



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0112456
(43) 공개일자 2019년10월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04L 25/02 (2006.01) H04B 10/70 (2013.01)
(52) CPC특허분류
H04L 25/0202 (2013.01)
H04B 10/70 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0034471
(22) 출원일자 2018년03월26일
심사청구일자 2018년03월26일

(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)
(74) 대리인
김홍석

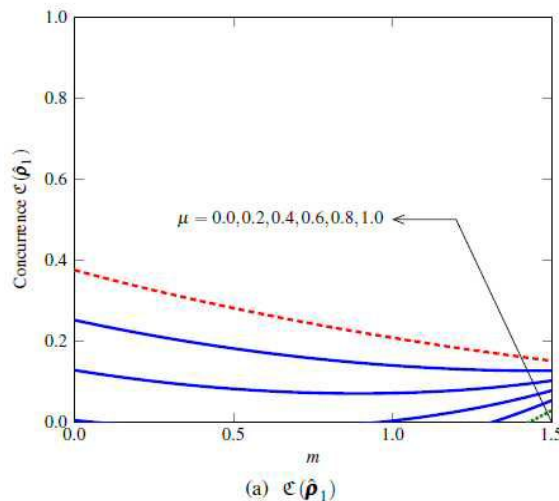
전체 청구항 수 : 총 20 항

(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, 양자 채널을 통해 밀도 연산자(ρ)를 수신 기기인 제2 기기로 전송하는 제1 양자 상태 전송 단계 - 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 감쇠(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널임 -; 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신하는 제2 양자 상태 정보 수신 단계; 및 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정하는 양자 채널 추정 단계를 포함하고, 특정 초기 상태를 갖는 시간 상관 양자 채널에서 채널 메모리 효과가 양자 상관에 미치는 영향을 정성적으로 분석할 수 있다.

대표도 - 도3a



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 R0190-15-2030

부처명 미래과학창조부

연구관리전문기관 정보통신기술진흥센터

연구사업명 정보통신방송연구개발사업

연구과제명 양자암호통신망 구축을 통한 신뢰성 검증기술 및 QKD 고도화를 위한 핵심 요소기술 개발

기 여 율 1/2

주관기관 경희대학교 산학협력단

연구기간 2017.07.01 ~ 2018.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2016R1A2B2014462

부처명 미래과학창조부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 개인연구지원사업(중견연구)

연구과제명 양자 초열힘을 이용한 하이브리드 양자통신 핵심기술 연구

기 여 율 1/2

주관기관 경희대학교 산학협력단

연구기간 2017.06.01 ~ 2018.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

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

양자 채널을 통해 밀도 연산자(ρ)를 수신 기기인 제2 기기로 전송하는 제1 양자 상태 전송 단계 — 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 감쇠(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널임 —;

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

상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정하는 양자 채널 추정 단계를 포함하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \underbrace{\sum_{i,j} A_{i,j} \rho A_{i,j}^\dagger}_{\triangleq \Phi_u(\rho)} + \mu \underbrace{\sum_k B_k \rho B_k^\dagger}_{\triangleq \Phi_c(\rho)} \quad \text{로 결정되고,}$$

여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자이고,

상기 양자 채널 추정 단계는,

상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 을 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 3

제2 항에 있어서,

상기 양자 채널 추정 단계는,

초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵에 대한 컨커런스(concurrence) 정보를 획득하는 단계; 및

특정 시각에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정하고,

정상 상태(steady-state)에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정하는 양자 채널 인자 추정 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 4

제2 항에 있어서,

상기 양자 채널 추정 단계는,

초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 양자 불일치(quantum discord)에 관한 정보를 획득하는 단계 ; 및

특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정하고,

정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정하는 양자 채널 인자 추정 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 5

제1 항에 있어서,

상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은,

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

에 의해 결정되고,

여기서, L_i 및 R_i 는 좌측 고유 연산자(left eigenoperator) 및 우측 고유 연산자(right eigenoperator)이고, λ_i 는 고유값(eigenvalue)이고,

상기 양자 채널 추정 단계는,

상기 고유값을 추정하여 zero-temperature dissipation rate Ω , 광자(photon) 평균 개수 n 및 압축 파라미터 m 을 획득하는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 6

제2 항에 있어서,

상기 추정된 SGAD 채널에 기반하여, 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터 m 을 상기 제2 기기로 전달하는 채널 파라미터 전달 단계를 더 포함하고,

상기 제2 기기는 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터 m 에 기반하여, 상기 제1 기기와 양자 통신을 수행하는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 7

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

송신 기기인 제1 기기로부터 양자 채널을 통해 송신된 밀도 연산자(ρ)를 수신하는 제1 양자 상태 수신 단계 - 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 감쇠(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널이고, 상기 밀도 연산자(ρ)는 상기 SGAD 채널을 통해 확률 맵($\Phi(\rho)$)으로 수신됨 -; 및

상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정하는 양자 채널 추정 단계를 포함하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 8

제7 항에 있어서,

상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \underbrace{\sum_{i,j} A_{i,j} \rho A_{i,j}^\dagger}_{\triangleq \Phi_u(\rho)} + \mu \underbrace{\sum_k B_k \rho B_k^\dagger}_{\triangleq \Phi_c(\rho)}$$

로 결정되고,

여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자이고,

상기 양자 채널 추정 단계는,

상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 에 관한 정보를 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 9

제8 항에 있어서,

상기 양자 채널 추정 단계에서,

특정 시각에서의 킨커런스 정보에 기반하여, 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정하고,

정상 상태(steady-state)에서의 킨커런스 정보에 기반하여, 상기 제1 기기에 의해 추정된 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정하고,

상기 킨커런스 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득되는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 10

제 8항에 있어서,

상기 양자 채널 추정 단계에서,

특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정하고,

정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정하고,

상기 양자 불일치 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득되는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 11

제7 항에 있어서,

상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은,

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

에 의해 결정되고,

여기서, L_i 및 R_i 는 좌측 고유 연산자(left eigenoperator) 및 우측 고유 연산자(right eigenoperator)이고, λ_i 는 고유값(eigenvalue)이고,

상기 양자 채널 추정 단계는,

상기 고유값에 기반하여, zero-temperature dissipation rate Ω , 광자(photon) 평균 개수 n 및 압축 파라미터 m 에 관한 정보가 추정되는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 12

양자 채널 예측을 수행하는 양자 송신 기기에 있어서,

양자 채널을 통해 밀도 연산자(ρ)를 수신 기기인 제2 기기로 전송하고, 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신하는 인터페이스부 - 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 감쇠(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널임 -; 및

상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정하는 제어부를 포함하는, 양자 송신 기기.

청구항 13

제12 항에 있어서,

상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \underbrace{\sum_{i,j} A_{i,j} \rho A_{i,j}^\dagger}_{\triangleq \Phi_u(\rho)} + \mu \underbrace{\sum_k B_k \rho B_k^\dagger}_{\triangleq \Phi_c(\rho)} \quad \text{로 결정되고,}$$

여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자이고,

상기 제어부는,

상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 을 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 송신 기기.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 제어부는,

초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵에 대한 컨커런스(concurrence) 정보를 획득하고,

특정 시각에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정하고,

정상 상태(steady-state)에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 송신 기기.

청구항 15

제13항에 있어서,

상기 제어부는,

초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 양자 불일치(quantum discord)에 관한 정보를 획득하고,

특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정하고,

정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 16

제12항에 있어서,

상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은,

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

에 의해 결정되고,

여기서, L_i 및 R_i 는 좌측 고유 연산자(left eigenoperator) 및 우측 고유 연산자(right eigenoperator)이고, λ_i 는 고유값(eigenvalue)이고,

상기 제어부는,

상기 고유값을 추정하여 zero-temperature dissipation rate Ω , 광자(photon) 평균 개수 n 및 압축 파라미터 m 을 획득하는 것을 특징으로 하는, 양자 채널 예측 수행 방법.

청구항 17

양자 채널 예측을 수행하는 양자 수신 기기에 있어서,

송신 기기인 제1 기기로부터 양자 채널을 통해 송신된 밀도 연산자(ρ)를 수신하는 인터페이스부 - 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 감쇠(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널

널이고, 상기 밀도 연산자(ρ)는 상기 SGAD 채널을 통해 확률 맵($\Phi(\rho)$)으로 수신됨; 및

상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정하는 제어부를 포함하는, 양자 수신 기기.

청구항 18

제17 항에 있어서,

상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \underbrace{\sum_{i,j} A_{i,j} \rho A_{i,j}^\dagger}_{\triangleq \Phi_u(\rho)} + \mu \underbrace{\sum_k B_k \rho B_k^\dagger}_{\triangleq \Phi_c(\rho)} \quad \text{로 결정되고,}$$

여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자이고,

상기 제어부는,

상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 에 관한 정보를 추정하는 것을 특징으로 하는, 양자 수신 기기.

청구항 19

제18 항에 있어서,

상기 제어부는,

특정 시각에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정하고,

정상 상태(steady-state)에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 상기 제1 기기에 의해 추정된 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정하고,

상기 컨커런스 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득되는 것을 특징으로 하는, 양자 수신 기기.

청구항 20

제 8항에 있어서,

상기 제어부는,

특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정하고,

정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정하고,

상기 양자 불일치 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득되는 것을 특징으로 하는, 양자 수신 기기.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 양자 채널 예측을 수행하는 양자 시스템에 관한 것이다. 보다 상세하게는, 양자 메모리 채널 모델링 방법 및 양자 채널 예측 방법과 이를 수행하는 양자 통신 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

- [0002] 양자 기술의 발전은 클라우드 컴퓨팅, 5G 통신, 사물 인터넷에서 양자 역학의 특성을 이용하여 다양한 정보 처리에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 양자 상관(quantum correlation), 예컨대 양자 얽힘(quantum entanglement) 및 불일치(discord)는 초 압축 코딩, 양자 텔레포테이션 및 양자 암호화와 같은 다양한 잠재적인 응용에 있어 중요하게 활용 가능하다. 그러나 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. 그러므로 다양한 주변 잡음하에서 양자 상관 거동을 연구하고, 양자 상관을 생성하고 보존하는 것은 양자 정보 처리 및 양자 연산 분야에서 가장 큰 중요성을 갖는다.
- [0003] 한편, 채널 메모리 효과는 다양한 양자 채널을 통해 널리 활용되었다. 연속적인 채널 사용에 의해 유발되는 채널 메모리 효과는 분리 가능한 양자 상태보다는 오히려 얽힌 양자 상태를 이용하여 양자 채널의 기본적 용량을 증대시킬 수 있다. 정보 이론 분석과 달리, 채널 메모리 효과로 인해 시간에 따른 두 개의 큐비트 간의 양자 상관 변화(evolution)가 보류(freeze)될 수 있다. 따라서, entanglement sudden death (ESD) 현상이 완벽하게 회피 가능하다. 또한, 양자 상관이 시간-상관 양자 채널을 통해 생성되거나 보존될 수 있다.
- [0004] 이러한 채널 메모리 효과는 변동 복굴절(fluctuating birefringence)이 나타나는 광섬유 링크와 저 주파수 잡음을 겪는 고체 상태 양자 하드웨어에서 실험적으로 증명되었다. 그러므로 다양한 유형의 양자 상관의 역학 거동에 대한 채널 메모리 효과를 연구하는 것이 중요하다. 예를 들어, 진폭 왜곡(damping), 위상 왜곡, 비-편파(depolarizing) 및 시간-상관 Markovian 양자 채널(TCMQCs)에서 양자 상관 역학에 대한 채널 메모리 효과가 논의되었다. 진폭 왜곡, 비-편파 및 비트 반전(flip) 채널에서 비-관성(non-inertial) 프레임에서의 얽힘 역학에 대한 초기 상태의 역할이 연구되었다. 한편, 양자 상태를 비-상관으로부터 보호하기 위하여 제안된 weak measurement (WM)을 이용하여 비-상관이 효과적으로 억제될 수 있다.
- [0005] 하지만, 전송된 채널 메모리 효과로 인한 양자 상관에 미치는 영향을 정확히 분석하는 방법이 제시된 바가 없다는 문제점이 있다. 특히, 특정 초기 상태를 갖는 시간-상관 양자 채널에서 채널 메모리 효과가 양자 상관에 미치는 영향이 정성적으로 분석된 바가 없다는 문제점이 있다. 따라서, 양자 통신 및 보안에서, 시간에 따른 양자 채널의 정확한 추정이 요구된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0006] 따라서, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공하는 것을 목표로 한다.
- [0007] 또한, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 특정 초기 상태를 갖는 시간 상관 양자 채널에서 채널 메모리 효과가 양자 상관에 미치는 영향을 정성적으로 분석하는 것을 목표로 한다.

