(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년09월22일
(11) 등록번호 10-2158777
(24) 등록일자 2020년09월16일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04B 10/70 (2013.01)
(52) CPC특허분류
H04B 10/70 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0131411
(22) 출원일자 2019년10월22일
심사청구일자 2019년10월22일
(56) 선행기술조사문헌
Jeong San Kim, "Tsallis entropy and general polygamy of multi-party quantum entanglement in arbitrary dimensions," PHYSICAL REVIEW A 94, 062338 (2016)
Zhaonan Zhang et al., "Tighter monogamy and polygamy relations in multiqubit systems," Eur. Phys. J. D., 73: 13, (2019.1.15)
Guang-MingYuan et al., "Monogamy relation of multi-qubit systems for squared Tsallis-q entanglement," Scientific Rep., (2016.06.27)
Luo Yu et al., "Hierarchical Polygamy Inequality for Entanglement of Tsallis q-Entropy," Communications in Theoretical Physics, 69(5), p. 532 , (2018)

(73) 특허권자
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
신현동
경기도 수원시 영통구 청명로 132, 323동 501호(영통동, 벽산삼익아파트)
우르 레만 유나이드
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동)
아흐메드 파루크
경기도 수원시 영통구 청명남로60번길 24, B04호 (영통동)
(74) 대리인
특허법인도담

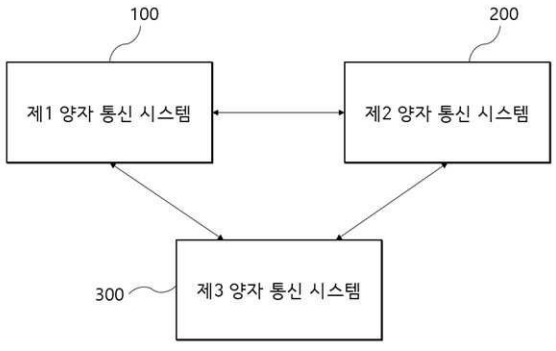
전체 청구항 수 : 총 8 항 심사관 : 신상길

(54) 발명의 명칭 **양자 얽힘 분배 방법 및 양자 통신 시스템**

(57) 요 약

본 기술은 양자 통신 및 양자 컴퓨팅에 관한 것으로, 본 기술에 따른 향상된 양자 얽힘 분배 방법은, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 통한 양자 얽힘 분배 방법에 있어서, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘과 양자 동시성 함수와의 관계를 연산하는 단계, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘을, 이분 얽힘에 대한 등식으로 연산하는 단계, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 하한 방정식을 기초로, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 획득하는 단계 및 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 이용하여 양자 얽힘 분배를 수행하는 단계를 포함하고, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘은 양자 얽힘이 수치화되어 표현된 측정 값이다.

대 표 도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2019R1A2C2007037
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공분야기초연구사업/중견연구자지원사업
연구과제명	양자네트워킹 핵심기술 연구
기 여 율	1/1
과제수행기관명	경희대학교 산학협력단
연구기간	2019.03.01 ~ 2024.02.28

공지예외적용 : 있음

명 세 서

청구범위

청구항 1

지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 통한 양자 얽힘 분배 방법에 있어서,

상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘과 양자 동시성 함수와의 관계를 연산하는 단계;

상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘을, 이분 얽힘에 대한 등식으로 연산하는 단계;

지원의 뜨살리스-q 얽힘의 하한 방정식을 기초로, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 획득하는 단계; 및

상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 이용하여 양자 얽힘 분배를 수행하는 단계를 포함하고,

상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘은 양자 얽힘이 수치화되어 표현된 측정 값인 양자 얽힘 분배 방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘은,

임의의 n-큐빗에 대하여, 임의의 한 큐빗이 손실되면 나머지 큐빗들은 새로운 얽힘을 형성하지 않고 완전히 분리된 채 존재하는 상태인 W클래스 상태의 다분 얽힘에 대한 수치화된 측정값인 양자 얽힘 분배 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식이 포화될 수 있는 포화 조건을 획득하는 단계; 및

상기 포화 조건에 기초하여 양자 얽힘 분배를 수행하는 단계를 더 포함하는 양자 얽힘 분배 방법.

청구항 4

제3항에 있어서, 상기 포화 조건은,

q가 2의 값을 가질 때인 양자 얽힘 분배 방법.

청구항 5

삭제

청구항 6

삭제

청구항 7

삭제

청구항 8

삭제

청구항 9

삭제

청구항 10

지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 통해 양자 얽힘 분배 방법을 제공하는 양자 통신 시스템에 있어서,

상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘과 양자 동시성 함수와의 관계를 연산하고, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘을, 이분 얽힘에 대한 등식으로 연산하고, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 하한 방정식을 기초로, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 획득하고, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 이용하여 양자 얽힘 분배를 수행하는 제어부; 및

상이한 양자 통신 수행부 간에 양자 정보 및 일반 정보를 송수신하는 송수신부를 포함하고,

상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘은 양자 얽힘이 수치화되어 표현된 측정 값인 양자 통신 시스템.

청구항 11

제10항에 있어서, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘은,

임의의 n-큐빗에 대하여, 임의의 한 큐빗이 손실되면 나머지 큐빗들은 새로운 얽힘을 형성하지 않고 완전히 분리된 채 존재하는 상태인 W클래스 상태의 다분 얽힘에 대한 수치화된 측정값인 양자 통신 시스템.

청구항 12

제10항에 있어서, 상기 제어부는,

상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식이 포화될 수 있는 포화 조건을 획득하고, 상기 포화 조건에 기초하여 양자 얽힘 분배를 수행하는 양자 통신 시스템.

청구항 13

제12항에 있어서, 상기 포화 조건은,

q가 2의 값을 가질 때인 양자 통신 시스템.

청구항 14

삭제

청구항 15

삭제

청구항 16

삭제

청구항 17

삭제

청구항 18

삭제

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 양자 통신 및 양자 컴퓨팅에 관한 것이다. 보다 구체적으로, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식과 관련하여 양자 얽힘 분배 방법을 제공하는 양자 통신 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

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

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

[0005] 양자 얽힘을 포함한 양자 시스템을 최초에 준비하는 것은 양자 정보 처리의 필수적인 요소이다. 그러나, 양자 시스템이 양자 얽힘을 포함하는지 판별하는 것은 매우 어려운 문제로 알려져 있다.

