(S120)에서, 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신한다. 여기서, 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보는 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$) 자체이거나 또는 일부 정보(파라미터)일 수 있다.

[0224]

양자 채널 추정 단계(S130)에서, 상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 양자 채널

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$

을 추정한다. 여기서, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는

로 결정되고, 여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이다. 한편, 양자 채널 추정 단계(S130)는 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

- [0225] 한편, 도 19는 본 발명의 실시 예들에 따른 양자 채널 추정 방법의 상세 흐름도를 도시한다. 도 19의 좌측에 도시된 바와 같이, 양자 채널 추정 단계(S130)는 양자 부조화(quantum discord) 연산 단계(S131), 채널 유형 결정 단계(S132), 및 제2 크라우스 연산자 추정 단계(S133)를 포함할 수 있다. 또는 도 19의 우측에 도시된 바와 같이, 양자 채널 추정 단계(S130)는 WM/QMR 수행 단계(S131'), 채널 유형 결정 단계(S132'), 및 제2 크라우스 연산자 추정 단계(S133')를 포함할 수 있다. 또한, 양자 채널 추정 단계(S130)는 채널 메모리/비상관 분석 단계(S134)를 더 포함할 수 있다. 이때, 채널 메모리/비상관 분석 단계(S134)는 전술된 단계 중 일부를 생략하고 수행되거나, 전술된 단계와 독립적으로 수행될 수 있다.
- [0226] 양자 부조화(quantum discord) 연산 단계(S131)에서, 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 양자 부조화(quantum discord) 연산을 수행한다. 채널 유형 결정 단계(S132)에서, 상기 양자 부조화(quantum discord)에 기반하여, 상기 양자 채널이 위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장(thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정한다. 제2 크라우스 연산자 추정 단계(S133)에서, 상기 결정된 채널에 따라, 서로 다른 방식으로 상기 제2 크라우스 연산자를 추정한다.
- [0227] WM/QMR 수행 단계(S131')에서, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대하여 WM (Weak Measurement) 및 QMR (Quantum Measurement Reversal) 중 적어도 하나를 수행한다. 채널 유형 결정 단계(S132')에서, 상기 WM/QMR 중 적어도 하나에 기반하여, 상기 양자 채널이 위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장(thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정한다. 제2 크라우스 연산자 추정 단계(S133')에서, 상기 WM/QMR 과 연관된 측정 세기(measurement strength)와 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 컨커런스에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정한다. 이때, 전술된 채널 유형을 고려할 수 있다.
- [0228] 채널 메모리/비상관 분석 단계(S134)에서, 양자 채널(TCMQC: Time-correlated Markov quantum channel)에 의해 유도되는 두 번의 연속적인 채널의 사용(two consecutive use of channel) 간의 채널 메모리 및 채널 비상관(decoherence) 효과를 분석한다.
- [0229] 채널 파라미터 전달 단계(S140)에서, 상기 추정된 양자 채널에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터를 상기 제2 기기로 전달한다. 이때, 제2 기기(200)는 상기 전달된 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터 및 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 N개의 큐비트 시퀀스를 추정할 수 있다.
- [0230] 도 18을 참조하면, 양자 채널 추정 방법은 제1 양자 상태 수신 단계(S210), 양자 채널 추정 단계(S220), 큐비트 시퀀스 추정 단계(S230) 및 채널 파라미터 전달 단계(S240)를 포함한다. 한편, 전술된 단계들은 응용에 따라 그 순서가 변경될 수 있다. 예를 들어, 큐비트 시퀀스 추정 단계(S230) 이전에, 채널 파라미터 전달 단계(S240)가 수행될 수 있고, 이에 한정되지 않고 자유롭게 변경 가능하다.
- [0231] 제1 양자 상태 수신 단계(S210)에서, N개의 큐비트 시퀀스로 이루어진 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 수신 기기인 제1 기기로부터 수신한다. 이때, 상기 제1 양자 상태(ρ)는 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)로 수신될 수 있다. 양자 채널 추정 단계(S220)에서, 상기 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 양자 채널을 추정한다. 이때, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)는
- $$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \sum_{i,j} A_{ij}^u \rho A_{ij}^{u\dagger} + \mu \sum_k A_k^c \rho A_k^{c\dagger}$$
- 로 결정되고, 여기서, $A_{ij}^u = A_i \otimes A_j$ 는 상관(correlation)이 없는 제1 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, A_k^c 는 상관을 갖는 제2 크라우스 연산자이다. 한편, 양자 채널 추정 단계(S120)는 상기 제2 크라우스 연산자를 추정하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0232] 한편, 도 20는 본 발명의 실시 예들에 따른 양자 채널 추정 방법의 상세 흐름도를 도시한다. 도 20의 좌측에 도시된 바와 같이, 양자 채널 추정 단계(S220)는 양자 부조화(quantum discord) 연산 단계(S221), 채널 유형 결정 단계(SS22), 및 제2 크라우스 연산자 추정 단계(S223)를 포함할 수 있다. 또는 도 20의 우측에 도시된 바와 같이, 양자 채널 추정 단계(S130)는 WM/QMR 수행 단계(S221'), 채널 유형 결정 단계(S222'), 및 제2 크라우스 연산자 추정 단계(S223')를 포함할 수 있다. 또한, 양자 채널 추정 단계(S130)는 채널 메모리/비상관 분석 단계(S224)를 더 포함할 수 있다. 이때, 채널 메모리/비상관 분석 단계(S224)는 전술된 단계 중 일부를 생략하고 수행되거나, 전술된 단계와 독립적으로 수행될 수 있다.
- [0233] 양자 부조화(quantum discord) 연산 단계(S221)에서, 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 양자 부조화(quantum discord) 연산을 수행한다. 채널 유형 결정 단계(SS22)에서, 상기 양자 부조화(quantum

discord)에 기반하여, 상기 양자 채널이 위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장 (thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정한다. 제2 크라우스 연산자 추정 단계(S223)에서, 상기 결정된 채널에 따라, 서로 다른 방식으로 상기 제2 크라우스 연산자를 추정한다.