과제의 해결 수단

- [0008] 상기와 같은 과제를 해결하기 위한 본 발명에 따른 양자 채널 예측을 수행하는 방법에서, 상기 방법은 송신 기기인 제1 기기에 의해 수행되고, 양자 채널을 통해 밀도 연산자(ρ)를 수신 기기인 제2 기기로 전송하는 제1 양자 상태 전송 단계 - 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 감쇠(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널임 -; 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신하는 제2 양자 상태 정보 수신 단계; 및 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정하는 양자 채널 추정 단계를 포함하고, 특정 초기 상태를 갖는 시간 상관 양자 채널에서 채널 메모리 효과가 양자 상관에 미치는 영향을 정성적으로 분석할 수 있다.
- [0009] 일 실시 예에서, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 수학적 식 8로 결정되고, 여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자일 수 있다. 이때, 상기 양자 채널 추정 단계는, 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 을 추정하는 것을 특징으로 한다.
- [0010] 일 실시 예에서, 상기 양자 채널 추정 단계는, 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵에 대한 컨커런스

(concurrency) 정보를 획득하는 단계; 및 특정 시각에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정하고, 정상 상태(steady-state)에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정하는 양자 채널 인자 추정 단계를 포함할 수 있다.

[0011] 일 실시 예에서, 상기 양자 채널 추정 단계는, 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 양자 불일치(quantum discord)에 관한 정보를 획득하는 단계; 및 특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정하고, 정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정하는 양자 채널 인자 추정 단계를 포함할 수 있다.

[0012] 일 실시 예에서, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은, 수학적 식 35에 의해 결정되고, 여기서, L_i 및 R_i 는 좌측 고유 연산자(left eigenoperator) 및 우측 고유 연산자(right eigenoperator)이고, λ_i 는 고유값(eigenvalue)일 수 있다. 상기 양자 채널 추정 단계는, 상기 고유값을 추정하여 zero-temperature dissipation rate Ω , 광자(photon) 평균 개수 n 및 압축 파라미터 m 을 획득하는 것을 특징으로 한다.

[0013] 일 실시 예에서, 상기 추정된 SGAD 채널에 기반하여, 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터 m 을 상기 제2 기기로 전달하는 채널 파라미터 전달 단계를 더 포함할 수 있다. 이때, 상기 제2 기기는 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터 m 에 기반하여, 상기 제1 기기와 양자 통신을 수행할 수 있다.

[0014] 본 발명의 다른 양상에 따른 양자 채널 예측을 수행하는 방법에 있어서, 상기 방법은 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되고, 송신 기기인 제1 기기로부터 양자 채널을 통해 송신된 밀도 연산자(ρ)를 수신하는 제1 양자 상태 수신 단계 - 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 감쇠(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널이고, 상기 밀도 연산자(ρ)는 상기 SGAD 채널을 통해 확률 맵($\Phi(\rho)$)으로 수신됨 -; 및 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정하는 양자 채널 추정 단계를 포함한다.

[0015] 일 실시 예에서, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 수학적 식 8로 결정되고, 여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자일 수 있다. 이때, 상기 양자 채널 추정 단계는, 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 에 관한 정보를 추정하는 것을 특징으로 한다.

[0016] 일 실시 예에서, 상기 양자 채널 추정 단계에서, 특정 시각에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정하고, 정상 상태(steady-state)에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 상기 제1 기기에 의해 추정된 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정할 수 있다. 이때, 상기 컨커런스 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득될 수 있다.

[0017] 일 실시 예에서, 상기 양자 채널 추정 단계에서, 특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정하고, 정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정할 수 있다. 이때, 상기 양자 불일치 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득될 수 있다.

[0018] 일 실시 예에서, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은, 수학적 식 35에 의해 결정되고, 여기서, L_i 및 R_i 는 좌측 고유 연산자(left eigenoperator) 및 우측 고유 연산자(right eigenoperator)이고, λ_i 는 고유값(eigenvalue)일 수 있다. 이때, 상기 양자 채널 추정 단계는, 상기 고유값에 기반하여, zero-temperature dissipation rate Ω , 광자(photon) 평균 개수 n 및 압축 파라미터 m 에 관한 정보가 추정될 수 있다.

[0019] 본 발명의 또 다른 양상에 따른 양자 채널 예측을 수행하는 양자 송신 기기는, 양자 채널을 통해 밀도 연산자(ρ)를 수신 기기인 제2 기기로 전송하고, 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신하는 인터페이스부 - 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 감쇠(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널임 -; 및 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정하는 제어부를 포함한다.

[0020] 일 실시 예에서, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 수학적 식 8로 결정되고, 여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자일 수 있다. 이때, 상기 제어부는, 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한

정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 을 추정할 수 있다.

- [0021] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵에 대한 컨커런스(concurrence) 정보를 획득하고, 특정 시각에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정하고, 정상 상태(steady-state)에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정할 수 있다.
- [0022] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 양자 불일치(quantum discord)에 관한 정보를 획득하고, 특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정하고, 정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정할 수 있다.
- [0023] 일 실시 예에서, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은, 수학적 식 35에 의해 결정되고, 여기서, L_i 및 R_i 는 좌측 고유 연산자(left eigenoperator) 및 우측 고유 연산자(right eigenoperator)이고, λ_i 는 고유값(eigenvalue)일 수 있다. 이때, 상기 제어부는, 상기 고유값을 추정하여 zero-temperature dissipation rate Ω , 광자(photon) 평균 개수 n 및 압축 파라미터 m 을 획득할 수 있다.
- [0024] 본 발명의 또 다른 양상에 있어, 양자 채널 예측을 수행하는 양자 수신 기기는, 송신 기기인 제1 기기로부터 양자 채널을 통해 송신된 밀도 연산자(ρ)를 수신하는 인터페이스부 - 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 감쇠(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널이고, 상기 밀도 연산자(ρ)는 상기 SGAD 채널을 통해 확률 맵($\Phi(\rho)$)으로 수신됨 -; 및 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정하는 제어부를 포함한다.
- [0025] 일 실시 예에서, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 수학적 식 8로 결정되고, 여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자일 수 있다. 이때, 상기 제어부는, 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 에 관한 정보를 추정할 수 있다.
- [0026] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 특정 시각에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정하고, 정상 상태(steady-state)에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 상기 제1 기기에 의해 추정된 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정할 수 있다. 이때, 상기 컨커런스 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득될 수 있다.
- [0027] 일 실시 예에서, 상기 제어부는, 특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정하고, 정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정할 수 있다. 이때, 상기 양자 불일치 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득될 수 있다.

발명의 효과

- [0028] 본 발명에 따른 방법은, 양자 상태의 양자 상관 특성을 이용하여, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공할 수 있다는 장점이 있다.
- [0029] 또한, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 특정 초기 상태를 갖는 시간 상관 양자 채널에서 채널 메모리 효과가 양자 상관에 미치는 영향을 정성적으로 분석할 수 있다는 장점이 있다.
- [0030] 특히, 시간-상관 압축 일반 진폭 왜곡(SGAD) 채널에서 초기에 준비된 Werner-유사 혼합 상태를 이용하여 양자 상관 거동에 관한 채널 메모리 효과를 증명할 수 있다는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

- [0031] 도 1은 본 발명에 따른 양자 채널 예측 방법을 수행하는 양자 시스템을 도시한다.
- 도 2는 본 발명에 따른 양자 기기의 상세 구성을 도시한다.
- 도 3a 및 도 3b는 본 발명에 따른 $\mu = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 및 1인 경우 압축 파라미터 m 에 따른 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 컨커런스를 나타낸다.

도 4a 및 도 4b는 각각 $\mu = 0$ 과 $\mu = 0.7$ 에 대하여, $m = 0, 0.5, 1.0$, 및 $m \rightarrow 1.5$ 인 경우 시간 t 의 함수로서 $n = 1$, $\Omega = 1$, $\varepsilon = 0.6$ 에 대한 컨커런스를 나타낸다.

도 5a 및 도 5b는 정상 상태에서 초기 상태 ρ_2 의 컨커런스 거동을 제시하기 위한 도면이다.

도 6a 및 도 6b는 본 발명에 따른 $\mu = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ 인 경우, $n = 1$, $\Omega = 1$, $\varepsilon = 0.9$ 에 대해 압축 파라미터 m 의 함수로서 $t = 0.5$ 에서의 변성 상태의 불일치를 나타낸다.

도 7a 및 도 7b는 각각 $\mu = 0$ 과 $\mu = 0.7$ 에 대하여, $m = 0, 0.5, 1.0$, 및 $m \rightarrow 1.5$ 인 경우 시간 t 의 함수로서 $n = 1$, $\Omega = 1$, $\varepsilon = 0.6$ 에 대한 불일치를 나타낸다.

도 8a 및 도 8b는 $n = 0$ 및 $n \rightarrow \infty$ 에 대하여 (ε, μ)의 함수로서 정상 상태에서 불일치를 나타낸다.

도 9는 본 발명의 일 실시 예에 따른 양자 채널 예측 방법의 흐름도를 나타낸다.

도 10은 본 발명의 다른 실시 예에 따른 양자 채널 예측 방법의 흐름도를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0032] 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.
- [0033] 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용한다.
- [0034] 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.
- [0035] 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.
- [0036] 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.
- [0037] 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않아야 한다.
- [0038] 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.
- [0039] 이하, 본 발명의 바람직한 실시 예를 첨부한 도면을 참조하여 당해 분야에 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 설명한다. 하기에 본 발명의 실시 예를 설명함에 있어, 관련된 공지의 기능 또는 공지의 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략한다.
- [0040] 이하, 본 발명에 따른 양자 채널 예측 방법 및 양자 채널 예측 시스템에 대해 살펴보기로 하자.
- [0041] 이와 관련하여, 도 1은 본 발명에 따른 양자 채널 예측 방법을 수행하는 양자 시스템을 도시한다. 도 1에 도시된 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, 서버)인 경우도 포함된다.

- [0042] 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.
- [0043] 제1 기기(100)는 제어부(110), 인터페이스부(120) 및 메모리(130)를 포함한다. 마찬가지로, 제2 기기(200)도 제어부(210), 인터페이스부(220) 및 메모리(230)를 포함한다. 여기서, 인터페이스부(120, 220)는 양자 채널을 통해 양자 데이터를 송수신하므로 양자 인터페이스부라고 지칭될 수 있다. 또한, 인터페이스부(120, 220)는 일부 제어 데이터 또는 관련된 정보를 일반 채널(classical channel)을 통해 송수신할 수 있으므로, 일반 인터페이스부로도 지칭될 수 있다. 즉, 인터페이스부(120, 220)는 물리적으로 구분된 양자 인터페이스부와 일반 인터페이스부를 구비하거나, 또는 논리적으로 구분된 양자 인터페이스부와 일반 인터페이스부를 구비할 수 있다. 따라서, 인터페이스부(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, 인터페이스부(120)는 상기 일반 채널을 통해 상기 제2 기기(200)로부터 피드백 정보 (예컨대, 양자 채널 정보, 상관 피드백)를 수신할 수 있다.
- [0044] 인터페이스부(120)는 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 수신 기기인 제2 기기(200)로 전송하고, 양자 채널을 통해 제2 기기(200)에 의해 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 제2 기기(200)로부터 수신하도록 구성된다. 이때, 제1 양자 상태(ρ)는 N개의 큐비트 시퀀스로 이루어질 수 있다.
- [0045] 구체적으로, 인터페이스부(120)는 양자 채널을 통해 밀도 연산자(ρ)를 수신 기기인 제2 기기(200)로 전송하고, 양자 채널을 통해 제2 기기(200)에 의해 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 제2 기기(200)로부터 수신한다. 여기서, 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 왜곡(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널일 수 있다.
- [0046] 제어부(110)는 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정하도록 구성된다.
- [0047] 메모리(130)는 양자 채널 추정 및 상태 전송과 관련하여, 양자 정보 및 일반 정보를 저장하도록 구성될 수 있다.
- [0048] 다음으로, 수신 기기에 해당하는 제2 기기(200)에 의해 수행되는 동작에 대해 살펴보면 다음과 같다.
- [0049] 인터페이스부(210)는 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 송신 기기인 제1 기기(100)로부터 수신하도록 구성된다. 이때, 상기 제1 양자 상태(ρ)는 상기 양자 채널을 통해 인터페이스부(210)에서 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)로 수신될 수 있다. 이때, 제1 양자 상태(ρ)는 N개의 큐비트 시퀀스로 이루어질 수 있다.
- [0050] 구체적으로, 인터페이스부(210)는 송신 기기인 제1 기기(100)로부터 양자 채널을 통해 송신된 밀도 연산자(ρ)를 수신한다. 여기서, 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 왜곡(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널일 수 있다. 이때, 상기 밀도 연산자(ρ)는 상기 양자 채널을 통해 인터페이스부(210)에서 확률 맵($\Phi(\rho)$)으로 수신될 수 있다.
- [0051] 한편, 제1 기기(100)에 의해 송신된 양자 정보는 제2 기기(200)가 이미 알고 있는 트레이닝 시퀀스(known training sequence)이거나, 또는 미지의 양자 데이터(unknown quantum data)일 수 있다.
- [0052] 제어부(220)는 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 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.
- [0053] 메모리(230)는 양자 채널 추정 및 상태 전송과 관련하여, 양자 정보 및 일반 정보를 저장하도록 구성될 수 있다.

[0054] 한편, 전송된 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, **압축 일반 진폭 왜곡(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널**에 대해 살펴보기로 하자.

[0055] 오픈 시스템(open system)에서, 밀도 연산자(density operator) ρ 의 확률 맵(stochastic map)은 아래의 수식 1과 같은 변환 과정을 거치게 된다.

수학식 1

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

[0056]

[0057] 여기서, 밀도 연산자는 수식 2의 마스터 수학적식을 만족한다고 가정할 수 있다.