[0006] 양자 얽힘의 중요한 특징으로 모노가미 부등식(Monogamy inequality) 및 폴리가미 부등식(Polygamy inequality)이 있다. 모노가미, 폴리가미 부등식은 양자 시스템 사이에서 양자 얽힘(entanglement)이 공유되기 위해서는 일정한 제한이 있음을 암시한다.

[0007] 예를 들어, A, B, C의 3 양자 시스템에서, A와 B가 $|\Psi^-\rangle = (|01\rangle - |10\rangle)/\sqrt{2}$ 의 최대로 얽힌 상태인 경우, A는 C와 양자 얽힘을 형성할 수 없다. 이는, 양자 얽힘의 양과 AB 쌍, AC의 쌍 사이에 상충관계(trade-off)가 성립한다는 것을 암시한다.

[0008] 모노가미, 폴리가미 부등식은 양자 얽힘의 수치화된 조건을 제공한다. 구체적으로, 모노가미 부등식은 양자 얽힘을 형성할 수 있는 수치화된 조건의 하한값을, 폴리가미 부등식은 상한값을 제공할 수 있다.

[0009] 최근에는 모노가미, 폴리가미 부등식을 근사화하여의 양자 얽힘의 분배 방법을 제공하거나, 더 큰 하한을 가지는 모노가미 부등식 또는 더 작은 상한을 가지는 폴리가미 부등식을 통해 양자 얽힘을 분석하는 연구가 진행 중에 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 본 발명의 실시 예는, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식과 관련하여, 향상된 양자 얽힘 분배 방법을 제공한다.

과제의 해결 수단

[0013] 본 기술에 따른 향상된 양자 얽힘 분배 방법은, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 통한 양자 얽힘 분배 방법에 있어서, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘과 양자 동시성 함수와의 관계를 연산하는 단계, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘을, 이분 얽힘에 대한 등식으로 연산하는 단계, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 하한 방정식을 기초

로, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 획득하는 단계 및 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 이용하여 양자 얽힘 분배를 수행하는 단계를 포함하고, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘은 양자 얽힘이 수치화되어 표현된 측정 값이다.

[0014] 본 발명의 실시 예에 따른 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 통해 양자 얽힘 분배 방법을 제공하는 양자 통신 시스템은, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘과 양자 동시성 함수와의 관계를 연산하고, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘을, 이분 얽힘에 대한 등식으로 연산하고, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 하한 방정식을 기초로, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 획득하고, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 이용하여 양자 얽힘 분배를 수행하는 제어부 및 상이한 양자 통신 수행부 간에 양자 정보 및 일반 정보를 송수신하는 송수신부를 포함하고, 상기 지원의 뜨살리스-q 얽힘은 양자 얽힘이 수치화되어 표현된 측정 값이다.

발명의 효과

[0015] 본 기술에 따르면, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식과 관련하여, 향상된 양자 얽힘 분배 방법이 제공된다.

[0016] 또한, 본 기술에 따르면, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식이 포화될 수 있는 조건으로부터 향상된 양자 얽힘 분배 방법이 제공된다.

도면의 간단한 설명

[0017] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 양자 시스템을 설명하기 위한 도면이다.

도 2는 도 1의 양자 시스템의 상세 구성을 설명하기 위한 도면이다.

도 3은 도 1의 양자 시스템의 동작을 설명하기 위한 순서도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0018] 본 명세서 또는 출원에 개시되어 있는 본 발명의 개념에 따른 실시 예들에 대해서 특정한 구조적 내지 기능적 설명들은 단지 본 발명의 개념에 따른 실시 예를 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로, 본 발명의 개념에 따른 실시 예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본 별명의 개념에 따른 실시 예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본 명세서 또는 출원에 설명된 실시 예들에 한정되는 것으로 해석되어서는 아니 된다.

[0019] 본 발명의 개념에 따른 실시 예는 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있으므로 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 본 명세서 또는 출원에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명의 개념에 따른 실시 예를 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0020] 제1 및/또는 제2 등의 용어는 다양한 구성 요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성 요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하는 목적으로만, 예컨대 본 발명의 개념에 따른 권리 범위로부터 이탈되지 않은 채, 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소는 제1 구성요소로도 명명될 수 있다.

[0021] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다. 구성요소들 간의 관계를 설명하는 다른 표현들, 즉 "~사이에"와 "바로 ~사이에" 또는 "~에 이웃하는"과 "~에 직접 이웃하는" 등도 마찬가지로 해석되어야 한다.

[0022] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 서술된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0023] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이

속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 명세서에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0024] 실시 예를 설명함에 있어서 본 발명이 속하는 기술 분야에 익히 알려져 있고 본 발명과 직접적으로 관련이 없는 기술 내용에 대해서는 설명을 생략한다. 이는 불필요한 설명을 생략함으로써 본 발명의 요지를 흐리지 않고 더욱 명확히 전달하기 위함이다.

[0025] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시 예를 설명함으로써, 본 발명을 상세히 설명한다. 이하, 본 발명의 실시 예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.

[0026] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 양자 시스템을 설명하기 위한 도면이다.

[0027] 도 1을 참조하면, 본 발명의 실시 예에 따른 복수의 기기들 간에 양자 통신을 수행하는 양자 시스템을 도시한다. 복수의 기기들은 제1 양자 통신 시스템(100), 제2 양자 통신 시스템(200) 및 제3 양자 통신 시스템(300)을 포함할 수 있다. 다만, 실시 예에 따라 도시된 3개의 양자 통신 시스템보다 많거나 적은 수의 양자 통신 시스템이 포함될 수 있다.

[0028] 제1 양자 통신 시스템(100), 제2 양자 통신 시스템(200) 각각은 사용자 Alice와 Bob이 사용하는 양자 통신 시스템일 수 있다. 제3 양자 통신 시스템(300)은 사용자 Charlie가 사용하는 양자 통신 시스템일 수 있다.

[0029] Alice는 송신자로서 양자 채널(quantum channel)을 통해 양자 정보를, 고전 채널(Classical channel)을 통해 일반 정보를 Bob 및/또는 Charlie에게 전송할 수 있다. 이때, 제1 양자 통신 시스템(100)는 송신 기기로, 제2 양자 통신 시스템(200) 및/또는 제3 양자 통신 시스템(300)은 수신 기기로 동작하지만, 실시 예에 따라 그 역도 성립할 수 있다. 또한, 제1 양자 통신 시스템(100)이 송신 또는 수신 기기로 동작함에 따라, 제2 양자 통신 시스템(200) 및/또는 제3 양자 통신 시스템(300)은 이에 대응하여 수신 및/또는 송신 기기로 동작할 수 있다.

