(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2016년08월30일
(11) 등록번호 10-1652634
(24) 등록일자 2016년08월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04B 14/00 (2006.01) *B82B 1/00* (2006.01)
H04B 13/00 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H04B 14/002 (2013.01)
B82B 1/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-0050852
(22) 출원일자 2015년04월10일
심사청구일자 2015년04월10일
(56) 선행기술조사문헌
KR100863266 B1
JP2014154923 A
JP2008068347 A
JP2007296609 A

(73) 특허권자
인하대학교 산학협력단
인천광역시 남구 인하로 100, 인하대학교 (용현동)
(72) 발명자
곽경섭
인천광역시 연수구 해돋이로84번길 10 (송도동, 송도풍림아이원6단지아파트)
(74) 대리인
양성보

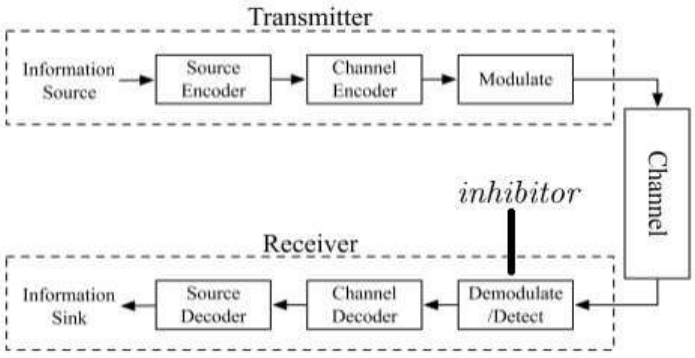
전체 청구항 수 : 총 6 항 심사관 : 강철수

(54) 발명의 명칭 **나노 네트워크에서 분자 통신을 위한 억제제 기반 변조 방법 및 장치**

(57) 요 약

나노 네크워크의 확산형 분자통신에서 억제제 기반 강인한 변조 방법 및 장치 방법 및 장치가 제시된다. 본 발명에서 제안하는 확산 기반 분자 통신을 위한 변조 장치는 심볼간 간섭을 일으키는 정보 분자들을 선택적으로 억제하기 위한 억제 분자를 방출하는 전송기 나노기기, 상기 억제 분자를 수신하여 정보 분자들의 ISI 원인 잔류 분자들을 선택적으로 억제하는 수신기 나노기기를 포함할 수 있다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
H04B 13/005 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711010987
부처명 미래창조과학부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 중견연구자지원
연구과제명 보안이 보장된 에너지 효율적인 인체센서네트워크 핵심기술연구 및 시스템 설계
기 여 율 1/1
주관기관 인하대학교 산학협력단
연구기간 2014.05.01 ~ 2015.04.30
공지예외적용 : 있음

명 세 서

청구범위

청구항 1

확산 기반 분자 통신을 위한 변조 장치에 있어서,

심볼간 간섭을 일으키는 정보 분자들을 선택적으로 억제하기 위한 억제 분자를 방출하는 전송기 나노기기; 및

상기 억제 분자를 수신하여 정보 분자들의 ISI 원인 잔류 분자들을 선택적으로 억제하는 수신기 나노기기

를 포함하는 확산 기반 분자 통신을 위한 변조 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

주어진 슬롯 기간에서, 정보 심볼들을 인코딩하기 위한 메신저 분자인 제1 형태의 정보 분자들은 심볼간 간섭을 일으키는 정보 분자들을 선택적으로 억제하기 위한 잔류 메신저 분자인 제2 형태의 정보 분자들을 따라 방출될 수 있는 것을 특징으로 하는 확산 기반 분자 통신을 위한 변조 장치.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 ISI 원인 잔류 분자인 늦은 도착(late-arriving) 잔류 메신저 분자들(residual messenger molecules)은 상기 억제 분자들로서 작용되는 것을 특징으로 하는 확산 기반 분자 통신을 위한 변조 장치.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 정보 분자들 및 억제 분자들을 선택하는 동안, 확산 계수가 정보 분자들 보다 높은 억제 분자들을 선택하는 것을 특징으로 하는 확산 기반 분자 통신을 위한 변조 장치.