수학식 2

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

[0058]

[0059] 여기서, H 는 시스템 해밀토니안(Hamiltonian), $\mathcal{L}$ 는 Lindblad 연산자, 및 $[\cdot, \cdot]$ 는 교환자(commutator)를 나타낸다. 첫번째 부분은 코히어런트 다이내믹스를 설명하고, 두번째 부분은 왜곡 메커니즘을 설명한다. Born-Markov 회전파(rotating wave) 근사화 하에서 압축 열 상태(squeezed thermal state)로 초기에 베스(bath)와 상호 작용하는 양자 시스템의 SGAD 채널에 대하여, SGAD 채널에 대응하는 Lindblad 연산자는 수식 3과 같은 형태를 갖는다.

수학식 3

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\rho = & -\frac{\Omega(n+1)}{2}(\sigma_+\sigma_-\rho + \rho\sigma_+\sigma_- - 2\sigma_-\rho\sigma_+) - \frac{\Omega n}{2}(\sigma_-\sigma_+\rho + \rho\sigma_-\sigma_+ - 2\sigma_+\rho\sigma_-) \\ & - \Omega m(\sigma_+\rho\sigma_+ + \sigma_-\rho\sigma_-) \end{aligned}$$

[0060]

[0061] 여기서, $\sigma_+ = \frac{1}{2}(\sigma_1 + i\sigma_2)$ 및 $\sigma_- = \frac{1}{2}(\sigma_1 - i\sigma_2)$ 는 생성(creation) 및 소멸(annihilation) 연산자; $i = 1, 2, 3$ 에 대하여 σ_i 는 파울리(Pauli) 행렬; n 은 열 광자(thermal photon)의 개수; $m < n + 1/2$ 는 압축 파라미터; Ω 는 자발 방출(spontaneous emission)과 연관된, 원자 다이폴의 zero-temperature dissipation rate를 나타낸다. 압축 파라미터는 원자 다이폴의 비균등 왜곡율을 유도한다. 즉, 원자 다이폴의 동위상(in-phase)과 비-동위상(out-phase)은 다른 방식으로 영향을 미치며, 이는 압축 파라미터 m 에 의해 정량화될 수 있다. SGAD 채널은 $m = 0$ 인 경우 일반 진폭 왜곡(amplitude damping) 채널 (열장(thermal field) 채널)과 등가이고, $n = 0$ 으로 설정하여 진폭 왜곡 채널 (자발 방출)로 더 단순화될 수 있다.

[0062] **시간-상관 양자 채널(Time-Correlated Quantum Channel)**

[0063] 양자 채널은 CTPP(completely positive and trace preserving) 특성을 보장한다. 양자 채널에서 밀도 연산자(ρ)의 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 수식 4와 같이 표현될 수 있다.

수학식 4

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

여기서, $A_i = \sqrt{p_{i_1, \dots, i_N}} E_i$ 는 크라우스 연산자이고 $p_{i_1, \dots, i_N}$ 은 N 큐비트의 시퀀스에 적용되는 연산자의 랜덤 시퀀스에 대한 확률이고 $\sum_i p_{i_1, \dots, i_N} = 1$ 을 만족한다. 연속적인 채널 사용을 위한 메모리 효과에 대한 수학적식과 관련하여, $p_{i_1, \dots, i_N}$ 은 수학식 5와 같은 형태를 갖는다.

수학식 5

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

여기서, $p_{i_1, \dots, i_N}$ 은 조건부 확률이고, 예를 들어 두 번의 연속적인 채널 사용 간에 시간 상관성이 존재하는 양자 채널을 고려할 수 있다. 이때, 채널 메모리 파라미터의 척도인 $\mu \in [0, 1]$ 를 도입하여, 수학식 5의 조건부 확률은 $p_{i_2 | i_1} = (1 - \mu) p_{i_2} + \mu \delta_{i_1, i_2}$ 로 단순화될 수 있고, 이로부터 수학식 6과 같이 양자 메모리 채널에 대한 크라우스 연산자를 획득할 수 있다.

수학식 6

$$A_{i,j} = \sqrt{p_i [(1 - \mu) p_j + \mu \delta_{i,j}]} E_i \otimes E_j$$

여기서, $\delta_{i,j}$ 는 수학식 7에 의해 정의되는 크로네커 델타(Kronecker delta)를 나타낸다.

수학식 7

$$\delta_{i,j} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$

초기 상태 $\rho \in \mathbb{C}^2 \otimes \mathbb{C}^2$ 을 갖는 두 개의 큐비트에 대한 확률 맵 Φ 과 임의의 채널 메모리에 대한 명시적 표현은 수학식 8과 같이 표현된다.

수학식 8

$$\Phi(\rho) = (1 - \mu) \underbrace{\sum_{i,j} A_{i,j} \rho A_{i,j}^\dagger}_{\triangleq \Phi_u(\rho)} + \mu \underbrace{\sum_k B_k \rho B_k^\dagger}_{\triangleq \Phi_c(\rho)}$$

[0072]

[0073] 여기서, $B_k \in \mathbb{C}^2 \otimes \mathbb{C}^2$ 는 시간-상관 양자 채널에 대한 크라우스 연산자이다.

[0074] 양자 상관 역학 (Dynamics of Quantum Correlation)

[0075] 일반적으로, 양자 상관은 두 개의 카테고리, 즉 얽힘(entanglement)과 불일치(discord)로 구분될 수 있다. 양자 상관의 측정은 로컬 유니터리 연산에서 i) 비-네거티비티(non-negativity), ii) 불변(invariant), 및 iii) 분리가능 상태(separable state)에 대하여 제로 값이라는 조건들을 만족해야 한다. 아래에서는 초기 Werner-유사 혼합 상태를 갖는 시간-상관 SGAD 채널에서 컨커런스(concurrence) 및 불일치(discord) 측정을 이용하여 양자 상관 역학에 대해 살펴보기로 한다.

[0076] 초기 상태(Initial State)

[0077] 두 개의 큐비트에 대한 초기 상태로서 Werner-유사 혼합 상태 $\rho_w \in \mathbb{C}^2 \otimes \mathbb{C}^2$ 을 고려하면 수학식 9와 같이 표현 가능하다.

수학식 9

$$\rho_w = \begin{cases} \rho_1 = \varepsilon |\psi_1\rangle \langle \psi_1| + \frac{1-\varepsilon}{4} I_4 \\ \rho_2 = \varepsilon |\psi_2\rangle \langle \psi_2| + \frac{1-\varepsilon}{4} I_4 \end{cases}$$

[0078]

[0079] 여기서, $\varepsilon \in [0, 1]$ 은 초기 상태의 순도(purity)를 나타내고, 두 개의 큐비트 상태는 수학식 10, 11과 같이 표현 가능하고, 이는 벨-유사 얽힘 두 개의 큐비트 상태에 대응한다.

수학식 10

$$|\psi_1\rangle = \sqrt{1/2}|00\rangle + \sqrt{1/2}|11\rangle$$

[0080]

수학식 11

$$|\psi_2\rangle = \sqrt{1/2}|10\rangle + \sqrt{1/2}|01\rangle$$

[0081]

[0082] Werner-유사 상태 ρ_w 는 $\varepsilon > 1/3$ 인 경우 얽힘 상태이고, 그렇지 않으면 분리 가능한 상태이다. 특히, ρ_2 를 singlet-유사 상태로 지칭할 수 있다.

[0083] 두 개의 큐비트 상태에 대한 임의의 밀도 행렬에 대하여, $\mathcal{C}(\rho)$ 로 표시되는 컨커런스는 수학식 12와 같이 연산될 수 있다.

수학식 12

$$\mathfrak{C}(\boldsymbol{\rho}) = \left[\sqrt{\sigma_{[1]}} - \sqrt{\sigma_{[2]}} - \sqrt{\sigma_{[3]}} - \sqrt{\sigma_{[4]}} \right]$$

여기서, $\sigma_{[1]} > \sigma_{[2]} > \sigma_{[3]} > \sigma_{[4]}$ 는 확률 맵 $\boldsymbol{\rho} \sigma_2^{\otimes 2} \boldsymbol{\rho}^* \sigma_2^{\otimes 2}$ 의 내림 차순 형태의 고유값(eigenvalue)이고, $[x]_+ = \max\{x, 0\}$ 이 되도록 x 의 양수 부분을 나타낸다.

초기 밀도 행렬 $\boldsymbol{\rho}_1$ 에 대하여, 확률 맵 $\hat{\boldsymbol{\rho}}_1 = \Phi(\boldsymbol{\rho}_1)$ 의 출력은 수학식 13으로 표현 가능하다.

수학식 13

$$\mathfrak{C}(\hat{\boldsymbol{\rho}}_1) = \left[(1 - \mu) \mathfrak{C}_u + \mu \mathfrak{C}_c \right]$$

여기서, 수학식 13의 각 인자는 수학식 14 및 15와 같이 표현 가능하다.

수학식 14

$$\mathfrak{C}_u = \left(\varepsilon \cosh(2\Omega m t) - \frac{1}{(2n+1)^2} \right) \Lambda(t) + \left(\frac{\varepsilon}{2} + \frac{1}{2(2n+1)^2} \right) \Lambda(t)^2 - \frac{2n(n+1)}{(2n+1)^2}$$

수학식 15

$$\mathfrak{C}_c = \varepsilon \Lambda(t)^{1/2} e^{-\Omega m t} - \frac{1 - \varepsilon}{2}$$

여기서, 왜곡 파라미터는 $\Lambda(t) = e^{-\Omega(2n+1)t}$ 로 표현된다. 유사하게, 초기 밀도 행렬 $\boldsymbol{\rho}_2$ 에 대하여 확률밀도의 출력은 수학식 16과 같이 표현된다.

수학식 16

$$\mathfrak{C}(\hat{\boldsymbol{\rho}}_2) = \left[\varepsilon \cosh(2\Omega m t) \Lambda(t) (1 - \mu) + \varepsilon \mu - \frac{1}{2(2n+1)^2} \sqrt{(1 - \mu) \mathfrak{C}_u^+ + \mu \mathfrak{C}_c^+} \sqrt{(1 - \mu) \mathfrak{C}_u^- + \mu \mathfrak{C}_c^-} \right]$$

여기서, 수학식 16의 각 인자는 수학식 17 내지 20으로 표현 가능하다.

수학식 17

$$\mathcal{C}_u^+ = \left(1 - \varepsilon (1 + 2n)^2\right) \Lambda(t)^2 + 4n\Lambda(t) + 4n^2$$

수학식 18

$$\mathcal{C}_u^- = \left(1 - \varepsilon (1 + 2n)^2\right) \Lambda(t)^2 - 4(n+1)\Lambda(t) + 4(n+1)^2$$

수학식 19

$$\mathcal{C}_c^+ = (2n+1)(1-\varepsilon)(2n+\Lambda(t))$$

수학식 20

$$\mathcal{C}_c^- = (2n+1)(1-\varepsilon)(2(n+1)-\Lambda(t))$$

한편, 완전한 메모리 채널 ($\mu = 1$)에 대하여, 두 개의 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 컨커런스는 수학식 21 및 22와 같이 표현 가능하다.

수학식 21

$$\mathcal{C}(\hat{\rho}_1) = \left[\varepsilon \Lambda(t)^{1/2} e^{-\Omega m t} - \frac{1-\varepsilon}{2} \right]$$

수학식 22

$$\mathcal{C}(\hat{\rho}_2) = \left[\varepsilon - \frac{1-\varepsilon}{2(2n+1)} \sqrt{(2n+\Lambda(t))(2(n+1)-\Lambda(t))} \right]$$

수학식 21의 컨커런스 $\mathcal{C}(\hat{\rho}_1)$ 는 시간 t 에 따라 단조 감소하고 결국 ESD 현상을 갖는다. 왜곡 감쇠 비율은 광자(photon)의 평균 개수 n 및/또는 압축 파라미터(squeezing parameter) m 에 따라 증가하기 때문에, SGAD 채널에서 ESD 현상은 (일반화된) 진폭 왜곡 채널에서보다 더 빠른 것처럼 보인다. ρ_2 가 초기 상태로 준비된 경우 압축효과는 얽힘과 연관된 역학에 영향을 미치지 않는다.

정상 상태(steady state) ($t \rightarrow \infty$)에서, 두 개의 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 는 수학식 23 및 24로 표현된다.

수학식 23

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathfrak{C}(\hat{\mathbf{p}}_1) \rightarrow 0$$

수학식 24

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathfrak{C}(\hat{\mathbf{p}}_2) \rightarrow \left[\varepsilon \mu - \frac{1}{2(2n+1)^2} \sqrt{4(1-\mu)n^2 + 2\mu n(2n+1)(1-\varepsilon)} \right. \\ \left. \times \sqrt{4(1-\mu)(n+1)^2 + 2\mu(n+1)(2n+1)(1-\varepsilon)} \right]$$

이는 양자 채널 파라미터에 관계없이 상태 $\mathbf{p}_1$ 에서의 얽힘은 시간이 경과함에 따라 소멸함을 의미하는 반면에, 양자 채널 파라미터에 따라 상태 $\mathbf{p}_2$ 에서의 얽힘이 보존되거나 또는 발생할 수 있음을 의미한다. 완전한 채널 메모리($\mu = \varepsilon = 1$)를 갖는 순수 상태 $\mathbf{p}_2$ 에서의 얽힘은 시간에 따라 변하지 않음, 즉, $\mathfrak{C}(\hat{\mathbf{p}}_2) = 1$ 임을 주목할 필요가 있다. 포지티브 값의 채널 메모리 값을 갖는 채널 메모리 자발 방출($n = 0$)의 경우에, 상태 $\mathbf{p}_2$ 에서의 얽힘은 수학식 25와 같이 결국 비-제로 컨커런스를 갖는다.