[0030] 제1 양자 통신 시스템(100), 제2 양자 통신 시스템(200) 및 제3 양자 통신 시스템(300)는 양자 암호 통신을 통해 암호화된 양자 정보 및 일반 정보를 교환할 수 있다. 이를 위해 양자 시스템은 사전에 양자 얽힘(quantum entanglement)를 준비할 수 있다.

[0031] 양자 얽힘은 양자 정보 처리의 재료(resource)일 수 있다. 양자 얽힘을 이용하여 양자 암호 통신이 가능하며, 양자 알고리즘의 실행이 가능하다. 따라서, 양자 얽힘을 포함한 양자 시스템을 처음에 준비하는 것은 양자 정보 처리의 필수적인 요소일 수 있다.

[0032] 양자 얽힘이란 두 부분계 사이에 존재할 수 있는 일련의 비고전적인 상관관계일 수 있다. 양자 얽힘은 두 부분계가 공간적으로 서로 멀리 떨어져 있어도 존재할 수 있다. 예를 들어, 두 입자를 일정한 양자 상태에 두어 두 입자의 스핀이 항상 반대가 되게 할 수 있다.(싱글렛 상태)

[0033] 양자 역학에 따르면, 두 입자 중 어느 하나의 입자를 측정하리 전까지는 두 입자의 상태를 알 수 없다. 하지만, 측정을 하면, 그 순간 한 계의 상태가 결정되고 이는 즉시 그 계와 얽혀 있는 다른 계의 상태까지 결정하게 된다. 이는 마치 정보가 순식간에 한 계에서 다른 계로 이동할 것처럼 보일 수 있다.

[0034] 양자 얽힘은 폴리가미 부등식(Polygamy inequality)으로 특징 지어질 수 있다. 폴리가미 부등식은 양자 얽힘에 대한 정보를 수식으로 표현한 것일 수 있다. 폴리가미 부등식을 통해, 다분 얽힘(Multipartite entanglement)에서 양자 얽힘이 형성될 수 있는 수치화된 조건을 확인할 수 있다.

[0035] 폴리가미 부등식은 양자 시스템 사이에서 양자 얽힘이 형성되기 위해서는 일정한 제한이 있음을 암시한다. 예를 들어, A, B, C의 3 양자 시스템에서, A와 B가 $|\Psi^-\rangle = (|01\rangle - |10\rangle)/\sqrt{2}$ 의 최대로 얽힌 상태인 경우, A는 C와 양자 얽힘을 형성할 수 없다. 이는, 양자 얽힘의 양과 AB 쌍, AC 쌍 사이에 상충관계(trade-off)가 성립하기 때문일 수 있다.

[0036] 또한, 양자 얽힘의 폴리가미 관계는 양자 암호화(quantum cryptography)에서 도청자가 획득한 비밀 키에 대한 정보를 추출하는 중요한 매체가 될 수도 있다. 도청자가 비밀 키를 획득함에 따라 얽힘 관계에 있는 다른 양자의 상태가 결정되고, 결정된 양자 상태를 폴리가미 관계식을 통해 확인함으로써 도청자의 존재를 판별할 수 있다.

[0037] 폴리가미 부등식은 지원의 얽힘(Entanglement of assistance)에 대한 식으로 표현될 수 있다. 지원의 얽힘은 다분 얽힘에서 얽힘 분포에 관한 정보를 포함할 수 있다.

[0038] 예를 들어, 삼분 순수 상태(tripartite pure states)에 대한 지원의 얽힘은 사용자 Alice, Bob, Charlie에 대해서, Charlie가 자신의 양자 통신 시스템을 측정하고 측정 결과를 전달함으로써 Alice와 Bob을 도울 때(지원할 때), Alice와 Bob 사이에 만들어질 수 있는 최대 얽힘의 엔트로피로 정의될 수 있다.

[0039] 삼분 순수 상태에 대한 지원의 얽힘은 단순히 Alice와 Bob의 이분 양자 상태에 대한 함수로 표현되지만, Alice, Bob 뿐만 아니라 Charlie의 얽힘 특성도 반영할 수 있다.

[0040] 본 발명에서는 지원의 뜨살리스-q 얽힘(Tsallis-q entanglement of assistance)이 사용될 수 있다. 지원의 뜨살리스-q 얽힘은 양자 얽힘이 수치화되어 표현된 측정 값일 수 있다. 지원의 뜨살리스-q 얽힘은 특정 양자 상태에 대한 폰 뉴어만 엔트로피(von Neumann entropy)로부터 획득될 수 있다. 실시 예에서, 지원의 뜨살리스-q 얽힘은 양자 얽힘을 판별하는 지표로 사용될 수 있고, 이분 양자 상태의 분리 가능한 범위를 지정하는 데에도 사용될 수 있다.

[0041] 특히, 일반적인 얽힘 엔트로피(Entropy of entanglement)와 비교하여, 지원의 뜨살리스-q 얽힘은 더 높은 차원의 시스템에 대한 양자 얽힘을 표현하는 유용한 측정 도구가 될 수 있다.

[0042] 다분 얽힘은 폴리가미 부등식에 의한 이분 얽힘(bipartite entangled)의 조합으로 기술될 수 있으므로 양자 얽힘을 이해하는데 중요한 지표가 될 수 있다. 본 발명에 따르면, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 관계(폴리가미 부등식)로부터 복수의 양자들이 현재 어떠한 얽힘 상태에 있는지 확인하고, 양자 얽힘을 공유할 수 있는 조건을 찾을 수 있을 뿐만 아니라, 요구되는 양자 통신 성능에 부합하는 양자 얽힘을 제공할 수 있다.

[0043] 도 2는 도 1의 양자 시스템의 상세 구성을 설명하기 위한 도면이다.

[0044] 도 2를 참조하면, 제1 양자 통신 수행부(100)는 제어부(110), 송수신부(120) 및 메모리(130)를 포함할 수 있다. 제2 양자 통신 수행부(200)는 제어부(210), 송수신부(220) 및 메모리(230)를 포함할 수 있다. 또한, 제3 양자 통신 수행부(300)는 제어부(310), 송수신부(320) 및 메모리(330)를 포함할 수 있다.