청구항 5

확산 기반 분자 통신을 위한 변조 방법에 있어서,

전송기 나노기기를 통해 심볼간 간섭을 일으키는 정보 분자들을 선택적으로 억제하기 위한 억제 분자를 방출하는 단계; 및

수신기 나노기기를 통해 상기 억제 분자를 수신하여 정보 분자들의 ISI 원인 잔류 분자들을 선택적으로 억제하는 단계

를 포함하는 확산 기반 분자 통신을 위한 변조 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 전송기 나노기기를 통해 심볼간 간섭을 일으키는 정보 분자들을 선택적으로 억제하기 위한 억제 분자를 방출하는 단계는,

상기 정보 분자들 및 억제 분자들을 선택하는 동안, 확산 계수가 정보 분자들 보다 높은 억제 분자들을 선택하는 것을 특징으로 하는 확산 기반 분자 통신을 위한 변조 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 억제제 기반 농도변이 분자 변조 방식을 이용한 확산 기반 분자 통신을 위한 변조 방법 및 장치에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 분자 통신은 바이오-나노기기(bio-nanomachine)들의(예를 들어, 인공 세포, 유전자 조작 세포) 행동을 조율하는, 새롭게 출현하고 있는 패러다임이다. 이 분야는 전자기파(electromagnatic wave) 대신 생물학적 분자를 정보 운반체(carrier)로 이용하기 때문에 전통적 통신 시스템과는 크게 차이가 있다. 이는 미생물 사이의 통신과 같이 생물학적 통신 메커니즘을 모방한다. 기존 통신에 비하여 분자를 이용한 통신의 장점은 크기(size), 생체 적합성, 생체 안정성 등 이다.

[0003] 최근에는 바이오의약, 의료, 군사, 환경 분야에서 응용 사례들이 출현하기 시작하였고, 바이오 의약 분야의 약물 전달 시스템(drug delivery system), 바이오 하이브리드 임플란트(bio-hybrid implants), 의학용 랩온어칩 시스템(lab-on-a-chip systems) 등이 가장 유망하다. 최근에는 나노 기술의 새로운 연구 분야로서 나노 통신 네트워크(Nano Communication Networks)가 출현하였다. 이 통신 네트워크는 여러 가지 방법으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 나노 통신 네트워크는 전통적인 RF(radio frequency) 통신 시스템을 채택할 수 있고, 이는 RF의 설계 장벽을 극복해야 할 것이다. 미세거리(예를 들어, 세포내 혹은 세포간) 통신에 특히 유리한 분자 확산 기법을 그 활용 대안으로 제안하고 있으며 보편화까지는 아직 초기 상태이며, 통신 방식 자체가 근본적으로 다르기 때문에 집중적인 연구가 필요하다.

[0004] 특히, 인체의 세포 간 또는 세포 내 영역에서 작용하는 치료용 나노기기들로 구성된 네트워크, 즉 나노기반 인체네트워크(Nano-based body area nanonetworks, N-BAN)는 정교한 나노 의약 응용에 한층 더 기술발전을 가속화 시키고 있다. 치료용 나노기기들은 정보를 공유하고, 계산 및 논리 연산을 수행하여 복합적 질병의 치료를 위해 의사결정을 내리게 한다. 그러므로 이러한 응용에 있어서 가장 어려운 과제는 나노 규모의 통신 패러다임을 통해 나노기반 인체 네트워크(N-BAN)를 어떻게 구현하느냐 하는 것이다.

[0005] 나노 네트워크에서 나노통신은 분자자체를 정보 전송 캐리어로서 사용하는 새로운 통신 페러다임이다. 나노 분자통신에서의 변조 방법은 분자농도 크기에 의한 변조, 분자 형태에 따른 변조 등이 있다. 특히, 분자의 형태에 따른 변조 방식은 변조 차원이 증가함에 따라 분자의 량이 선형적으로 증가하게 되어 송수신 장치 또한 비례하여 복잡하게 된다.

[0006] 이러한 통신 패러다임을 위해, CSK(Concentration Shift Keying)이 고유의 단순성과 실용성 때문에 정보 심볼들을 변조하기 위한 가장 유망한 기술 중 하나로서 고려된다. 하지만, 변조된 다음의 정보 심볼들은 각각의 변조된 심볼들의 분자들이 상기 수신기 나노기기에 도달하는 시간의 랜덤한 시간의 양 때문에 서로 간섭할 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 심볼간 간섭을 일으키는 분자들을 선별적으로 억제하기 위하여 억제제(Inhibitor) 분자를 주입시켜 간섭분자를 소멸시키기 위한 방법 및 장치를 제공하는데 있다.