[0234] WM/QMR 수행 단계(S221')에서, 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대하여 WM (Weak Measurement) 및 QMR (Quantum Measurement Reversal) 중 적어도 하나를 수행한다. 채널 유형 결정 단계(S222')에서, 상기 WM/QMR에 기반하여, 상기 양자 채널이 위상 왜곡 채널, 진폭 왜곡 채널, 및 임의의 채널 메모리를 갖는 열장(thermal field) 채널 중 어느 하나인지를 결정할 수 있다. 제2 크라우스 연산자 추정 단계(S223')에서, 상기 WM/QMR과 연관된 측정 세기(measurement strength)와 시간의 변화에 따른 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)의 컨커런스에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자를 추정할 수 있다. 이때, 상기 결정된 채널 유형이 고려될 수 있다.

[0235] 채널 메모리/비상관 분석 단계(S224)에서, 양자 채널(TCMQC: Time-correlated Markov quantum channel)에 의해 유도되는 두 번의 연속적인 채널의 사용(two consecutive use of channel) 간의 채널 메모리 및 채널 비상관(decoherence) 효과를 분석할 수 있다.

[0236] 큐빗 시퀀스 추정 단계(S230)에서, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터 및 상기 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 N개의 큐빗 시퀀스를 추정할 수 있다. 채널 파라미터 전달 단계(S240)에서, 상기 추정된 양자 채널에 기반하여, 상기 제2 크라우스 연산자에 대한 파라미터를 상기 제1 기기로 전달할 수 있다.

[0237] 본 발명에서는, TCMQC의 양자 비선형성 역학에 대해 검토하였다. 제안된 TCMQC는 펄핑, 가상 과정, 및 비자발 방출과 같은 비상관(decoherence) 과정에 의해 유도되는 복합 왜곡 효과에 의해 특정될 수 있다. 이러한 모델은 다수의 Markovian 양자 채널 모델을 포함할 수 있고, 임의의 정도의 채널 메모리 효과에 의해 형성될 수 있다. 또한, 시간 변화의 함수로서 큐비트 간의 양자 비선형 역학을 특정화하기 위한 프레임워크를 구축할 수 있다. 또한, 적절한 측정 세기를 갖는 WM 및 QMR 기법을 이용하여, 큐비트 간의 양자 상관을 향상시킬 수 있다.

[0238] 본 발명의 적어도 일 실시 예에 따르면, 양자 상태의 양자 상관 특성을 이용하여, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

[0239] 또한, 본 발명의 적어도 일 실시 예에 따르면, 채널 유형별로 서로 다른 양자 상관 특성을 이용하여, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공하기 위해 양자 상태에 대한 여러 파라미터에 따른 최적의 양자 채널 추정 방법을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