수학식 25

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathfrak{C}(\hat{\mathbf{p}}_2) \rightarrow \varepsilon \mu$$

이는 비록 초기 상태에서 비-얽힘 상태 ($\varepsilon \leq 1/3$)로 준비되었음에도 불구하고, 채널 메모리에 의해 정상 상태에서 얽힘이 발생할 수 있음을 의미한다. $n \rightarrow \infty$ 에 따라, 컨커런스 $\mathfrak{C}(\hat{\mathbf{p}}_2)$ 는 수학식 26과 같이 수렴됨을 알 수 있다.

수학식 26

$$\lim_{t, n \rightarrow \infty} \mathfrak{C}(\hat{\mathbf{p}}_2) \rightarrow \left[\frac{3\varepsilon\mu - 1}{2} \right]$$

이와 관련하여, $\varepsilon \mu \geq 1/3$ 인 경우에만 상태 $\mathbf{p}_2$ 는 비-제로 컨커런스를 가짐을 알 수 있다.

도 3a 및 도 3b는 본 발명에 따른 $\mu = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 및 1 인 경우 압축 파라미터 m 에 따른 $\mathbf{p}_1$ 및 $\mathbf{p}_2$ 에 대한 컨커런스를 나타낸다. 이때, 도 3a 및 도 3b에서, $n = 1$, $\Omega = 1$, $\varepsilon = 0.9$ 이다. 도 3a 및 도 3b에서, μ 가 증가함에 따라 강한 채널 메모리 효과로 인해 더 높은 컨커런스를 획득할 수 있음을 알 수 있다. $0 \leq \mu \leq 1$ 인 경우, 상태 $\mathbf{p}_2$ 에 대한 강한 압축 효과는 얽힘 현상을 강화시킴을 알 수 있다. 반면에, 상태 $\mathbf{p}_1$ 에 대한 높은 채널 메모리 효과는 얽힘 현상을 열화시킴을 알 수 있다. 이는 $\cosh(2\Omega mt)$ 라는 컴포넌트 효과에 기인하고, 이는 압축 파라미터와 연관되고, 컨커런스에 대하여 채널 메모리가 증가함에 따라 열화됨을 알 수 있다.

[0111] 도 4a 및 도 4b는 각각 $\mu = 0$ 과 $\mu = 0.7$ 에 대하여, $m = 0, 0.5, 1.0$, 및 $m \rightarrow 1.5$ 인 경우 시간 t 의 함수로서 $n=1$, $\Omega = 1$, $\varepsilon = 0.6$ 에 대한 컨커런스를 나타낸다. 초기에, 모든 초기 상태에서 두 개의 큐빗은 컨커런스 $\mathcal{C}(\rho_w) = 0.4$ 를 갖는 얽힘 상태를 갖는다. 도 4a에 도시된 바와 같이, 컨커런스는 빠르게 감소하고, ESD 현상은 채널 메모리가 없는 것처럼 보인다. $\mathcal{C}(\hat{\rho}_1)$ 와 비교하여 $\mathcal{C}(\hat{\rho}_2)$ 는 약간 더 큰 컨커런스 값을 가지고, 압축 효과는 ESD 현상을 지연시킴을 알 수 있다. ESD 현상이 상태 ρ_1 에서 채널 메모리에 의해 연기될 수 있지만, ESD 현상은 도 4b와 같이 회피할 수는 없다. 그러나, 얽힘 상태는 보존될 수 있고, 상태 ρ_2 에서 채널 메모리 효과에 의해 ESD 현상을 완전히 회피할 수 있다. 이러한 예에서, $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathcal{C}(\hat{\rho}_2) \rightarrow 0.1507$ 이고, 이는 수학적 24에 표시된 정상 상태의 컨커런스에 대응한다. 도 3a 및 도 3b에 도시된 바와 같이, 초기 상태 ρ_2 에서 시간에 따른 컨커런스의 왜곡은 압축 파라미터 m 에 의해 지연된다. 반면에, 높은 채널 메모리에 기인하는 초기 상태 ρ_1 에서 시간에 따른 컨커런스의 감소는 압축 파라미터 m 이 증가함에 따라 강화된다.

[0112] 한편, 도 5a 및 도 5b는 정상 상태에서 초기 상태 ρ_2 의 컨커런스 거동을 제시하기 위한 도면이다. 도 5a 및 도 5b는 각각 (a) 최상의 케이스로 $n = 0$ (진폭 왜곡 채널) 및 (b) 최악의 케이스로 $n \rightarrow \infty$ 인 경우 (ε, μ)의 함수로서 컨커런스 $\mathcal{C}(\rho_2)$ 를 도시한 것이다. $n = 0$ (자발 방출)의 경우, 초기에 두 개의 큐빗 사이에 얽힘이 없는 경우 ($\varepsilon < 1/3$)에도 포지티브 채널 메모리가 존재한다면 시간-상관 SGAD 채널을 통과한 이후에 두 개의 큐빗 사이에 얽힘이 발생할 수 있다. 그러나, n 이 증가함에 따라 이러한 얽힘 발생 현상은 억제된다. 도 5b 및 수학적 26에 나타난 바와 같이, $\varepsilon \mu < 1/3$ 이면 상태 ρ_2 는 결국 비-얽힘(disentanglement) 상태가 된다. 다시 말하면, 초기에 준비된 혼합 상태 ρ_2 가 얽힘이 없는 경우 ($\varepsilon < 1/3$), 양자 채널이 완전한 채널 메모리를 갖는 경우라도 얽힘 현상이 발생하지 않게 된다. 정상 상태에서 얽힘에 대한 n 의 효과는 $n = 0$ 인 경우 원자 변환 접근 방식(atomic inversion approaches)으로부터 발생되는 반면에, $n \neq 0$ 인 경우 특정 포지티브 평형(equilibrium)에 접근한다.

[0113] 양자 불일치(Quantum Discord)

[0114] 불일치에 대한 연산은 NR-complete의 범주에 속한다. 그러나, 특정 양자 상태들에 대해 해석적으로 불일치를 판단할 수 있다. 예를 들어, 'X' 상태 ρ 는 수학적 27으로 정의된다.

수학적 27

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

[0115]

[0116] 상태 ρ 에 대한 불일치에 대한 해석적인 표현은 수학적 28과 같이 연산될 수 있다.

수학적 28

$$\mathcal{D}(\rho) = \min \{Q_1, Q_2\}$$

[0117]

[0118] 여기서, Q_1 및 Q_2 는 수학적 29 및 30으로 표현 가능하다.

수학식 29

$$Q_1 = \sum_{i=1}^4 \bar{\lambda}_i \log_2 \bar{\lambda}_i + H(\rho_{11} + \rho_{33}) + H\left(\frac{1 + \sqrt{(1 - 2(\rho_{33} + \rho_{44}))^2 + 4(|\rho_{14}| + |\rho_{23}|)^2}}{2}\right)$$

[0119]

수학식 30

$$Q_2 = \sum_{i=1}^4 (\bar{\lambda}_i \log_2 \bar{\lambda}_i - \rho_{ii} \log_2 \rho_{ii})$$

[0120]

[0121] 여기서, $H(x) = -x \log_2 x - (1-x) \log_2 (1-x)$; $\bar{\lambda}_i$ 는 $\mathbf{p}$ 의 i 번째 고유값이다.

[0122] 초기 상태 $\mathbf{p}_0$ 의 불일치는 포지티브 값을 가지고, $0 < \varepsilon < 1$ 에 대하여 수학식 31과 같이 계산될 수 있다.

수학식 31

$$\mathfrak{D}(\mathbf{p}_w) = \frac{1}{4} ((1-\varepsilon) \log_2 (1-\varepsilon) + (1+3\varepsilon) \log_2 (1+3\varepsilon) - 2(1+\varepsilon) \log_2 (1+\varepsilon))$$

[0123]

[0124] 한편, $\varepsilon = 1$ 에 대하여 $\mathfrak{D}(\mathbf{p}_w) = 1$ 이다.

[0125] 정상 상태에서, 변성(contaminated) 상태는 수학식 32 및 33과 같이 표현 가능하다.

수학식 32

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{p}}_1 \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{n[2n(1+\mu\varepsilon)+\mu(1+\varepsilon)]}{2(2n+1)^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\mu(1-\varepsilon)+4n(1+n)(1-\mu\varepsilon)}{4(2n+1)^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\mu(1-\varepsilon)+4n(1+n)(1-\mu\varepsilon)}{4(2n+1)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(n+1)[2(n+1)(1+\mu\varepsilon)-\mu(1+\varepsilon)]}{2(2n+1)^2} \end{pmatrix}$$

[0126]

수학식 33

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{p}}_2 \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{n[2n(1-\mu\varepsilon)+\mu(1-\varepsilon)]}{2(2n+1)^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\mu(1+\varepsilon)+4n(1+n)(1+\mu\varepsilon)}{4(2n+1)^2} & \frac{\mu\varepsilon}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\mu\varepsilon}{2} & \frac{\mu(1+\varepsilon)+4n(1+n)(1+\mu\varepsilon)}{4(2n+1)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(n+1)[2(n+1)(1-\mu\varepsilon)-\mu(1-\varepsilon)]}{2(2n+1)^2} \end{pmatrix}$$

[0127]

[0128] 정상 상태에서 밀도 행렬은 단지 대각 성분만을 가지기 때문에 (이로 인해, $Q_2 = 0$ 이 됨), 양자 상태 ρ_1 은 결국 불일치 값이 0이 됨을 증명할 수 있다. 이는 양자 상태 ρ_1 이 밀도 행렬의 비-대각 성분에 의해 정량화될 수 있는 양자 상태를 잃게 됨을 알 수 있다. 반면에, 양자 상태 ρ_2 는 정상 상태에서도 포지티브의 채널 메모리가 존재하는 경우 불일치 상태를 유지하게 되고, 또한 밀도 행렬의 비-대각 성분이 μ 의 함수가 되는 상태를 유지하게 된다.

[0129] 도 6a 및 도 6b는 본 발명에 따른 $\mu = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ 인 경우, $n = 1, \Omega = 1, \varepsilon = 0.9$ 에 대해 압축 파라미터 m 의 함수로서 $t = 0.5$ 에서의 변성 상태의 불일치를 나타낸다. 불일치 정도는 컨커런스보다 대체적으로 더 높은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 dissipative 환경에서 얽힘보다 불일치가 더 강인(robust)함에 기인한다.

[0130] 한편, 도 7a 및 도 7b는 각각 $\mu = 0$ 과 $\mu = 0.7$ 에 대하여, $m = 0, 0.5, 1.0$, 및 $m \rightarrow 1.5$ 인 경우 시간 t 의 함수로서 $n = 1, \Omega = 1, \varepsilon = 0.6$ 에 대한 불일치를 나타낸다. 유한 시간 영역에서 양자 상관 sudden death 현상이 없음을 주목할 필요가 있다. 불일치 (초기 불일치는 $\mathcal{D}(\rho_w) = 0.3651$)는 모든 초기 상태에 대해 비-메모리(memoryless) 양자 채널에서 시간이 경과함에 따라 0으로 감쇠되거나, 초기 상태 ρ_2 에 대하여 채널 메모리가 보존되는 경우 비-제로 불일치 한계 영역에 접근한다. 이와 관련하여, $\mathcal{D}(\rho_2) = 0.1968$ 이다. 한편, 도 8a 및 도 8b는 $n = 0$ 및 $n \rightarrow \infty$ 에 대하여 (ε, μ)의 함수로서 정상 상태에서 불일치를 나타낸다. 도 8a 및 도 8b를 참조하면, 도 4a 및 도 4b와 같이 불일치에 있어 동일한 거동, 즉 정상 상태에서의 불일치는 모두 초기 상태에 대한 ε 및 μ 에 따라 증가함을 알 수 있다.

[0131] 한편, 본 발명의 다른 실시 예에 따른 시간-상관 SGAD 채널들에 대한 확률 맵에 대해 살펴보면 다음과 같다. 이와 관련하여, Lindblad에 대한 수정 버전을 이용하여, 수학적식 34와 같이 확률 맵을 획득할 수 있다.