[0045] 도 1에서 설명된 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 관계로부터 양자 얽힘의 분배를 제공하는 방법은, 제1 양자 통신 시스템(100) 뿐만 아니라, 제2 양자 통신 시스템(200) 및/또는 제3 양자 통신 시스템(300)에서도 수행될 수 있다.

[0046] 이하, 도 2의 제1 양자 통신 시스템(100)의 상세 구성을 참조하여 본 발명의 실시 예에 따른 양자 얽힘의 분배 방법이 설명되지만, 이에 한정되지 않고, 제2 양자 통신 시스템(200) 및/또는 제3 양자 통신 시스템(300)의 각 구성에서 이러한 동작이 수행되는 것도 가능하다.

[0047] 제어부(110)는 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 관계를 획득하기 위한 연산을 수행할 수 있다. 구체적으로, 제어부(110)는 양자 동시성 함수(C)에 대한 q-함수(f_q)를 통해 뜨살리스-q 엔트로피를 연산할 수 있다.

[0048] 1) 뜨살리스-q 얽힘 및 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 정의

[0049] 임의의 양자 상태 ρ 에 대한 뜨살리스-q 얽힘은 아래의 수학식 1로 결정될 수 있다. 임의의 q는 $q > 0$ and $q \neq 1$ 의 조건을 만족하고, q가 1에 가까워질수록 뜨살리스-q 얽힘은 폰 뉴어만 엔트로피(von Neumann entropy)에 수렴할 수 있다.

수학식 1

[0050]
$$T_q(\rho) = \frac{1}{q-1}\left(1 - \mathrm{tr}\,\rho^q\right)$$

[0051] 다음으로, 순수 이분 상태(pure bipartite state)에 대한 뜨살리스-q 얽힘은 아래의 수학식 2로부터 결정될 수

있다. 양자 통신 시스템 A의 축소된 밀도 행렬(reduced density matrix, ρ_A)은 $\rho_A = \mathrm{tr}_B |\psi\rangle_{AB} \langle\psi|$ 일 수 있다.

수학식 2

[0052] $$T_q\left(|\psi\rangle_{A|B}\right) = T_q\left(\rho_A\right)$$

[0053] 혼합 이분 상태(mixed bipartite state)에 대한 뜨살리스-q 얽힘 및 지원의 뜨살리스-q 얽힘은 각각 수학식 3과 수학식 4로부터 결정될 수 있다. 혼합 상태 ρ_{AB} 의 모든 가능한 순수 상태 분해(decomposition)에 대해 최소화(minimization) 및 최대화(maximization)가 수행될 수 있다.

수학식 3

[0054] $$T_q\left(\rho_{A|B}\right) = \min \sum_i p_i T_q\left(|\psi_i\rangle_{AB}\right)$$

수학식 4

[0055] $$T_q^{\mathrm{a}}\left(\rho_{A|B}\right) = \max \sum_i p_i T_q\left(|\psi_i\rangle_{AB}\right)$$

[0056] 양자역학에서는 역학계의 상태가 한 개의 파동함수(Ψ)에 의해 완전히 기술될 수 있는데, 이 파동함수 하나에 의해 표시되어지는 상태를 순수 상태라고 정의할 수 있다. 하지만, 계의 상태에 관한 정보가 불완전할 때는 특정한 파동함수 한 개를 계에 적용시키는 것이 불가능할 수 있다.

[0057] 이때에는 적당한 기준에 따라 선정된 일련의 파동함수들($\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \cdots$)에 계가 존재할 확률($c_1, c_2, c_3, c_4, \cdots$)을 지정할 수 있는데 불과할 수 있다. 이러한 상태를 혼합 상태라고 정의할 수 있다. 혼합 상태를 통일적으로 다루기 위해서는 밀도 행렬을 사용하는 것이 유용할 수 있다. c_k 는 고유값, Ψ_k 는 고유함수일 수 있다.

[0058] 2) 뜨살리스-q 얽힘 및 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 연산

[0059] 뜨살리스-q 얽힘은 슈미츠 랭크 2의 임의의 혼합 상태에서, 아래 수학식 5로부터 연산될 수 있다. 이때, q-함수는 수학식 6으로 표현될 수 있다.

수학식 5

[0060] $$T_q\left(\rho_{A|B}\right) = f_q\left(C\left(\rho_{A|B}\right)\right)$$

수학식 6

[0061] $$f_q(x) = \frac{1}{q-1}\left[1 - \left(\frac{1+\sqrt{1-x^2}}{2}\right)^q - \left(\frac{1-\sqrt{1-x^2}}{2}\right)^q\right]$$

[0062] 양자 동시성 함수(C)와 관련하여, $C(\rho_{A|B}) = \max\{0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}$ 일 수 있다. λ_i 는 해밀토니안 행렬(Hermitian matrix) $\sqrt{\sqrt{\rho_{AB}}\tilde{\rho_{AB}}\sqrt{\rho_{AB}}}$ 의 고유값들을 내림차순으로 정렬한 값일 수 있다.

[0063] 다음으로, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 경우, 지원의 양자 동시성 함수에 대한 q-함수를 하한으로 가질 수 있다. (수학식 7) 수학식 7은 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 하한 방정식일 수 있다.

[0064] 전술한 바와 같이, 지원의 얽힘은 Charlie가 양자 통신 시스템을 측정하고 측정 결과를 전달함으로써 Alice와 Bob을 도울 때(지원할 때), Alice와 Bob 사이에 만들어질 수 있는 최대 얽힘의 엔트로피일 수 있다. 따라서, 지원의 뜨살리스-q 얽힘은 뜨살리스-q 얽힘에 대한 지원의 얽힘으로 이해될 수 있다.

수학식 7

[0065] $$T_q^{\mathrm{a}}(\rho_{A|B}) \geq f_q\left(C^{\mathrm{a}}(\rho_{A|B})\right)$$

[0066] 임의의 이분 양자 상태 ρ_{AB} 에 대한 지원의 양자 동시성 함수는 아래 수학식 8로 표현될 수 있다.

수학식 8

[0067] $$C^{\mathrm{a}}(\rho_{A|B}) = \max\sum_i p_i C(|\psi_i\rangle_{AB})$$

[0068] 3) 지원의 뜨살리스-q 얽힘에 대한 폴리가미 관계 연산

[0069] 제어부(110)는 획득한 뜨살리스-q 얽힘과 지원의 뜨살리스-q 얽힘을 통해 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 관계를 획득하고, 이를 기초로의 양자 얽힘 분배를 제공할 수 있다.