[0240] 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

[0241] 100: 제1 기기 200: 제2 기기

 110, 210: 제어부 120, 220: 송수신부

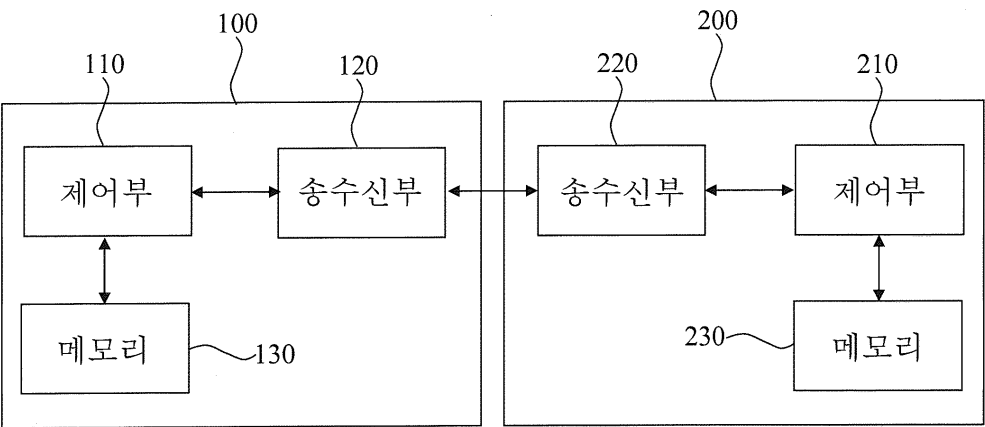
 130, 230: 메모리

도면

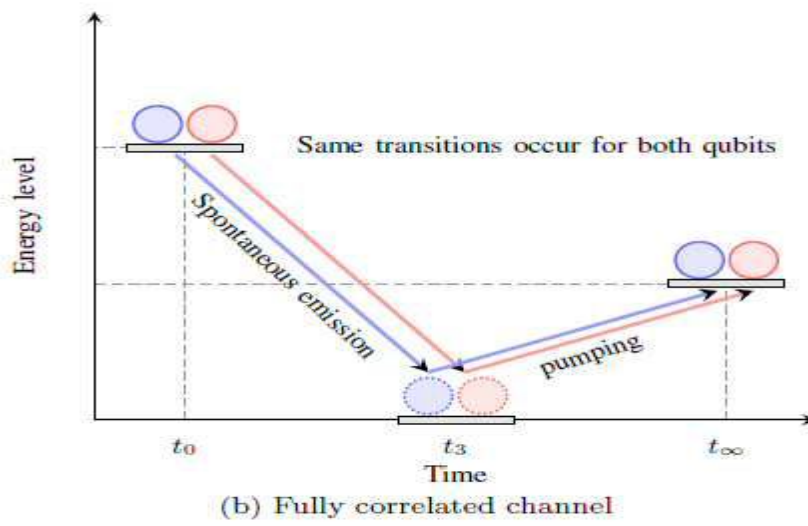
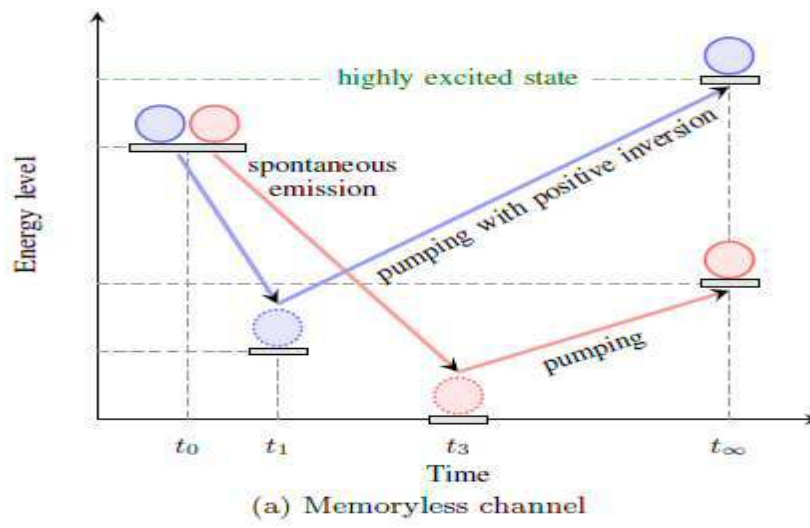
도면1