수학적식 34

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\rho = & -\frac{\Omega(n+1)}{2} \left(\sigma_+^{\otimes 2} \sigma_-^{\otimes 2} \rho + \rho \sigma_+^{\otimes 2} \sigma_-^{\otimes 2} - 2\sigma_-^{\otimes 2} \rho \sigma_+^{\otimes 2} \right) - \frac{\Omega n}{2} \left(\sigma_-^{\otimes 2} \sigma_+^{\otimes 2} \rho + \rho \sigma_-^{\otimes 2} \sigma_+^{\otimes 2} - 2\sigma_+^{\otimes 2} \rho \sigma_-^{\otimes 2} \right) \\ & - \Omega m \left(\sigma_+^{\otimes 2} \rho \sigma_+^{\otimes 2} + \sigma_-^{\otimes 2} \rho \sigma_-^{\otimes 2} \right) \end{aligned}$$

[0132]

[0133] 여기서, $\sigma_i^{\otimes 2} = \sigma_i \otimes \sigma_i$ 이다. Lindblad에 대한 솔루션은 임의의 시간에서 밀도 연산자 ρ 를 확장시키는 고유값 방정식을 푸는 것과 연관된다.

수학적식 35

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

[0134]

[0135] 여기서, L_i 및 R_i 는 좌측 및 우측 고유연산자(eigenoperator)를 나타내고, λ_i 는 고유값에 대응하고, $\text{tr}(\cdot)$ 는 트레이스 연산자를 나타낸다. 한편, 수학적식 35에서 고유값 λ_i 는 수학적식 36과 같이 주어진다.

수학식 36

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_8^{\pm} = 0 \\ \lambda_4 = -2\Omega(n+1/2) \\ \lambda_5^{\pm} = \lambda_6^{\pm} = -\Omega(n+1)/2 \\ \lambda_7^{\pm} = -\Omega(n \pm m + 1/2) \\ \lambda_9^{\pm} = \lambda_{10}^{\pm} = -\Omega n/2 \end{cases}$$

[0136]

[0137] 전술된 좌측 및 우측 고유 연산자는 아래의 수학식 37 내지 46으로 표현 가능하다.

수학식 37

$$R_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \frac{2N}{2N+1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(N+1)}{2N+1} \end{pmatrix}, L_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

[0138]

수학식 38

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, L_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0139]

수학식 39

$$R_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, L_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0140]

수학식 40

$$R_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, L_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \frac{2(N+1)}{2N+1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{2N}{2N+1} \end{pmatrix}$$

[0141]

수학식 41

$$R_5^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & \pm 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, L_5^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \pm 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0142]

수학식 42

$$R_6^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \pm 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, L_6^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pm 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0143]

수학식 43

$$R_7^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \pm 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, L_7^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pm 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0144]

수학식 44

$$R_8^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, L_8^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0145]

수학식 45

$$R_9^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pm 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, L_9^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0146]

수학식 46

$$R_{10}^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pm 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, L_{10}^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \pm 1 & 0 \end{pmatrix}$$

[0147]

Li 및 Rj 간의 듀얼리티 관계에 따르면 $\text{tr}(LiRj) = \delta_{i,j}$ 를 만족한다.

[0148]

X 상태에 대한 확률 맵: 밀도 행렬 ρ 는 아래의 수학식 47과 같은 형태를 갖는다.

[0149]

수학식 47

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

[0150]

초기 상태에서 $\rho_{11}, \rho_{22}, \rho_{33}, \rho_{44} \in \mathbb{R}, \rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} + \rho_{44} = 1$, 와 $\rho_{14}, \rho_{23} \in \mathbb{C}$ 이다. 확률 맵 $\Phi_c(\rho)$ 는 수학식 48으로 표현 가능하다.

[0151]

수학식 48

$$\Phi_c(\rho) = \begin{pmatrix} \rho_{c11} & 0 & 0 & \rho_{c14} \\ 0 & \rho_{c22} & \rho_{c23} & 0 \\ 0 & \rho_{c23}^* & \rho_{c33} & 0 \\ \rho_{c14}^* & 0 & 0 & \rho_{c44} \end{pmatrix}$$

[0152]

여기서, $\Phi_c(\rho)$ 의 성분은 수학식 49로 표현 가능하다.

[0153]

수학식 49

$$\begin{aligned} \rho_{c11} &= \frac{n(\rho_{11} + \rho_{44}) + ((n+1)\rho_{11} - n\rho_{44})\Lambda(t)}{2n+1} \\ \rho_{c22} &= \rho_{22} \\ \rho_{c33} &= \rho_{33} \\ \rho_{c44} &= \frac{(n+1)(\rho_{11} + \rho_{44}) - ((n+1)\rho_{11} - n\rho_{44})\Lambda(t)}{2n+1} \\ \rho_{c14} &= \Lambda(t)^{1/2} e^{-\Omega_m t} \Re(\rho_{14}) + i\Lambda(t)^{1/2} e^{\Omega_m t} \Im(\rho_{14}) \\ \rho_{c23} &= \rho_{23} \end{aligned}$$

[0154]

[0155]

여기서, 감쇠 파라미터는 $\Lambda(t) = e^{-\Omega(2n+1)t}$ 이다. 확률 맵 $\Phi_u(\rho)$ 은 수학식 50으로 표현 가능하다.

수학식 50

$$\Phi_u(\rho) = \begin{pmatrix} \rho_{u11} & 0 & 0 & \rho_{u14} \\ 0 & \rho_{u22} & \rho_{u23} & 0 \\ 0 & \rho_{u23}^* & \rho_{u33} & 0 \\ \rho_{u14}^* & 0 & 0 & \rho_{u44} \end{pmatrix}$$

[0156]

여기서, $\Phi_u(\rho)$ 의 각 성분은 아래의 수학식 51 내지 56으로 표현 가능하다.

수학식 51

$$\rho_{u11} = \frac{n^2 + n\Lambda(t) - n(n+1)\Lambda(t)^2}{(2n+1)^2} + \frac{n\Lambda(t) + (n+1)\Lambda(t)^2}{2n+1}\rho_{11} - \frac{n\Lambda(t) - n\Lambda(t)^2}{2n+1}\rho_{44}$$

[0158]

수학식 52

$$\begin{aligned} \rho_{u22} = & \frac{n(n+1)}{(2n+1)^2} + \frac{(n+1)\Lambda(t) - (n+1)^2\Lambda(t)^2}{(2n+1)^2}\rho_{11} + \frac{(2n^2 + 2n+1)\Lambda(t) + n(n+1)\Lambda(t)^2}{(2n+1)^2}\rho_{22} \\ & - \frac{2n(n+1)\Lambda(t) - n(n+1)\Lambda(t)^2}{(2n+1)^2}\rho_{33} - \frac{n\Lambda(t) + n^2\Lambda(t)^2}{(2n+1)^2}\rho_{44} \end{aligned}$$

[0159]

수학식 53

$$\begin{aligned} \rho_{u33} = & \frac{n(n+1)}{(2n+1)^2} + \frac{(n+1)\Lambda(t) - (n+1)^2\Lambda(t)^2}{(2n+1)^2}\rho_{11} - \frac{2n(n+1)\Lambda(t) - n(n+1)\Lambda(t)^2}{(2n+1)^2}\rho_{22} \\ & + \frac{(2n^2 + 2n+1)\Lambda(t) + n(n+1)\Lambda(t)^2}{(2n+1)^2}\rho_{33} - \frac{n\Lambda(t) + n^2\Lambda(t)^2}{(2n+1)^2}\rho_{44} \end{aligned}$$

[0160]

수학식 54

$$\rho_{u44} = \frac{(n+1)^2 - (n+1)\Lambda(t) - n(n+1)\Lambda(t)^2}{(2n+1)^2} - \frac{(n+1)\Lambda(t) - (n+1)\Lambda(t)^2}{2n+1}\rho_{11} + \frac{(n+1)\Lambda(t) + n\Lambda(t)^2}{2n+1}\rho_{44}$$

[0161]

수학식 55

$$\rho_{u14} = \Lambda(t) \left(-i\Im(\rho_{14}) + \Re(\rho_{14}) \cosh(2\Omega mt) - \Re(\rho_{23}) \sinh(2\Omega mt) \right)$$

[0162]

수학식 56

$$\rho_{u23} = \Lambda(t) \left(-i\Im(\rho_{23}) + \Re(\rho_{23}) \cosh(2\Omega mt) - \Re(\rho_{14}) \sinh(2\Omega mt) \right)$$

[0163]

[0164] 이상에서는, 본 발명에 따른 양자 채널 예측 방법 및 이를 수행하는 양자 송신 시스템에 대해 살펴보았다. 한편, 전술된 양자 자 채널 예측 방법과 관련하여, 도 2의 양자 시스템의 상세 구성을 참조하여 설명하면 다음과 같다.

[0165] 도 2를 참조하면, 인터페이스부(120)는 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 수신 기기인 제2 기기(200)로 전송하고, 양자 채널을 통해 제2 기기(200)에 의해 수신된 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 제2 기기(200)로부터 수신하도록 구성된다. 이때, 제1 양자 상태(ρ)는 N개의 큐비트 시퀀스로 이루어질 수 있다.

[0166] 구체적으로, 인터페이스부(120)는 양자 채널을 통해 밀도 연산자(ρ)를 수신 기기인 제2 기기(200)로 전송하고, 양자 채널을 통해 제2 기기(200)에 의해 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보를 제2 기기(200)로부터 수신한다. 여기서, 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 왜곡(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널일 수 있다.

[0167] 제어부(110)는 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정하도록 구성된다.

[0168] 한편, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 수학식 8로 결정되고, 여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자이다. 이때, 제어부(110)는 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 을 추정할 수 있다.

[0169] 한편, 제어부(110)는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵에 대한 컨커런스(concurrence) 정보를 획득할 수 있다. 또한, 제어부(110)는 특정 시각에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정할 수 있다. 또한, 제어부(110)는 정상 상태(steady-state)에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정할 수 있다.

[0170] 한편, 제어부(110)는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 양자 불일치(quantum discord)에 관한 정보를 획득할 수 있다. 또한, 제어부(110)는 특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정할 수 있다. 또한, 제어부(110)는 정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정할 수 있다.

[0171] 한편, 확률 맵($\Phi(\rho)$)은, 수학식 35에 의해 결정될 수 있고, 여기서, L_i 및 R_i 는 좌측 고유 연산자(left eigenoperator) 및 우측 고유 연산자(right eigenoperator)이고, λ_i 는 고유값(eigenvalue)이다. 이때, 제어부(110)는 고유값을 추정하여 zero-temperature dissipation rate Ω , 광자(photon) 평균 개수 n 및 압축 파라미터 m 을 획득할 수 있다.

[0172] 메모리(130)는 양자 채널 추정 및 상태 전송과 관련하여, 양자 정보 및 일반 정보를 저장하도록 구성될 수 있다.

[0173] 다음으로, 수신 기기에 해당하는 제2 기기(200)에 의해 수행되는 동작에 대해 살펴보면 다음과 같다.

- [0174] 인터페이스부(210)는 제1 양자 상태(ρ)를 양자 채널을 통해 송신 기기인 제1 기기(100)로부터 수신하도록 구성된다. 이때, 상기 제1 양자 상태(ρ)는 상기 양자 채널을 통해 인터페이스부(210)에서 제2 양자 상태($\Phi(\rho)$)로 수신될 수 있다. 이때, 제1 양자 상태(ρ)는 N개의 큐비트 시퀀스로 이루어질 수 있다.
- [0175] 구체적으로, 인터페이스부(210)는 송신 기기인 제1 기기(100)로부터 양자 채널을 통해 송신된 밀도 연산자(ρ)를 수신한다. 여기서, 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 왜곡(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널일 수 있다. 이때, 상기 밀도 연산자(ρ)는 상기 양자 채널을 통해 인터페이스부(210)에서 확률 맵($\Phi(\rho)$)으로 수신될 수 있다.
- [0176] 한편, 제1 기기(100)에 의해 송신된 양자 정보는 제2 기기(200)가 이미 알고 있는 트레이닝 시퀀스(known training sequence)이거나, 또는 미지의 양자 데이터(unknown quantum data)일 수 있다.
- [0177] 제어부(220)는 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 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.
- [0178] 또한, 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 수학적 8로 결정되고, 여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자이다. 이때, 제어부(220)는 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 에 관한 정보를 추정할 수 있다.
- [0179] 한편, 제어부(220)는 특정 시각에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정할 수 있다. 또한, 제어부(220)는 정상 상태(steady-state)에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 상기 제1 기기에 의해 추정된 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정할 수 있다. 이때, 상기 컨커런스 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득될 수 있다.
- [0180] 한편, 제어부(220)는 특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정할 수 있다. 또한, 제어부(220)는 정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정할 수 있다. 이때, 상기 양자 불일치 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득될 수 있다.
- [0181] 메모리(130)는 양자 채널 추정 및 상태 전송과 관련하여, 양자 정보 및 일반 정보를 저장하도록 구성될 수 있다.
- [0182] 이상에서는, 본 발명에 따른 양자 채널 예측을 수행하는 양자 송신 기기 및 양자 수신 기기에 대해 살펴보았다. 한편, 전술된 양자 채널 예측 방법은 양자 송신 기기, 양자 수신 기기뿐만 아니라 이들을 제어하는 서버에 의해 수행될 수도 있다.
- [0183] 아래에서는 본 발명의 다른 양상에 따른 양자 채널 예측 수행 방법에 대해 설명하기로 한다. 이와 관련하여, 본 발명에 관하여 전술된 내용은 아래에서 설명되는 양자 채널 예측 수행 방법과 결합되어 활용 가능하다.
- [0184] 한편, 도 9는 본 발명의 일 실시 예에 따른 양자 채널 예측 방법의 흐름도를 나타낸다. 도 9의 각 단계는 양자 송신 기기 또는 양자 서버에 의해 수행될 수 있다.
- [0185] 도 9를 참조하면, 양자 채널 예측 방법은 제1 양자 상태 전송 단계(S110), 제2 양자 상태 정보 수신 단계(S120) 및 양자 채널 추정 단계(S130)를 포함한다. 또한, 양자 채널 예측 방법은 채널 파라미터 전달 단계(S140)를 더 포함할 수 있다.
- [0186] 제1 양자 상태 전송 단계(S110)에서, 양자 채널을 통해 밀도 연산자(ρ)를 수신 기기인 제2 기기로 전송한다. 이때, 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 감쇠(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널일 수 있다.
- [0187] 제2 양자 상태 정보 수신 단계(S120)에서, 상기 양자 채널을 통해 상기 제2 기기에 의해 수신된 확률 맵(Φ

(ρ)에 대한 정보를 상기 제2 기기로부터 수신한다.