[0070] 구체적으로, 제어부(110)는 지원의 뜨살리스-q 얽힘과 양자 동시성 함수와의 관계를 연산하고, W클래스 상태의 다분 얽힘에 대한 지원의 뜨살리스-q 얽힘을, 이분 양자 상태에 대한 등식으로 연산할 수 있다.

[0071] $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{d-1}|a_{ij}|^2 = 1$ 를 만족하는 양자 통신 시스템의 직교 기저 $\{|j\rangle\}_{j=0}^{d-1}$ 에 대한, n-큐딧의 일반화된 W클래스 상태는 수학식 9와 같이 정의될 수 있다.

수학식 9

[0072] $$T_q^{\mathrm{a}}\left(|W_n^d\rangle_{A_1|A_2\cdots A_n}\right) \leq \sum_{i=2}^{n} T_q^{\mathrm{a}}(\rho_{A_1|A_i})$$

[0073] W클래스 상태는 임의의 한 큐빗이 손실되면, 나머지 큐빗들은 새로운 얽힘을 형성하지 않고 완전히 분리된 채 존재하는 상태일 수 있다. W클래스 상태는 임의의 두 큐빗에 대해서도 0이 아닌 양자 얽힘을 포함할 수 있다.

[0074] 세 개 큐빗들의 W클래스 상태는 수학식 10으로 표현될 수 있고, 임의의 개수의 큐빗들의 W클래스 상태는 수학식 11과 같은 일반화된 형태로 표현될 수 있다.

수학식 10

[0075] $$|W\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(|001\rangle + |010\rangle + |100\rangle)$$

수학식 11

[0076] $$|W\rangle = \frac{1}{\sqrt{n}}(|100...0\rangle + |010...0\rangle + \ldots + |00...01\rangle)$$

[0077] W클래스 상태의 임의의 n-큐빗의 축소된 밀도 행렬(reduced density matrix)은 수학식 12와 같다.

수학식 12

[0078] $$\begin{aligned}\rho_{A_1} &= \mathrm{tr}_{A_2\cdots A_n} |W_n^d\rangle_{A_1\cdots A_n} \langle W_n^d| \\ &= \sum_{i,j=1}^{d-1} a_{1i}a_{1j}^* |i\rangle_{A_1} \langle j| + \left(1 - \sum_{j=1}^{d-1} |a_{1j}|^2\right) |0\rangle_{A_1} \langle 0| .\end{aligned}$$

[0079] 축소된 밀도 행렬의 두 개의 고유값은, W클래스 상태 $|W_n^d\rangle_{A_1\cdots A_n}$ 가 양자 A_1 및 양자 $A_2, A_3, \cdots, A_n$ 로 구분되는 2의 슈미츠 랭크를 가질 수 있음을 암시한다. 또한, 앞서 검토한 바와 같이, 뜨살리스-q 얽힘은 슈미츠 랭크 2의 임의의 혼합 상태에서 상기 수학식 5로부터 연산될 수 있으므로, 이로부터 수학식 13을 도출할 수 있다.

수학식 13

[0080] $$\begin{aligned}T_q^{\mathrm{a}}\left(|W_n^d\rangle_{A_1|A_2\cdots A_n}\right) &= T_q\left(|W_n^d\rangle_{A_1|A_2\cdots A_n}\right) \\ &= f_q\left(C\left(|W_n^d\rangle_{A_1|A_2\cdots A_n}\right)\right) \\ &= f_q\left(\sqrt{\sum_{i=2}^{n}\left(C\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right)^2}\right)\end{aligned}$$

[0081] 수학식 4에서, q-함수는 $1 < q < 2$ and $3 < q < 4$ 의 조건 하에서 $f_q\left(\sqrt{x^2+y^2}\right) \leq f_q(x) + f_q(y)$ 의 관계를 만족하므로, 이로부터 수학식 14를 도출할 수 있다.

수학식 14

$$
\begin{aligned}
& f_q\left(\sqrt{\sum_{i=2}^{n}\left(C\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right)^2}\right) \\
& \leq f_q\left(C\left(\rho_{A_1|A_2}\right)\right)+f_q\left(\sqrt{\sum_{i=3}^{n}\left(C\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right)^2}\right) \\
& \leq \sum_{i=2}^{n} f_q\left(C\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right) \\
& =\sum_{i=2}^{n} f_q\left(C^{\mathrm{a}}\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right)
\end{aligned}
$$

[0082]

[0083] 지원의 뜨살리스-q 얽힘은, 지원의 양자 동시성 함수(concurrence of assistance)에 대한 q-함수를 하한으로 가지므로(수학식 7), 수학식 15를 도출할 수 있고, 최종적으로 W클래스 상태에 대한 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 관계(수학식 16)를 획득할 수 있다. 이때, 수학식 7은 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 하한 방정식일 수 있다.

수학식 15

$$
\begin{aligned}
& \sum_{i=2}^{n} f_q\left(C^{\mathrm{a}}\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right) \\
& \leq \sum_{i=2}^{n} T_q^{\mathrm{a}}\left(\rho_{A_1|A_i}\right)
\end{aligned}
$$

[0084]

수학식 16

$$
T_q^{\mathrm{a}}\left(|W_n^d\rangle_{A_1|A_2\cdots A_n}\right) \leq \sum_{i=2}^{n} T_q^{\mathrm{a}}\left(\rho_{A_1|A_i}\right)
$$

[0085]

[0086] 수학식 16을 참조하면, 저가산성(subadditivity) 조건에 관계없이 폴리가미 부등식을 만족시키는 것을 알 수 있다. 일반적으로, 더 높은 차원의 양자 통신 시스템에 대한 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 만족시키기 위해서는 저가산성 조건을 만족해야 할 수 있다.

[0087] 저가산성은 두 요인이 함께 작용한 효과의 크기가 각 요인의 효과의 단순 합보다 작은 성질로, 수학식 17로 표현될 수 있다.