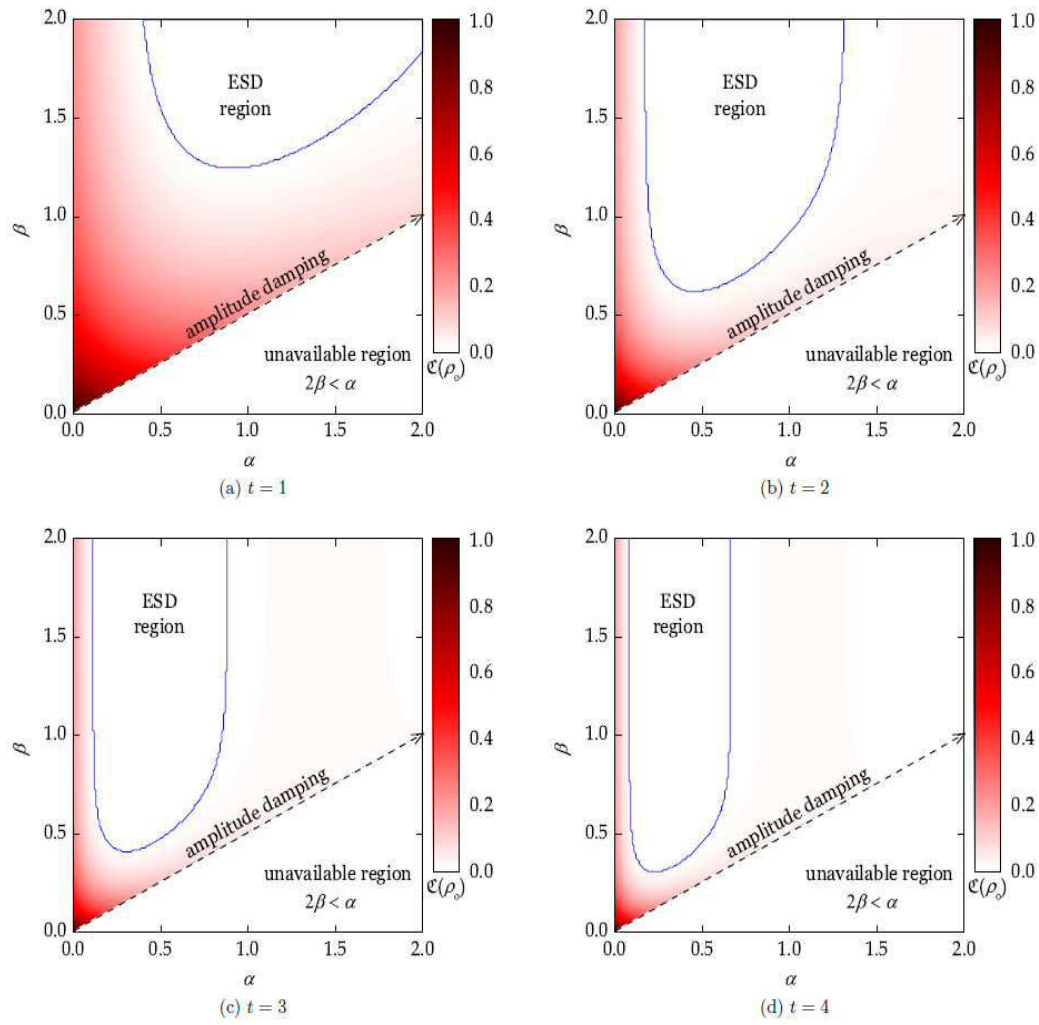
도면2



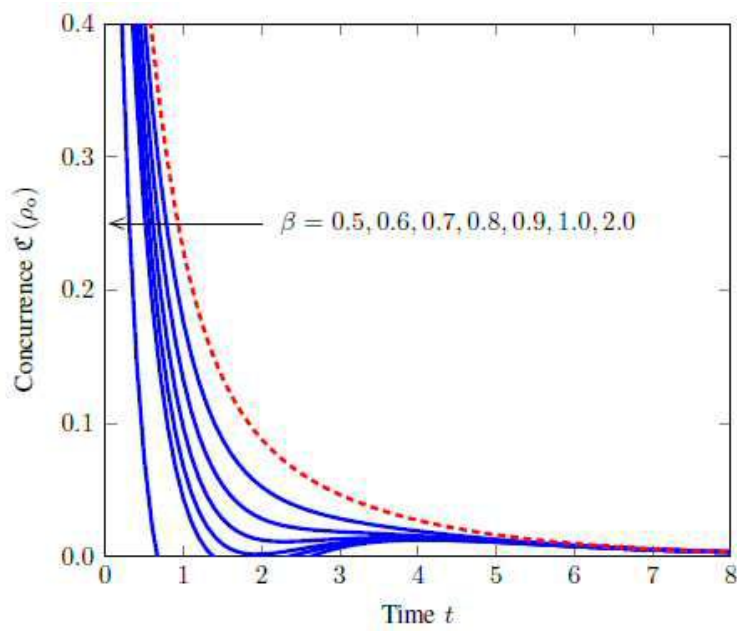
도면3



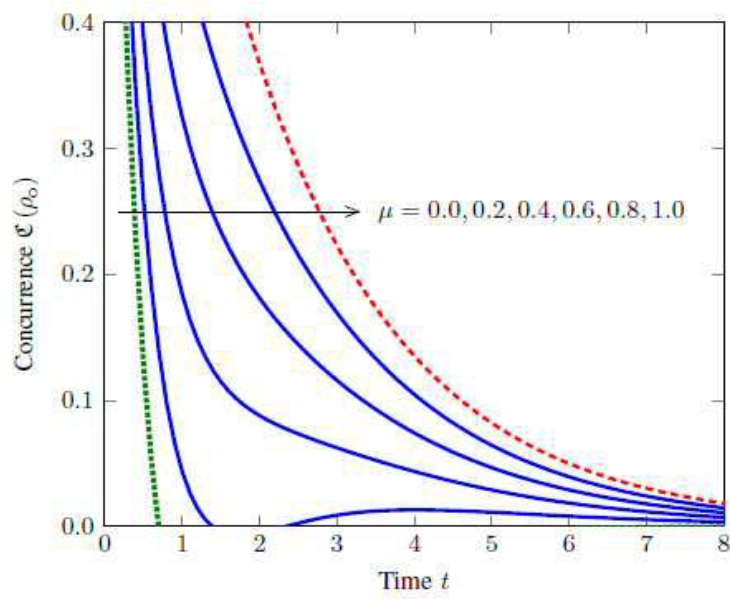
도면4