과제의 해결 수단

[0008] 일 측면에 있어서, 본 발명에서 제안하는 나노 네크워크의 확산형 분자통신에서 억제제 기반 강인한 변조 장치는 심볼간 간섭을 일으키는 정보 분자들을 선택적으로 억제하기 위한 억제 분자를 방출하는 전송기 나노기기, 상기 억제 분자를 수신하여 정보 분자들의 ISI 원인 잔류 분자들을 선택적으로 억제하는 수신기 나노기기를 포함할 수 있다.

[0009] 주어진 슬롯 기간에서, 상기 정보 분자들의 제1 형태는 제2 형태 메신저 억제 분자들을 따라 방출될 수 있다.

[0010] 상기 ISI 원인 잔류 분자인 늦은 도착(late-arriving) 잔류 메신저 분자들(residual messenger molecules)은 상기 억제 분자들로서 작용한다.

[0011] 상기 정보 분자들 및 억제 분자들을 선택하는 동안, 확산 계수가 정보 분자들 보다 높은 억제 분자들을 선택할 수 있다.

[0012] 또 다른 일 측면에 있어서, 본 발명에서 제안하는 나노 네크워크의 확산형 분자통신에서 억제제 기반 강인한 변

조 방법은 전송기 나노기기를 통해 심볼간 간섭을 일으키는 정보 분자들을 선택적으로 억제하기 위한 억제 분자를 방출하는 단계, 수신기 나노기기를 통해 상기 억제 분자를 수신하여 정보 분자들의 ISI 원인 잔류 분자들을 선택적으로 억제하는 단계를 포함할 수 있다.

[0013] 상기 전송기 나노기기를 통해 심볼간 간섭을 일으키는 정보 분자들을 선택적으로 억제하기 위한 억제 분자를 방출하는 단계는 상기 정보 분자들 및 억제 분자들을 선택하는 동안, 확산 계수가 정보 분자들 보다 높은 억제 분자들을 선택할 수 있다.

발명의 효과

[0014] 본 발명의 실시예들에 따르면 억제제 기반 농도변이 분자 변조방식을 이용한다. 심볼간 간섭을 일으키는 분자들을 선별적으로 억제하기 위하여 억제제(Inhibitor) 분자를 주입시켜 간섭분자를 소멸시킬 수 있다. 수학적 분석에 의하여 전송용량의 증대와, 심볼 오류 감소 효과를 확인할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0015] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 억제제 기반 분자 농도변위 변조 장치를 나타내는 도면이다.

도 2은 본 발명의 일 실시예에 따른 전송기 나노기기에 의해 전송된 이진 심볼들 및 상기 수신기 나노기기에 의해 수신된 이진 심볼들 사이의 상호 정보를 나타내는 그래프이다.

도 3는 본 발명의 일 실시예에 따른 수신기 나노기기의 심볼 에러 기능을 나타내는 그래프이다.

도 4는 본 발명의 또 다른 일 실시예에 따른 수신기 나노기기의 심볼 에러 기능을 나타내는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0016] 나노 네트워크들을 통한 확산 기반 분자 통신은 정보 캐리어로서 분자를 사용함으로써 나노기기의 통신을 가능하게 하는 새로운 통신 패러다임이다. 이러한 통신 패러다임을 위해, CSK(Concentration Shift Keying)이 고유의 단순성과 실용성 때문에 정보 심볼들을 변조하기 위한 가장 유망한 기술 중 하나로서 고려된다. 하지만, 변조된 다음의 정보 심볼들은 각각의 변조된 심볼들의 분자들이 상기 수신기 나노기기에 도달하는 시간의 랜덤한 시간의 양 때문에 서로 간섭할 수 있다. CSK와 관련된 ISI(Inter Symbol Interference) 문제를 완화하기 위해, 새로운 변조 기법을 제안하고 Zebra-CSK 라고 한다. 상기 제안된 Zebra-CSK는 변조된 CSK 분자 신호에서 ISI 원인 분자들을 선택적으로 억제하기 위해 억제 분자들(inhibitor molecules)을 추가한다. 새로운 발전된 확률적 분석 모델 Zebra-CSK 로부터 수치결과는 분자 채널의 용량을 증가시킬 뿐만 아니라, 상기 수신기 나노기기에서 관찰되는 심볼 에러 확률을 감소시킨다. 이하, 본 발명의 실시 예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.

[0017] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 억제제 기반 분자 농도변위 변조 장치를 나타내는 도면이다.