수학식 17

$$
f(x+y) \leq f(x)+f(y).
$$

[0088]

[0089] 본 발명의 실시 예에 따르면, 특정 양자 얽힘에 대해, 저가산성 조건에 관계없이 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴라가미 관계를 획득함으로써, 저가산성 조건을 만족하는 양자 상태에 대해서만 폴라가미 관계를 통해 양자 얽힘을 분석할 수 있는 한계를 극복할 수 있다.

[0090] 또한, 본 발명에서는, 전술한 바와 같이 $A_2, A_3, \cdots, A_n$ 를 단일 양자로 취급하여, A_1 와 $A_2, A_3, \cdots, A_n$ 의 이분 양자 얽힘에 대한 문제로 다루었다. 따라서, 본 발명의 실시 예는 이분 얽힘의 측정 값으로 다분 얽힘의 양자 분포를 분석할 수 있는 이점이 있다.

[0091] 4) 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식이 포화되기 위한 조건

[0092] 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식에서, q가 2의 값을 가질 때, 수학식 4는 아래 수학식 18과 같이 연산될 수 있다.

수학식 18

[0093]
$$
\begin{aligned}
T_2^{\mathrm{a}}\left(\rho_{A|B}\right) &= \max \sum_i p_i \left(1-\operatorname{tr}\rho_A^2\right) \\
&\overset{(a)}{=} \frac{\max \sum_i p_i C^2\left(|\psi_i\rangle_{AB}\right)}{2} \\
&\overset{(b)}{=} \frac{\sum_i p_i C^2\left(|\psi_i\rangle_{AB}\right)}{2} \\
&= \frac{\left(C^{\mathrm{a}}\left(\rho_{AB}\right)\right)^2}{2},
\end{aligned}
$$

[0094] 수학식 18에서, 과정(a)는 $C\left(|\psi_i\rangle_{A|B}\right) = \sqrt{2\left(1-\operatorname{tr}\rho_A^2\right)}$ 로부터, 과정(b)는 n-큐딧 W클래스 상태에 대한 이분 양자 얽힘 조합의 양자 동시성 함수의 제곱은, 순수 상태의 선택에 독립적이라는 명제로부터 도출될 수 있다.

[0095] 상기 수학식 18로부터, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식은 q가 2의 값을 가질 때 포화됨을 알 수 있다. 폴리가미 부등식의 포화 상태는 양자 얽힘의 분포의 보다 명확한 특성을 제공할 수 있다.

[0096] 본 발명의 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 관계(폴리가미 부등식) 및 포화될 수 있는 조건으로부터, 복수의 양자들이 현재 어떠한 얽힘 상태에 있는지 확인할 수 있고, 양자 얽힘을 공유할 수 있는의 조건을 찾을 수 있으며, 요구되는 양자 통신 성능에 부합하는 양자 얽힘을 제공할 수 있다.

[0097] 송수신부(120, 220, 320)은 양자 채널(quantum channel)을 이용하는 양자 송수신부 일 수 있다. 또한, 송수신부(120, 220, 320)는 고전 채널(classical channel)을 이용하는 일반 송수신부를 포함할 수 있다.

[0098] 메모리(130, 230, 330)는 양자 정보를 저장하는 양자 메모리일 수 있다. 또한, 메모리(130, 230, 330)는 일반 정보를 저장하는 일반 메모리를 포함할 수 있다.

[0099] 도 3은 도 1의 양자 시스템의 동작을 설명하기 위한 순서도이다.

[0100] 도 3을 참조하면, S301 단계에서 지원의 뜨살리스-q 엔트로피와 양자 동시성 함수와의 관계를 연산할 수 있다. 구체적으로, 전술한 수학식 5로부터 지원의 뜨살리스-q 얽힘을 양자 동시성 함수로 표현할 수 있다.(수학식 19)

수학식 19

$$T_q^a\left(|W_n^d\rangle_{A_1|A_2\cdots A_n}\right)=T_q\left(|W_n^d\rangle_{A_1|A_2\cdots A_n}\right)$$
$$=f_q\left(C\left(|W_n^d\rangle_{A_1|A_2\cdots A_n}\right)\right)$$

[0101]

[0102] S302 단계에서, W클래스 상태의 다분 양자 상태에 대한 지원의 뜨살리스-q 얽힘을, 이분 양자 상태에 대한 등식으로 연산할 수 있다.

[0103] W클래스 상태의 임의의 n-큐빗의 축소된 밀도 행렬(reduced density matrix)은 수학식 20과 같다.

수학식 20

$$\rho_{A_1}=\mathrm{tr}_{A_2\cdots A_n}|W_n^d\rangle_{A_1\cdots A_n}\langle W_n^d|$$
$$=\sum_{i,j=1}^{d-1}a_{1i}a_{1j}^*|i\rangle_{A_1}\langle j|+\left(1-\sum_{j=1}^{d-1}|a_{1j}|^2\right)|0\rangle_{A_1}\langle 0|.$$

[0104]

[0105] 축소된 밀도 행렬의 두 개의 고유값으로부터 W클래스 상태 $|W_n^d\rangle_{A_1\cdots A_n}$ 가 A_1 및 $A_2,A_3,\cdots,A_n$ 로 구분되는 2의 슈미츠 랭크를 가질 수 있다고 판단될 수 한다. 또한, 앞서 검토한 바와 같이, 뜨살리스-q 얽힘은 슈미츠 랭크 2의 임의의 혼합 상태에서 상기 수학식 5로부터 연산될 수 있으므로, 이로부터 수학식 21을 도출할 수 있다.

수학식 21

$$f_q\left(C\left(|W_n^d\rangle_{A_1|A_2\cdots A_n}\right)\right)$$
$$=f_q\left(\sqrt{\sum_{i=2}^{n}\left(C\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right)^2}\right)$$

[0106]

[0107] 본 발명에서는, 전술한 바와 같이 $A_2,A_3,\cdots,A_n$ 를 단일 양자로 간주하여, A_1 와 $A_2,A_3,\cdots,A_n$ 의 이분 얽힘에 대한 문제로 다루었다. 따라서, 본 발명의 실시 예에 따르면, 이분 얽힘의 측정 값으로 다분 얽힘의 양자를 분석할 수 있는 이점이 있다.

[0108] 수학식 4에서, q-함수는 $1<q<2$ and $3<q<4$ 의 조건 하에서 $f_q\left(\sqrt{x^2+y^2}\right)\le f_q(x)+f_q(y)$ 의 관계를 만족하므로, 수학식 22가 성립할 수 있다.