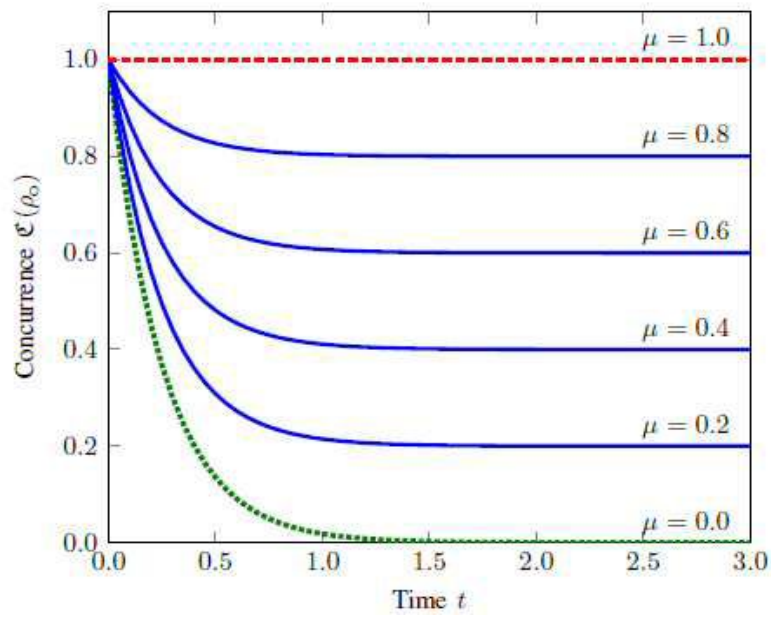
도면5



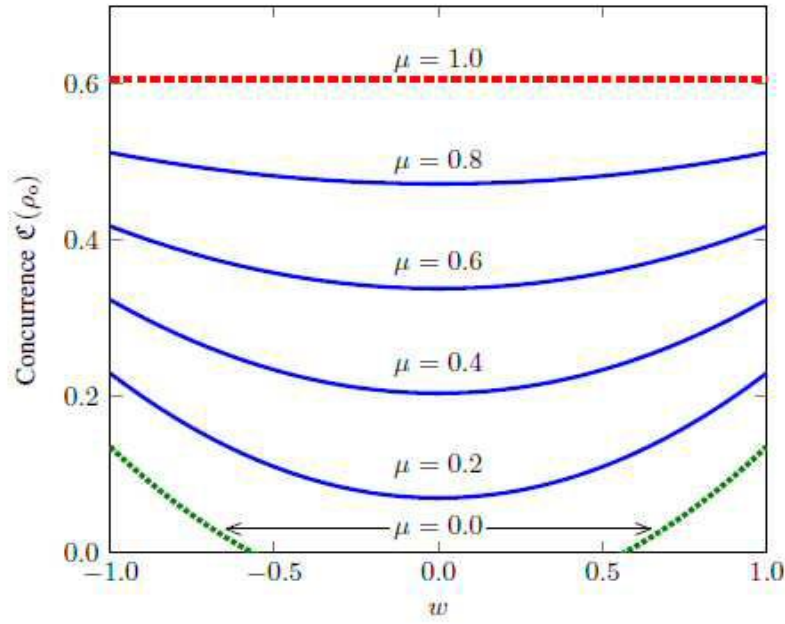
도면6



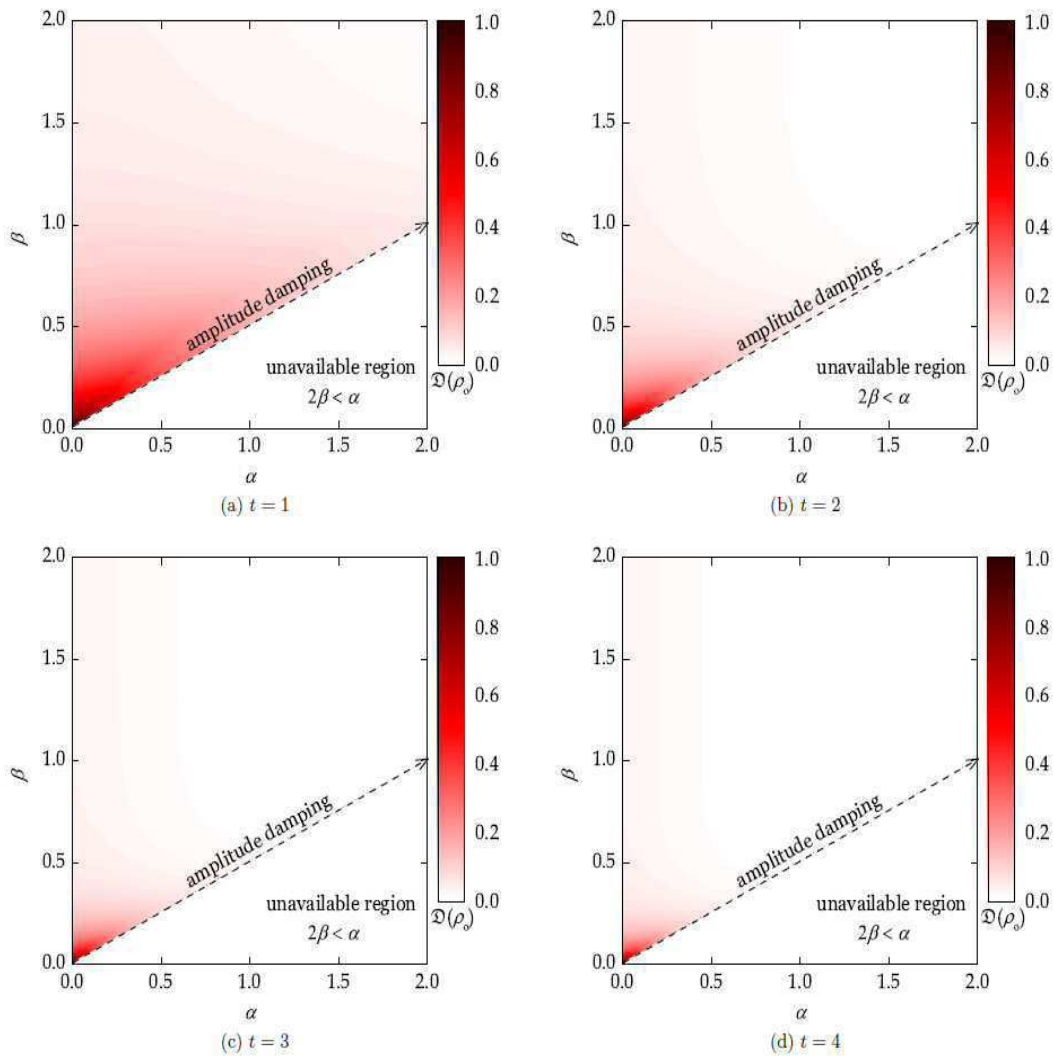
도면7



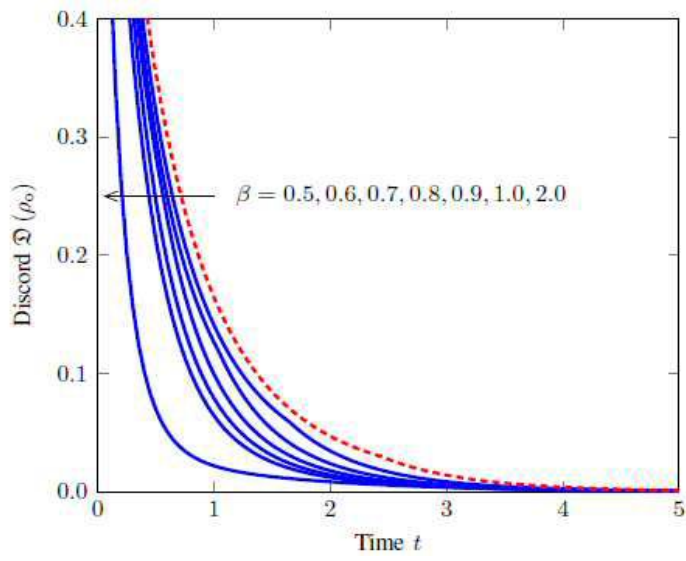