[0018] 억제제 기반 분자 농도변위 변조 장치는 전송기(Transmitter) 나노기기 및 수신기(Receiver) 나노기기를 포함한다.

[0019] 전송기(Transmitter) 나노기기는 정보 소스(Information Source) 다시 말해, 정보를 분자를 입력 받아 소스 인코더(Source Encoder)를 통해 상기 입력 받은 소스를 인코딩한다. 그리고, 채널 인코더(Channel Encoder)를 거쳐 변조(modulate)를 수행한다. 상기 수신기(Receiver) 나노기기는 상기 변조된 정보 분자를 채널을 통해 입력받는다. 상기 수신기(Receiver) 나노기기는 복조/검출(Demodulate/Detect)를 수행하고, 채널 디코더(Channel Encoder)를 거쳐 소스 디코더(Source Decoder)를 통해 정보 싱크(Information Sink)를 방출한다. 아래에서 더욱 상세히 설명한다.

[0020] 본 발명은 전송기 및 수신기 나노기기의 쌍으로 구성된 분자 통신 시스템을 고려한다. 상기 전송기 나노기기는 무한의 싱글-차원의 고정 유체 환경(unbounded single-dimensional stationary fluidic environment)의 원점(origin)에 고정되고, 반면에 수신기 나노기기는 상기 전송기 나노기기로부터 d 거리만큼 떨어져있다. 게다가, 상기 분자 통신 시스템은 T_s 의 슬롯 기간을 갖는 타임-슬롯이고, 상기 전송기 및 수신기 나노기기들은 완전히 동기화 되어있다. 상기 전송기 나노기기에서, 제안된 2진 Zebra-CSK 변조는 이용된다: n의 임펄스 분자들(형태 a 또는 형태 b 중 하나)은 이진 심볼 1에 대하여 상기 슬롯의 시작에서 방출되는 반면, 이진 심볼 0에 대해서는

분자들을 방출하지 않는다.

[0021] 상기 인코딩된 정보 심볼들은 분자 확산을 통해 상기 수신기 나노기기로 전 달될 수 있다. 분자가 상기 수신 나노기기에 도착하면, 이것은 상기 통신 매체로부터 제거될 수 있다. 모든 분자들은 동일(homogeneous)하고, 공동 확산 계수 D를 갖는 다른 분자들에 대하여 독립적으로 확산하고, 상기 확산계수는 Stoke-Einstein relation1을 이용하여 계산될 수 있다. 다시 말해, $D = \frac{K_B T}{6\pi\eta r}$ 이고, 여기에서 K_B 는 볼츠만 상수(Boltzmann constant) (K_B = 1.38 x 10^{-23}), T는 절대 온도(temperature), η상기 유체 매체(fluidic medium)의 점도(viscosity), r은 상기 분자의 공동 반경을 나타낸다. 상기 수신기 나노기기는 각 타임 슬롯의 끝에서 분자들 형태를 미분(dirrerentiating)없이 상기 수신된 분자들의 전체 수를 카운트하고, 상기 전송된 이진 심볼을 결정하기 위해 아래의 결정 룰을 적용한다: $N \gtrless_0^1 \lambda$, 여기에서 N은 확률 변수(random variable)이고, 이것은 상기 수신된 분자들의 전체 수를 나타내고, λ는 미리 결정된 임계값을 나타낸다.

[0022] 제안된 Zebra-CSK의 설계는 생물학적 억제2 현상(biological inhibition2 phenomenon)으로부터 얻어졌고, 이것은 생물들(living organisms)의 다른 인터-셀룰러 통신 경로들(inter-cellular communication pathway)에서 존재한다. 이러한 일예는 신경 근육 인터-셀룰러 통신(neuromuscular inter-cellular communication) 동안 아세틸 콜린 에스테라제(AChE: acetylcholinesterase)에 의한 신호 분자 아세틸 콜린(Ach: Acetylcholine)의 억제이다. Ach는 상기 신경 세포(nerve cell)로부터 방출되고, 이것은 인접 셀(neighboring cells)로 빠르게 확산되고, 도달하는 대로 반응(response)을 자극한다. 상기 Ach 분자들의 주된 임무는 신호를 신경 세포로부터 근육 세포(nerve cells)로 운반하는 것이다. 메시지가 전달되면, Ach 분자들은 Ache에 의해 억제(inhibited)(가수분해(hydrolyzed))되고, 그러므로 사용되지 않는(obsolete) Ach 분자들의 혼란의 혼합으로부터 이상 신호들(later signals)을 방지할 수 있다.