수학식 22

$$
\begin{aligned}
& f_q\left(\sqrt{\sum_{i=2}^{n}\left(C\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right)^2}\right) \\
& \leq f_q\left(C\left(\rho_{A_1|A_2}\right)\right)+f_q\left(\sqrt{\sum_{i=3}^{n}\left(C\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right)^2}\right) \\
& \leq \sum_{i=2}^{n} f_q\left(C\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right) \\
& =\sum_{i=2}^{n} f_q\left(C^{\mathrm{a}}\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right)
\end{aligned}
$$

[0109]

[0110] 이후, S303 단계에서, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 하한 방정식을 기초로, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 획득할 수 있다.

[0111] 지원의 뜨살리스-q 얽힘은, 지원의 양자 동시성 함수(concurrence of assistance)에 대한 q-함수를 하한으로 가지므로(수학식 7), 수학식 23을 도출할 수 있고, 최종적으로 W클래스 상태에 대한 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식(수학식 24)을 획득할 수 있다. 수학식 7은 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 하한 방정식일 수 있다.

수학식 23

$$
\begin{aligned}
& \sum_{i=2}^{n} f_q\left(C^{\mathrm{a}}\left(\rho_{A_1|A_i}\right)\right) \\
& \leq \sum_{i=2}^{n} T_q^{\mathrm{a}}\left(\rho_{A_1|A_i}\right)
\end{aligned}
$$

[0112]

수학식 24

$$
T_q^{\mathrm{a}}\left(\left|W_n^d\right\rangle_{A_1|A_2 \cdots A_n}\right) \leq \sum_{i=2}^{n} T_q^{\mathrm{a}}\left(\rho_{A_1|A_i}\right)
$$

[0113]

[0114] S304 단계에서, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 이용하여의 양자 얽힘 분배를 수행할 수 있다.

[0115] 구체적으로, 본 발명의 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식으로부터, 복수의 양자들이 현재 어떠한 얽힘 상태에 있는지 확인할 수 있고, 양자 얽힘을 공유할 수 있는의 조건을 찾을 수 있으며, 요구되는 양자 통신 성능에 부합하는의 양자 얽힘을 제공할 수 있다.

[0116] 또한, 본 발명의 실시 예에 따른 양자 분배 방법은, 저가산성 조건에 관계없이 폴리가미 부등식을 획득할 수 있다. 일반적으로, 더 높은 차원의 양자 통신 시스템에 대한 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 만족시키기 위해서는 저가산성 조건을 만족해야 할 수 있다.

[0117] 저가산성은 두 요인이 함께 작용한 효과의 크기가 각 요인의 효과의 단순 합보다 작은 성질일 수 있다.

[0118] 본 발명의 실시 예에 따르면, 특정 양자 얽힘에 대해, 저가산성 조건에 관계없이 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴

라가미 관계를 획득함으로써, 저가산성 조건을 만족하는 양자 상태에 대해서만 폴라가미 관계를 통해 양자 얽힘을 분석할 수 있는 한계를 극복할 수 있다.

[0119] 또한, 본 발명에서는, 전술한 바와 같이 $A_2, A_3, \cdots, A_n$ 를 단일 양자로 취급하여, A_1 와 $A_2, A_3, \cdots, A_n$ 의 이분 양자 얽힘에 대한 문제로 다루었다. 따라서, 본 발명의 실시 예는 이분 얽힘의 측정 값으로 다분 얽힘의 양자 분포를 분석할 수 있는 이점이 있다.

[0120] 도면에는 도시되지 않았지만, 본 발명의 실시 예는 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식이 포화되는 조건을 획득할 수 있다. 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식에서, q가 2의 값을 가질 때, 수학식 4는 아래 수학식 25와 같이 표현될 수 있다.

수학식 25

[0121]
$$
\begin{aligned}
T_2^{\mathrm{a}}\left(\rho_{A|B}\right) &= \max \sum_i p_i \left(1-\operatorname{tr}\rho_A^2\right) \\
&\overset{(a)}{=} \frac{\max \sum_i p_i C^2\left(|\psi_i\rangle_{AB}\right)}{2} \\
&\overset{(b)}{=} \frac{\sum_i p_i C^2\left(|\psi_i\rangle_{AB}\right)}{2} \\
&= \frac{\left(C^{\mathrm{a}}\left(\rho_{AB}\right)\right)^2}{2},
\end{aligned}
$$

[0122] 상기 수학식 25로부터, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식은 q가 2의 값을 가질 때 포화됨을 알 수 있다. 폴리가미 부등식의 포화 상태는 양자 얽힘의 분포의 보다 명확한 특성을 제공할 수 있다.

[0123] 본 발명의 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 관계(폴리가미 부등식) 및 포화될 수 있는 조건으로부터, 복수의 양자들이 현재 어떠한 얽힘 상태에 있는지 확인할 수 있고, 양자 얽힘을 공유할 수 있는의 조건을 찾을 수 있으며, 요구되는 양자 통신 성능에 부합하는의 양자 얽힘을 제공할 수 있다.

[0124] 소프트웨어적인 구현에 의하면, 본 명세서에서 설명되는 절차 및 기능 뿐만 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.

[0125] 본 명세서와 도면에 게시된 본 발명의 실시 예들은 본 발명의 기술 내용을 쉽게 설명하고 본 발명의 이해를 돕기 위해 특정 예를 제시한 것뿐이며, 본 발명의 범위를 한정하고자 하는 것은 아니다. 여기에 게시된 실시 예들 이외에도 본 발명의 기술적 사상에 바탕을 둔 다른 변형 예들이 실시 가능하다는 것은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 자명한 것이다.