- [0188] 양자 채널 추정 단계(S130)에서, 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정할 수 있다. 이때, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 수학적 식 8로 결정되고, 여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자이다. 이때, 상기 양자 채널 추정 단계(S130)에서, 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 을 추정할 수 있다.
- [0189] 한편, 상기 양자 채널 추정 단계(S130)는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵에 대한 컨커런스(concurrence) 정보를 획득하는 단계; 및 특정 시각에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정하고, 정상 상태(steady-state)에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정하는 양자 채널 인자 추정 단계를 포함할 수 있다.
- [0190] 한편, 상기 양자 채널 추정 단계(S130)는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 양자 불일치(quantum discord)에 관한 정보를 획득하는 단계; 및 특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 을 추정하고, 정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 을 추정하는 양자 채널 인자 추정 단계를 포함할 수 있다.
- [0191] 한편, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 수학적 식 35에 의해 결정되고, 여기서, L_i 및 R_i 는 좌측 고유 연산자(left eigenoperator) 및 우측 고유 연산자(right eigenoperator)이고, λ_i 는 고유값(eigenvalue)이다. 이때, 상기 양자 채널 추정 단계(S130)에서, 상기 고유값을 추정하여 zero-temperature dissipation rate Ω , 광자(photon) 평균 개수 n 및 압축 파라미터 m 을 획득할 수 있다.
- [0192] 한편, 채널 파라미터 전달 단계(S140)에서, 상기 추정된 SGAD 채널에 기반하여, 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터 m 을 제2 기기로 전달할 수 있다. 이때, 상기 제2 기기는 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터 m 에 기반하여, 제1 기기와 양자 통신을 수행할 수 있다.
- [0193] 한편, 도 10은 본 발명의 다른 실시 예에 따른 양자 채널 예측 방법의 흐름도를 나타낸다. 도 10의 각 단계는 양자 수신 기기 또는 양자 기기에 의해 수행될 수 있다. 도 10의 양자 채널 예측 방법은 양자 수신 기기인 제2 기기에 의해 수행되고, 제1 양자 상태 수신 단계(S210), 양자 채널 추정 단계(S220) 및 채널 파라미터 수신 단계(230)를 포함한다.
- [0194] 제1 양자 상태 수신 단계(S210)에서, 송신 기기인 제1 기기로부터 양자 채널을 통해 송신된 밀도 연산자(ρ)를 수신한다. 이때, 상기 양자 채널은 시간-상관(time-correlated) 압축 일반 진폭 감쇠(SGAD: Squeezed Generalized Amplitude Damping) 채널이고, 상기 밀도 연산자(ρ)는 상기 SGAD 채널을 통해 확률 맵($\Phi(\rho)$)으로 수신될 수 있다.
- [0195] 양자 채널 추정 단계(S220)에서, 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 기반하여, 상기 SGAD 채널의 특성을 추정한다. 이때, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 수학적 식 8로 결정되고, 여기서, $\Phi_u(\rho)$ 는 양자 채널에서의 확률 맵이고, A_i 는 크라우스 연산자(Kraus operator)이고, $\Phi_c(\rho)$ 는 시간-상관 양자 채널에서의 확률 맵이고, B_k 는 시간-상관 양자 채널에서의 크라우스 연산자이다. 이때, 상기 양자 채널 추정 단계(S220)에서, 상기 수신된 확률 맵($\Phi(\rho)$)에 대한 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 에 관한 정보를 추정할 수 있다.
- [0196] 한편, 상기 양자 채널 추정 단계(S220)에서, 특정 시각에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정하고, 정상 상태(steady-state)에서의 컨커런스 정보에 기반하여, 상기 제1 기기에 의해 추정된 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정할 수 있다. 이때, 상기 컨커런스 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득될 수 있다.
- [0197] 한편, 상기 양자 채널 추정 단계(S220)에서, 특정 시각에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터인 m 에 관한 정보를 추정하고, 정상 상태에서의 양자 불일치 정보에 기반하여, 양자 얽힘(entanglement) 인자 ε 에 관한 정보를 추정할 수 있다. 이때, 상기 양자 불일치 정보는 초기 밀도 행렬 ρ_1 및 ρ_2 에 대한 확률 맵으로부터 획득될 수 있다.
- [0198] 한편, 상기 확률 맵($\Phi(\rho)$)은 수학적 식 35에 의해 결정되고, 여기서, L_i 및 R_i 는 좌측 고유 연산자(left

eigenoperator) 및 우측 고유 연산자(right eigenoperator)이고, λ_i 는 고유값(eigenvalue)일 수 있다. 이때, 상기 양자 채널 추정 단계(S220)에서, 상기 고유값에 기반하여, zero-temperature dissipation rate Ω , 광자(photon) 평균 개수 n 및 압축 파라미터 m 에 관한 정보가 추정될 수 있다.

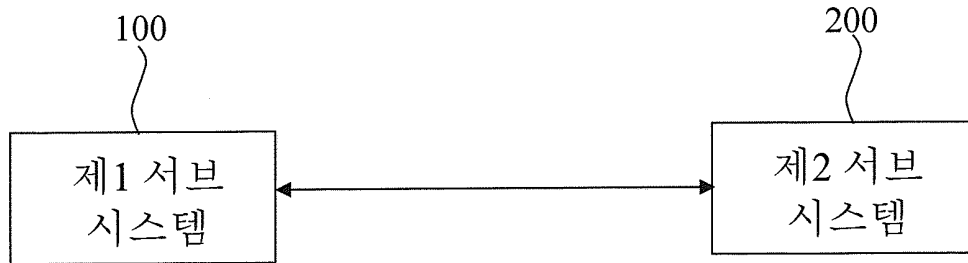
- [0199] 채널 파라미터 수신 단계(230)에서, 추정된 SGAD 채널에 기반하여, 채널 메모리 파라미터 μ 와 압축 파라미터 m 을 제1 기기로부터 수신할 수 있다. 이때, 상기 제2 기기는 상기 채널 메모리 파라미터 μ 와 상기 압축 파라미터 m 에 기반하여, 제1 기기와 양자 통신을 수행할 수 있다.
- [0200] 이상에서는, 시간 상관 SGAD 채널에서 양자 역학, 즉 얽힘 및 불일치에 대해 살펴보았다. 압축 파라미터 및 채널 메모리에 대한 컨커런스 및 불일치에 대한 해석적 표현이 제공될 수 있다. 이와 관련하여 다음과 같이 정리 가능하다: i) 싱글릿-유사 상태가 초기 상태로서 준비되고, 얽힘 및 불일치는 보존될 수 있고, 양자 상관 sudden death 현상은 회피 가능하다. ii) 초기 상태가 비-얽힘 상태인 경우에도 초기에 준비된 싱글릿-유사 상태는 유한한 n 개의 영역에서 채널 메모리의 포지티브 정도에 따라 얽힘 발생 현상을 또한 가능하게 한다. iii) 압축 효과는 양자 상관을 증가시키거나 또는 지연시켜, 초기에 준비된 양자 상태뿐만 아니라 채널 메모리 정도에 따라 (정상 상태 값을 제한하는) 평형 상태로 감쇠되도록 한다.
- [0201] 본 발명에 따른 방법은, 양자 상태의 양자 상관 특성을 이용하여, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공할 수 있다는 장점이 있다.
- [0202] 본 발명에 따른 방법은, 따라서, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 시간의 변화에 따른 정확한 양자 채널 추정 방법을 제공하는 것을 목표로 한다.
- [0203] 또한, 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는, 특정 초기 상태를 갖는 시간 상관 양자 채널에서 채널 메모리 효과가 양자 상관에 미치는 영향을 정성적으로 분석할 수 있다는 장점이 있다.
- [0204] 특히, 시간-상관 압축 일반 진폭 왜곡(SGAD) 채널에서 초기에 준비된 Werner-유사 혼합 상태를 이용하여 양자 상관 거동에 관한 채널 메모리 효과를 증명할 수 있다는 장점이 있다.
- [0205] 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

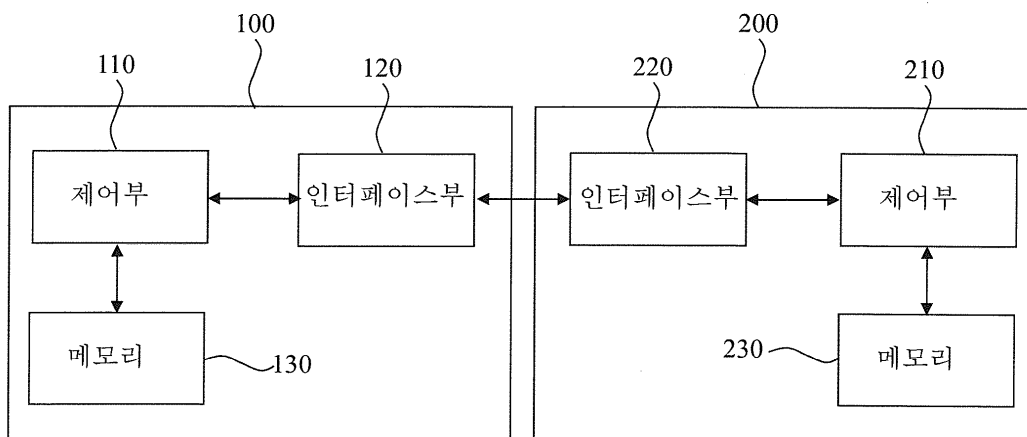
- [0206] 100: 제1 서버 시스템 200: 제2 서버 시스템
- 110, 210: 제어부 120, 220: 인터페이스부
- 130, 230: 메모리