도면8



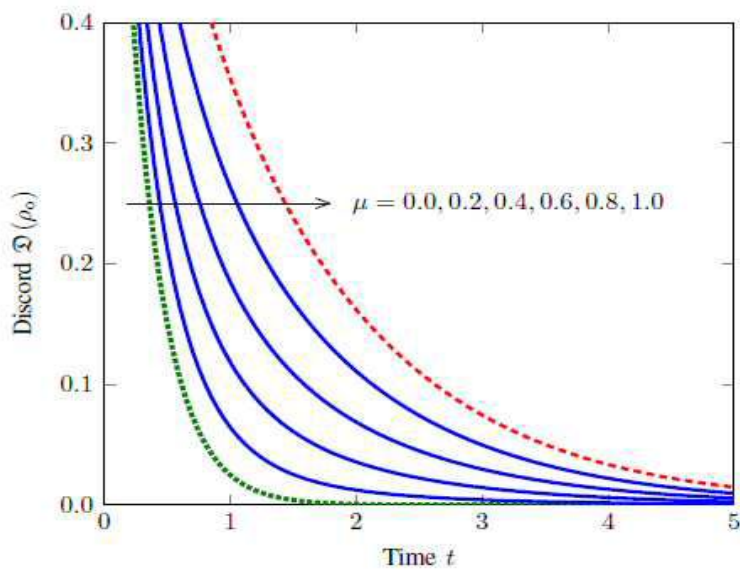
도면9



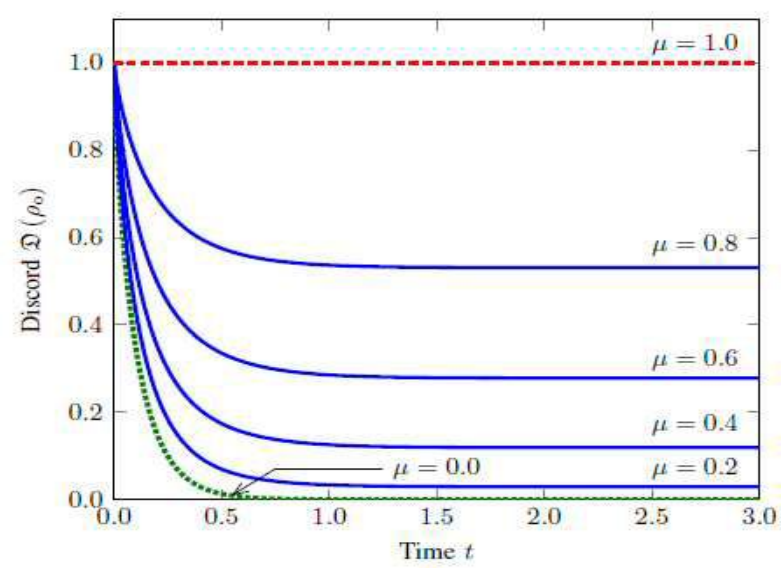
도면10



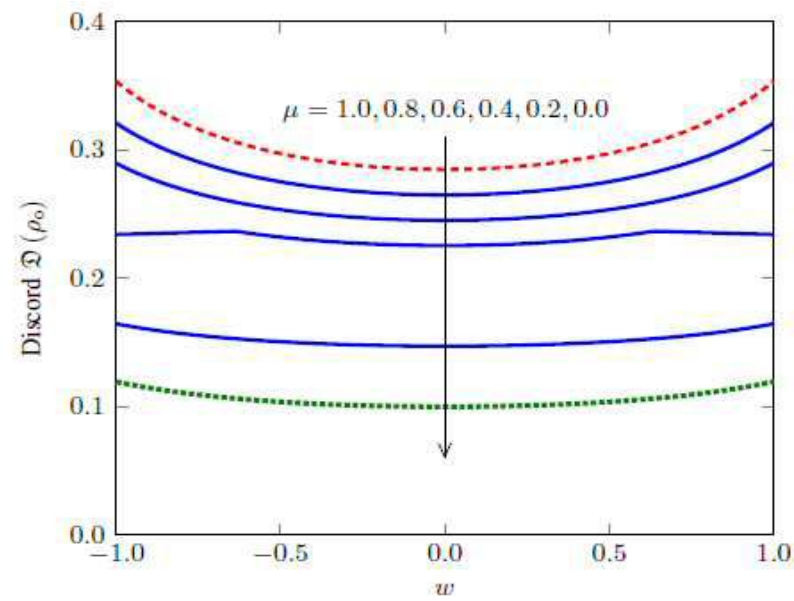
도면11