부호의 설명

[0127] 100: 제1 양자 통신 시스템

200: 제2 양자 통신 시스템

300: 제3 양자 통신 시스템

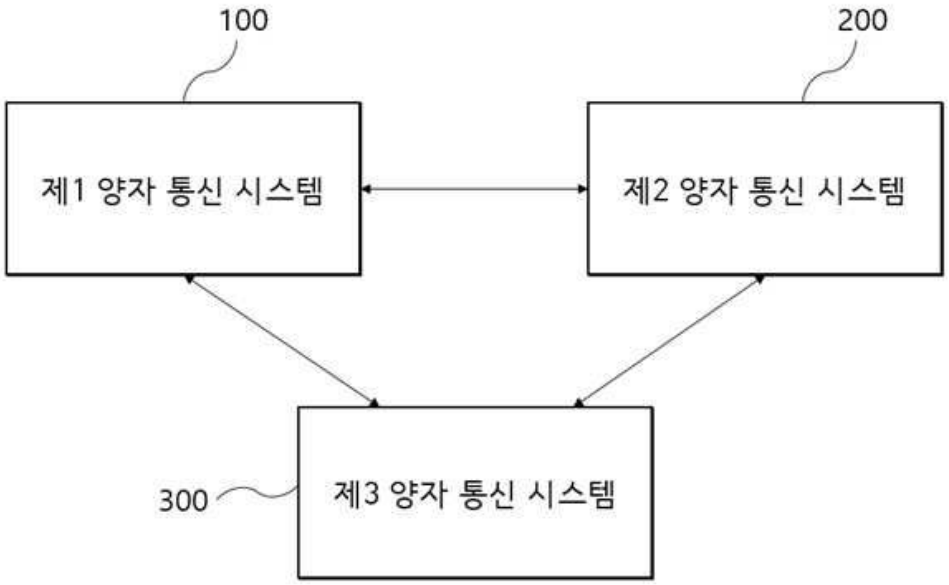
110, 210, 310: 제어부

120, 220, 320: 송수신부

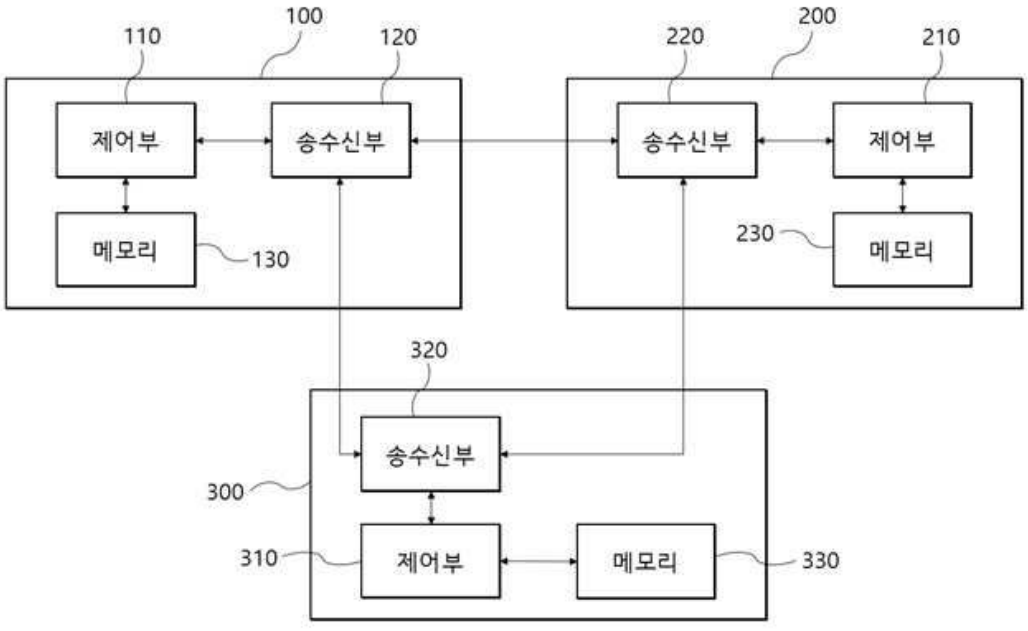
130, 230, 330: 메모리

도면

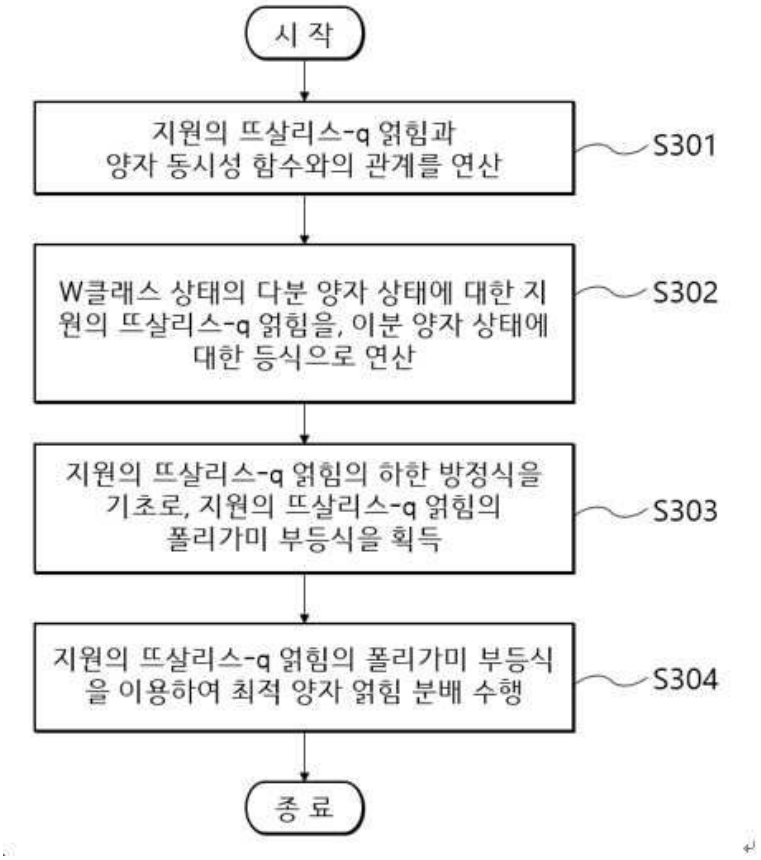
도면1


100
200
제1 양자 통신 시스템
제2 양자 통신 시스템
300
제3 양자 통신 시스템

도면2


110
100
120
220
200
210
제어부
송수신부
송수신부
제어부
메모리
130
230
메모리
320
송수신부
300
310
제어부
메모리
330

도면3


시 작
지원의 뜨살리스-q 얽힘과 양자 동시성 함수와의 관계를 연산
S301
W클래스 상태의 다분 양자 상태에 대한 지원의 뜨살리스-q 얽힘을, 이분 양자 상태에 대한 등식으로 연산
S302
지원의 뜨살리스-q 얽힘의 하한 방정식을 기초로, 지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 획득
S303
지원의 뜨살리스-q 얽힘의 폴리가미 부등식을 이용하여 최적 양자 얽힘 분배 수행
S304
종 료