도면

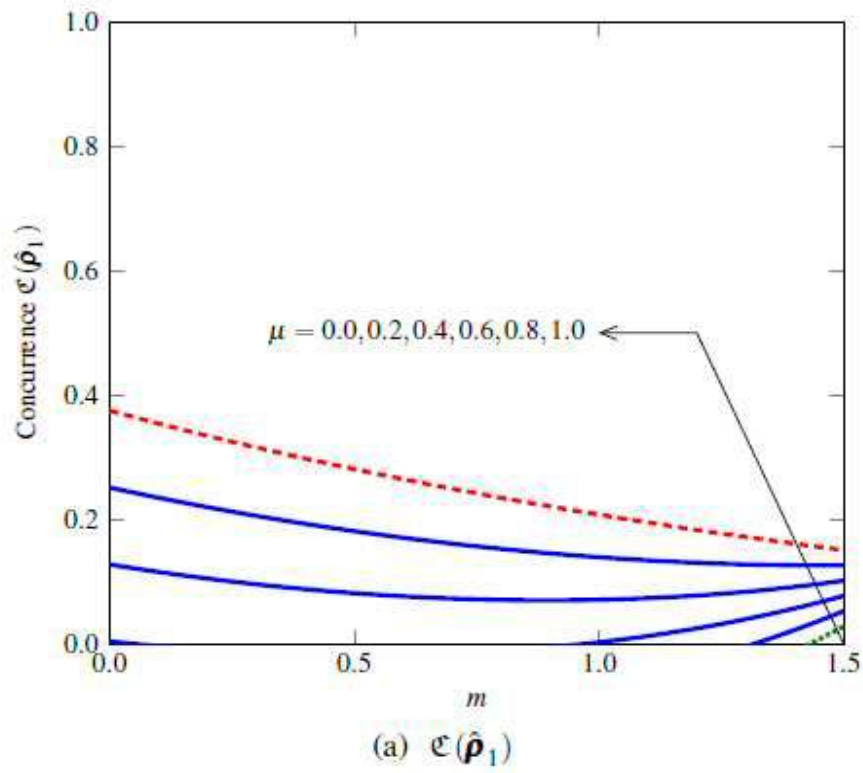
도면1



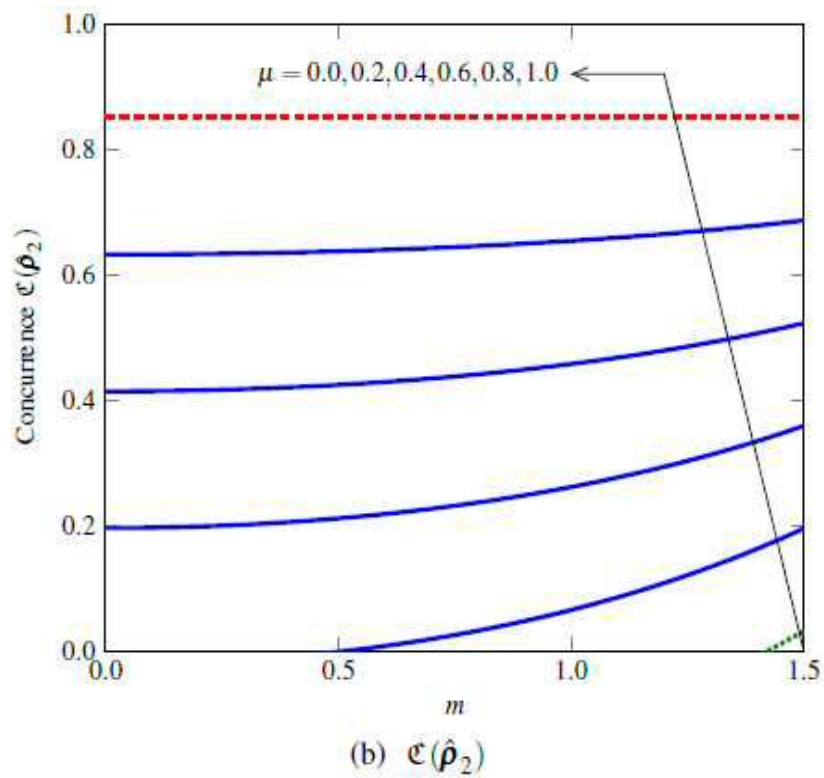
도면2



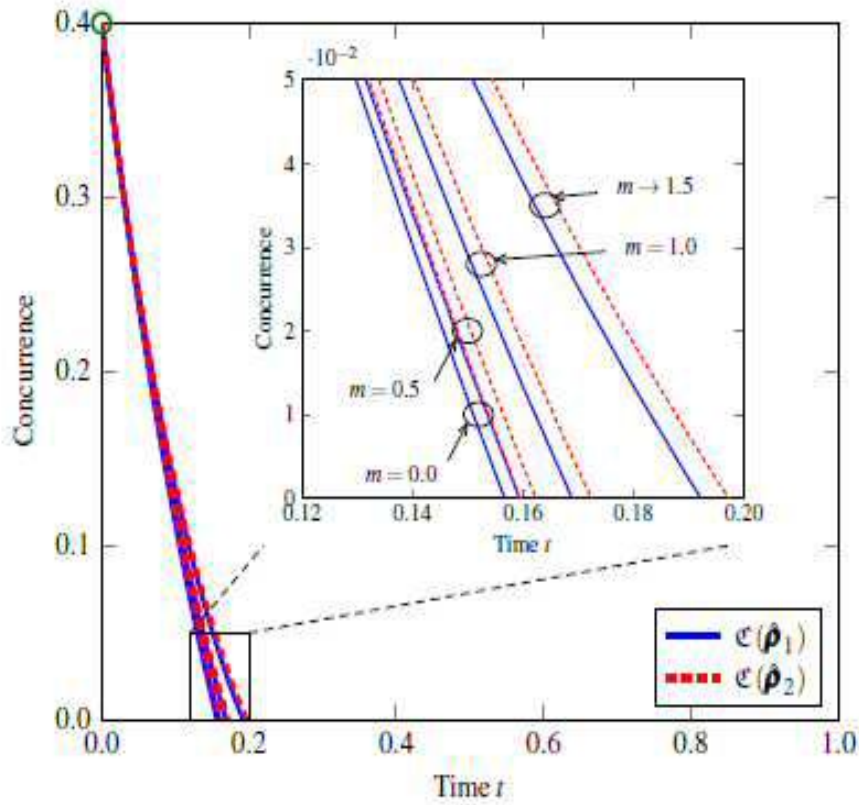
도면3a



도면3b

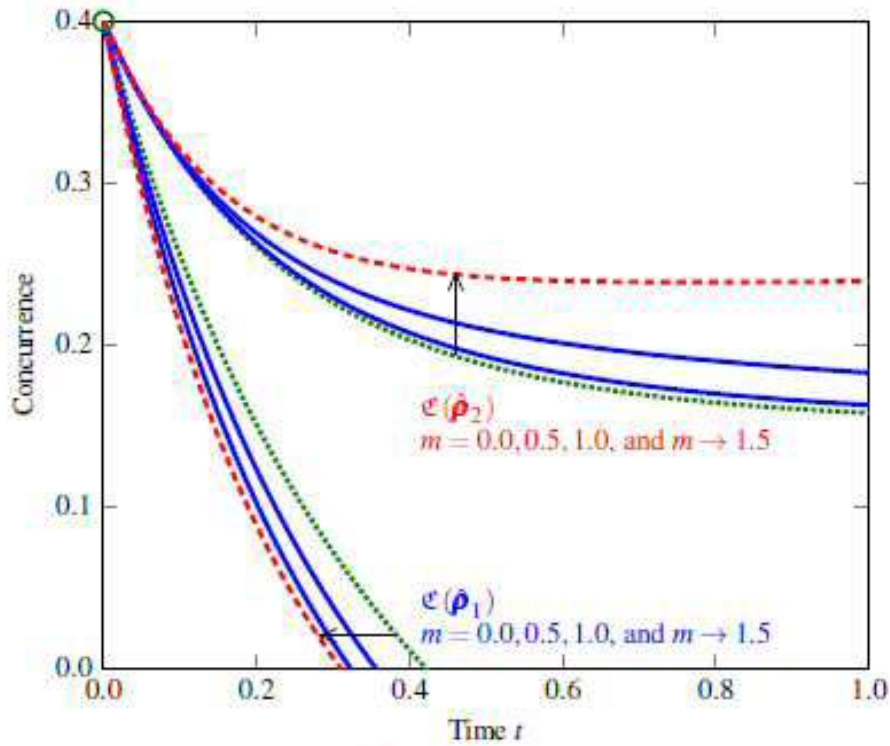


도면4a



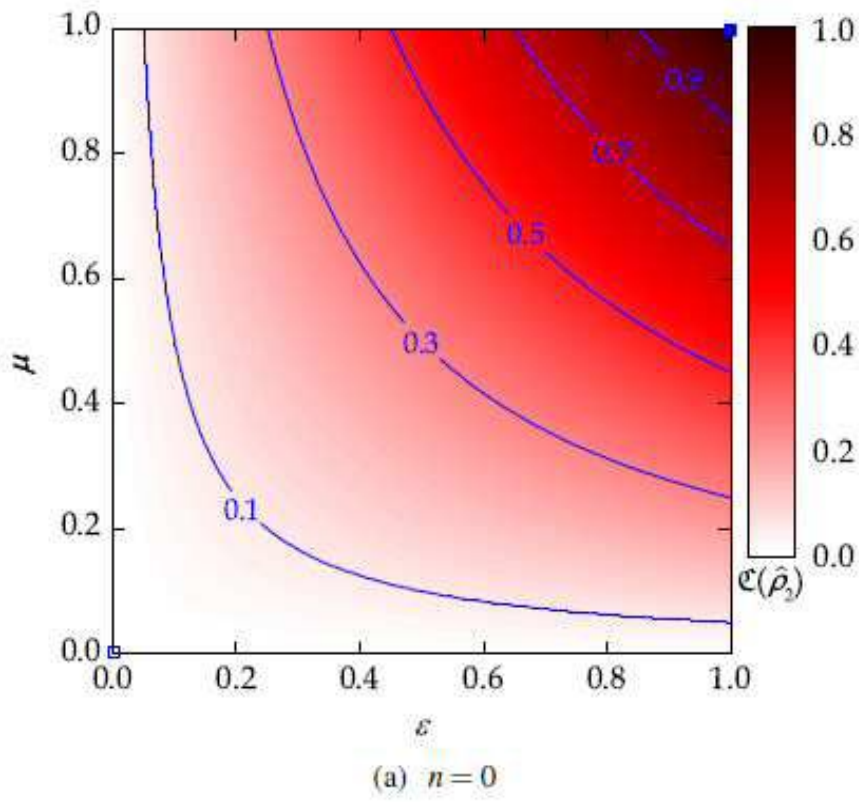
(a) $\mu = 0$

도면4b

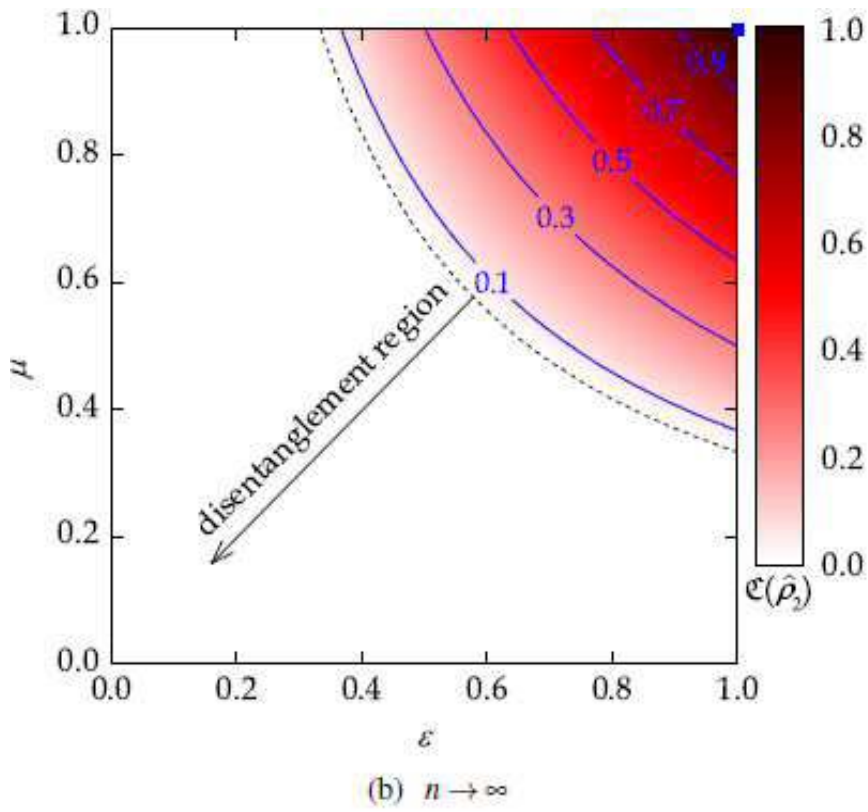


(b) $\mu = 0.7$

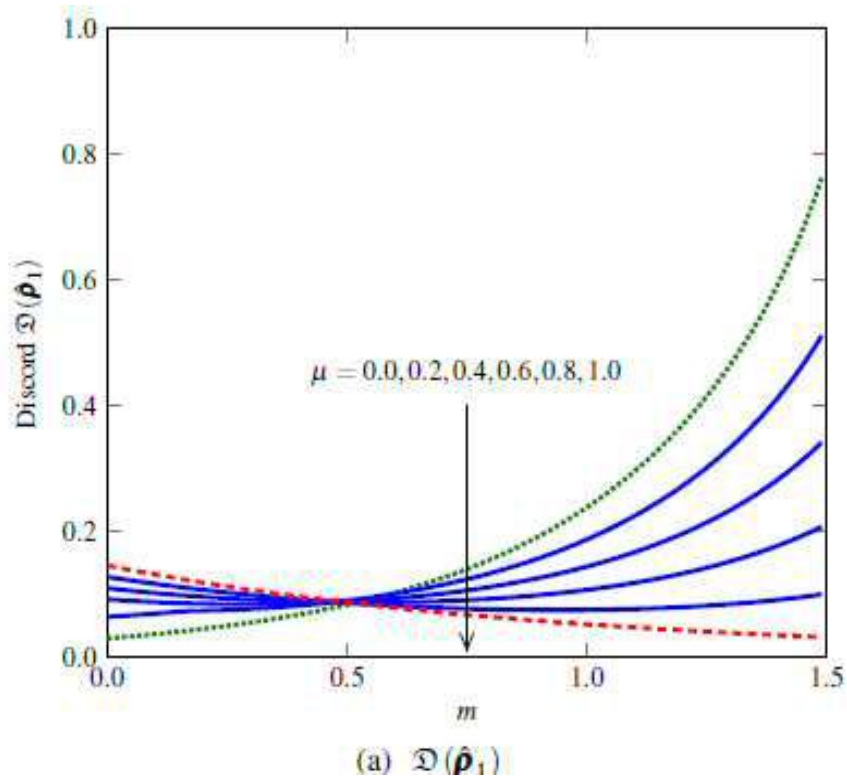