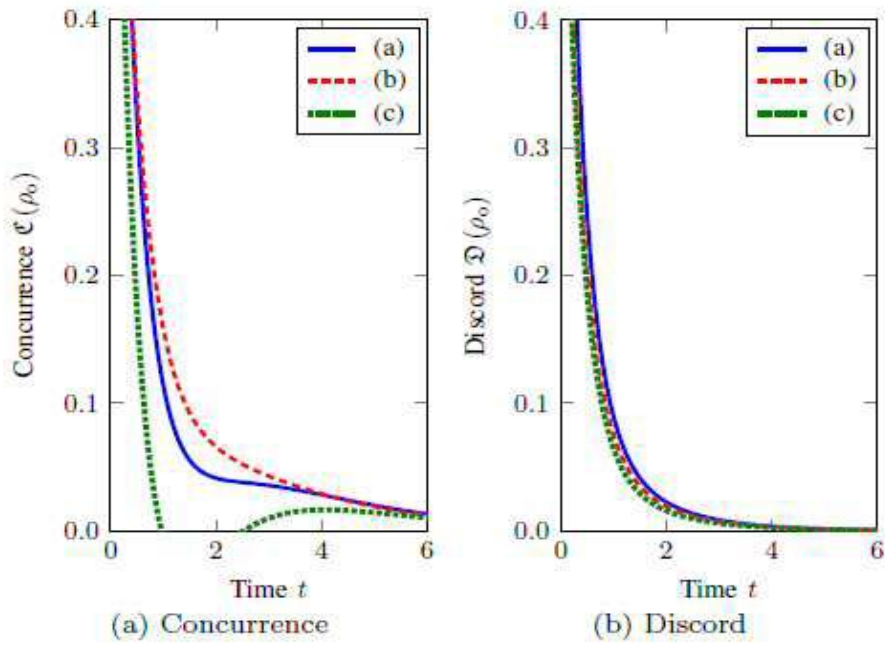
도면12



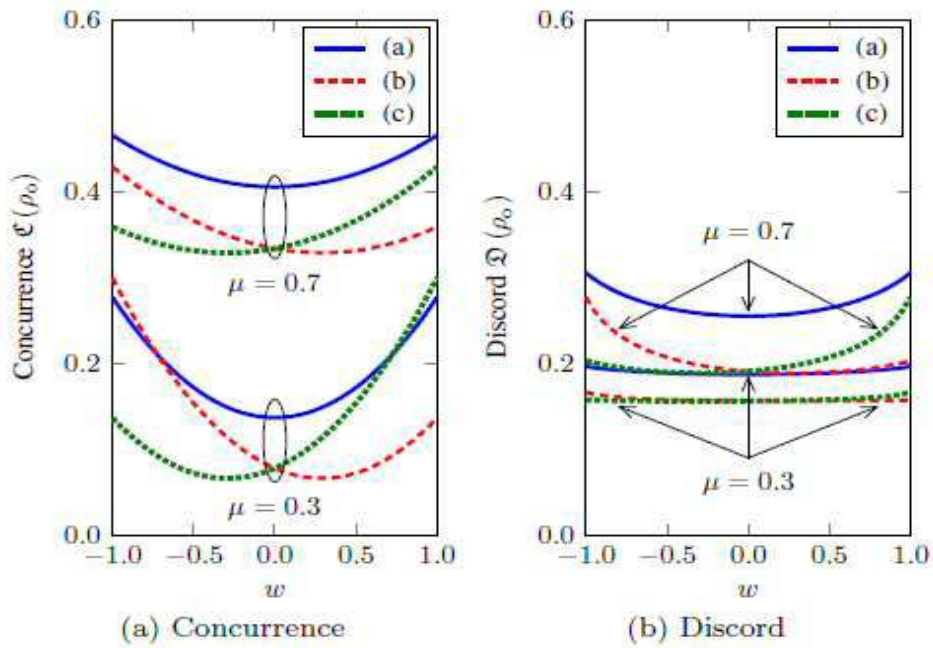
도면13



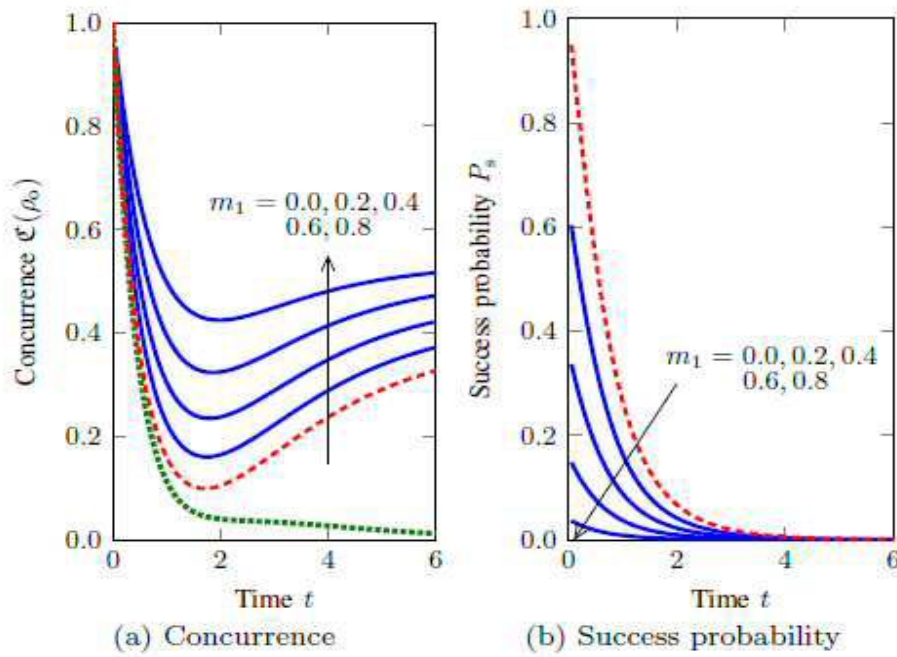
도면14



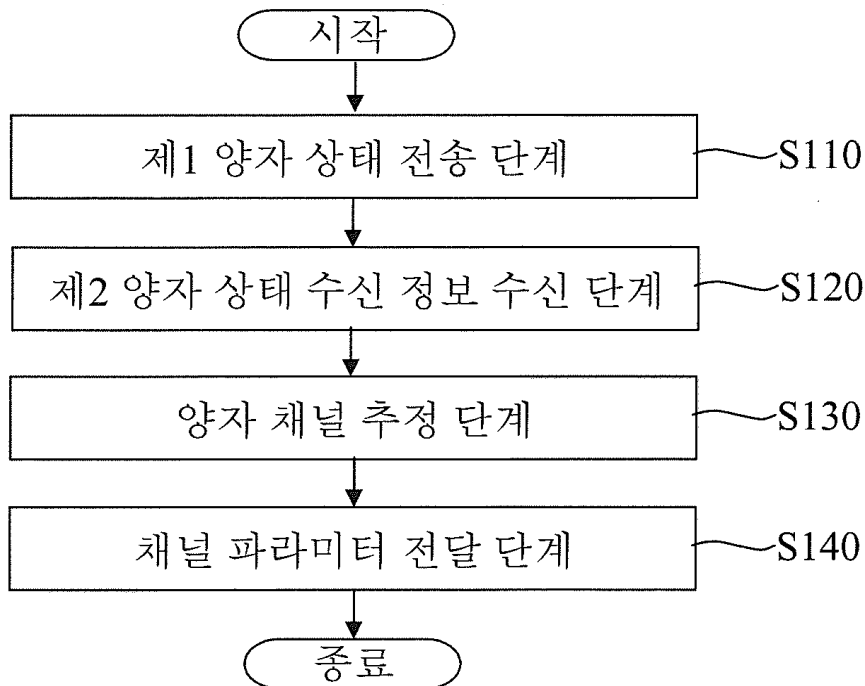
도면15



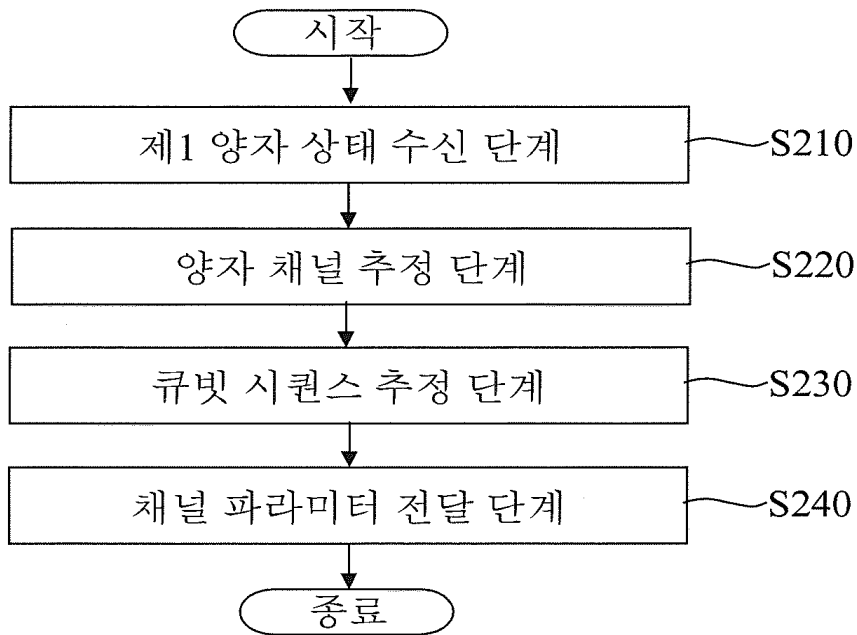
도면16



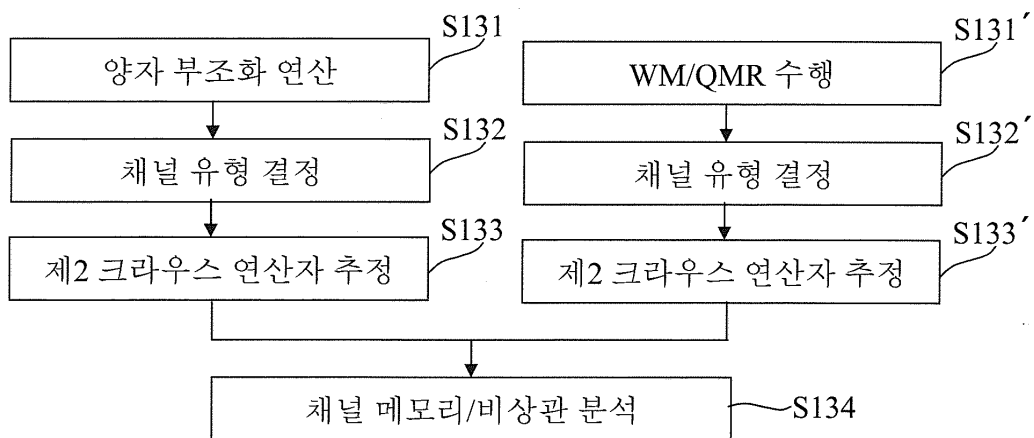
도면17



도면18



도면19



도면20