도면5a



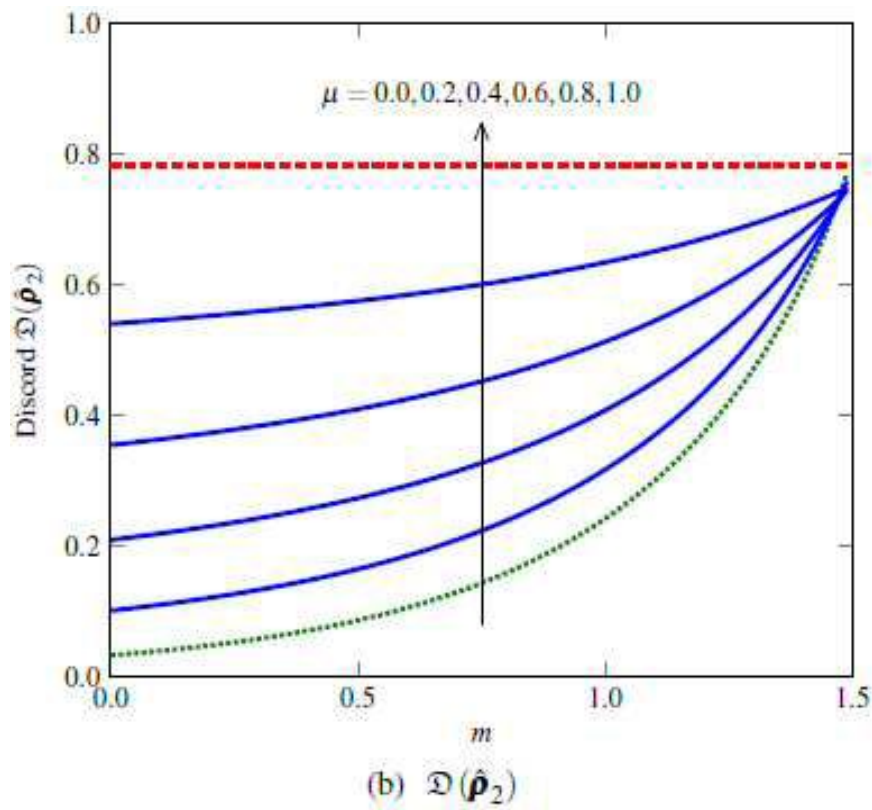
도면5b



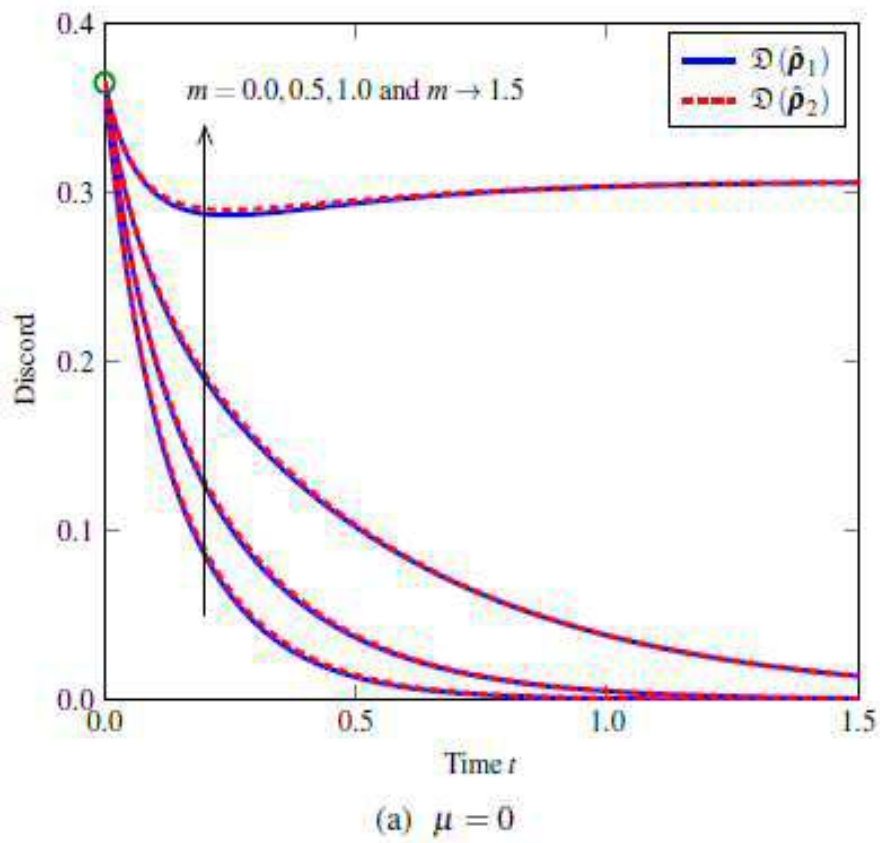
도면6a



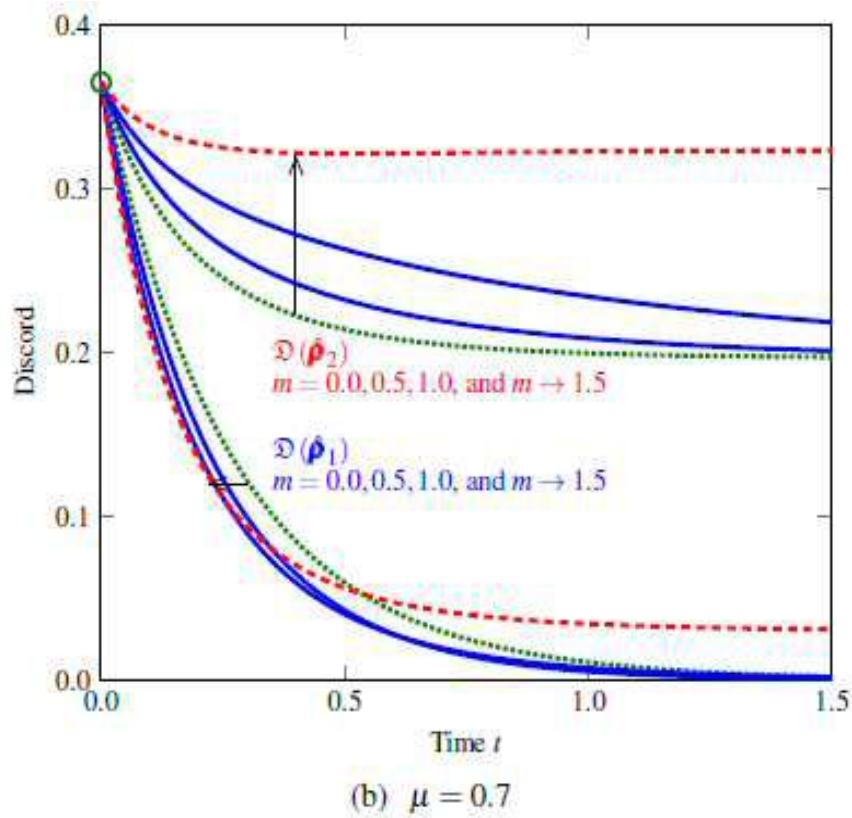
도면6b



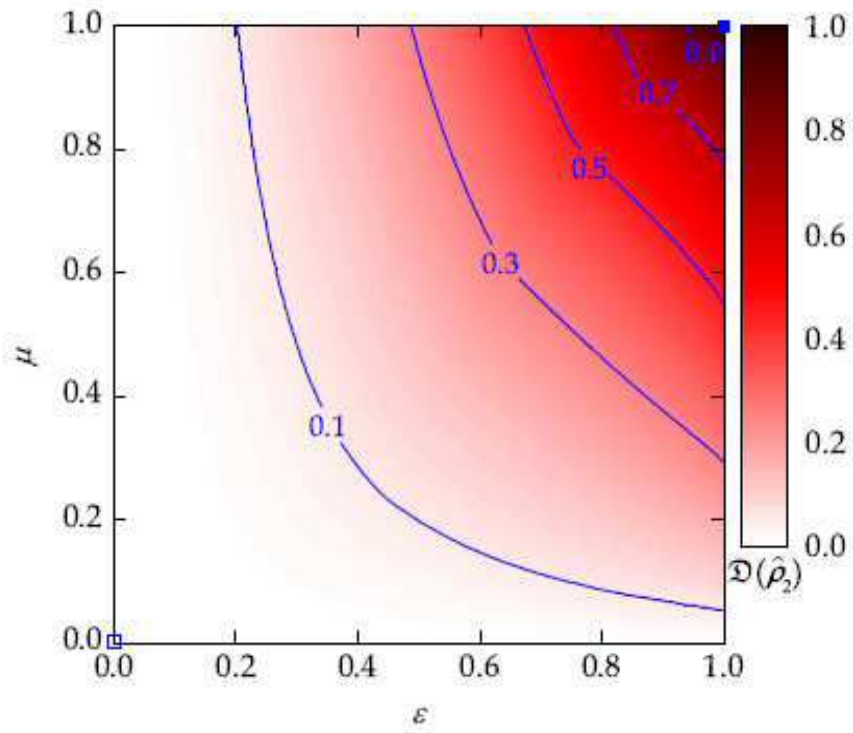
도면7a



도면7b

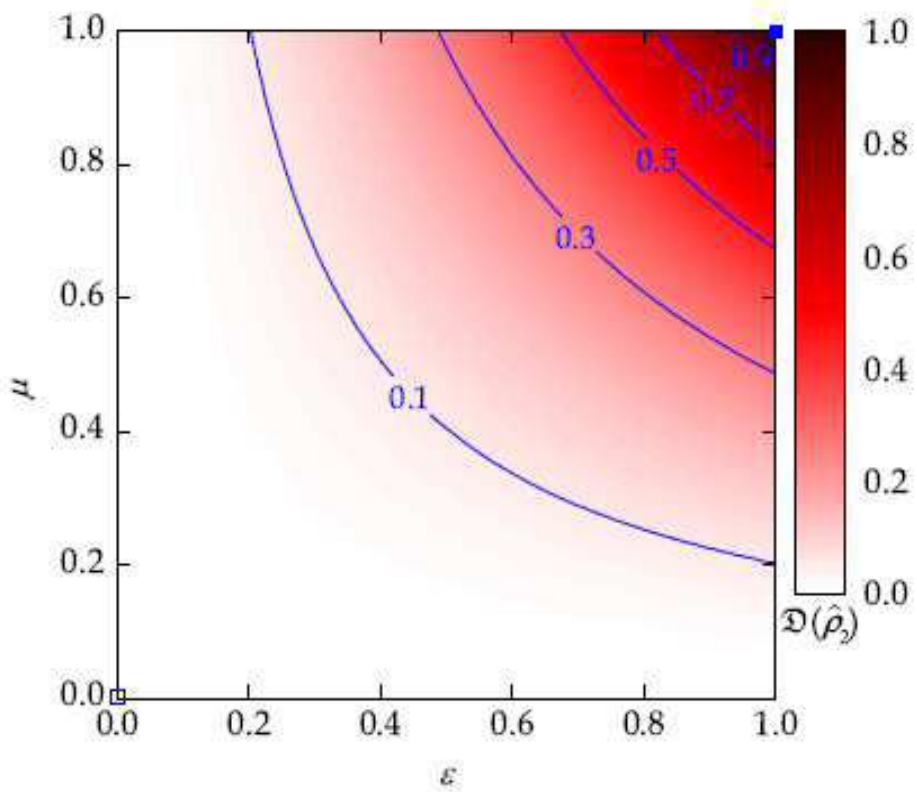


도면8a



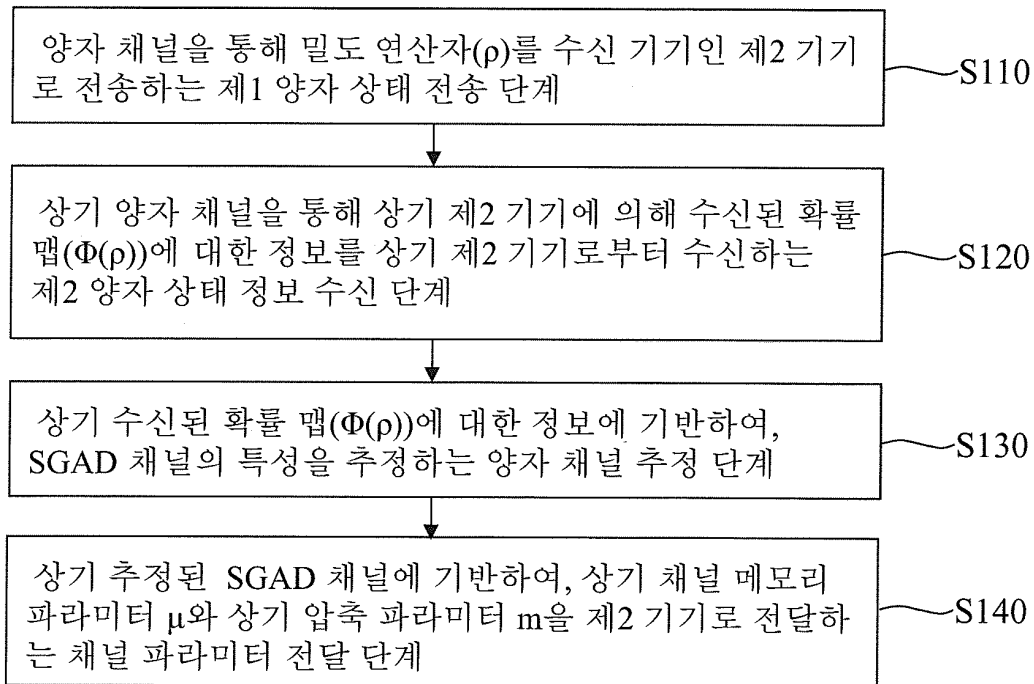
(a) $n=0$

도면8b



(b) $n \rightarrow \infty$

도면9



도면10