[0023] Zebra-CSK: 분자들의 아래의 두 가지 클래스가 제안된 Zebra-CSK에서 사용된다. (i) 정보 심볼들을 인코딩하기 위한 메신저 분자들, 및 (ii) 억제하는 잔류 메신저 분자들(residual messenger molecules)을 이전 정보 심볼로부터 억제하기 위한 억제 분자들 Zebra-CSK에서, 이름에서 알 수 있듯이, 이후 정보 심볼들에서 메신저 분자들의 형태는 형태 a 메신저 분자들에서 형태 b 메신저 분자들로 변경되거나, 또는 그 반대로 변경될 수 있고, 반면에 상기 정보 인코딩 메커니즘은 종래의 CSK와 유사할 수 있다. 게다가, 메신저 분자들의 각 형태는 상기 다른 형태의 억제 분자들을 동반할 수 있다. 한편, 형태 a 분자들은 상기 형태 b 억제 분자들을 동반할 수 있고, 형태 b 분자들은 상기 형태 a 억제 분자들을 동반할 수 있다. 그러므로, 주어진 슬롯 기간에서, 메신저 분자들의 하나의 형태는 다른 형태 메신저 억제 분자들을 따라 방출될 수 있고, 상기 이전 심볼(다른 형태의)로부터 상기 늦은 도착(late-arriving) 잔류 메신저 분자들(residual messenger molecules)은 상기 억제 분자들로서 작용될 수 있다. 결과적으로, ISI는 감소된다. 이후 분석을 위해, 정보 분자들 및 억제 분자들 확산을 독립적으로 확산 제어 반응하는 억제 반응을 가정한다. 억제 분자들 및 메신저 분자들이 충돌할 때 마다, 그것들은 수신기에서 인식할 수 있는 다른 분자를 생산하고 반응할 수 있다.

[0024] Zebra-CSK의 제한: Zebra-CSK는 싱글-차수 메모리를 갖는 확산 기반 분자 채널을 고려하기 위해 설계된다. 다시 말해, 잔류 메신저 분자들은 상기 이전 심볼로부터 온다. 상기 채널은 미리 조정되고, 더 높은 메모리-차수를 갖는 것으로 알려져 있고, 이것은 정보 심볼들의 상기 전송을 위해 Zebra- CSK을 적용하기 이전에 충분히 긴 T_s(채널 메모리 차수를 1로 감소시키기에 충분한 팩터로서)를 갖도록 추천된다. 또한, 정보 분자들 및 억제 분자들을 선택하는 동안, 확산 계수가 정보 분자들 보다 비교적 매우 높은 억제 분자들을 선택하는 것을 필요로 한다. 상기 더 높은 확산 계수는 그러므로 미반응된 억제 분자들(unreacted inhibitor molecules)이 방출된 곳에서 상기 슬롯의 끝까지 상기 매체로부터 완전히 확산하도록 촉진할 수 있다.

[0025] 최신 기술과의 비교: 종래기술의 Noel 등은 ISI를 완화하기 위해 채널에 보조 화합물(secondary compound)을 적용하기 위한 최근 제안된 기술이다. 종래기술의 Wang 등은 위 기술과는 독립적으로, 채널에서 정보 분자들의 요구된 농도 및 보조 화합물에서 유래되었다. 하지만, ISI를 감소시키기 위한 방법 및 그것들의 설계는 명백히 다르다. Zebra-CSK에서 정보 분자들의 교류 형태의 유용한 배치 및 억제 분자들은 ISI 원인 잔류 분자들을 선택적으로 억제하는 것을 허용하고, 상기 이전 심볼에서 상기 ISI 원인 잔류 분자들 또는 현재 심볼에 속하는 여기에서 유요한 정보 분자들이 된다.

[0026] 메신저 분자들의 임펄스는 상기 전송기 나노기기로부터 방출된 메신저 분자들의 임펄스는 확산을 통해 상기 유

기 매체에서 퍼져나가고, 상기 메신저 분자들의 랜덤 모션(random motion)은 브라운 운동(Brownian motion)으로서 나타낼 수 있다. 1-D 브라운 운동의 분석에서 잘 발전된 문헌에 따라, 수신기 나노기기(상기 문헌에서 브라운 입자(Brownian particle)의 흡수 시간을 따르는)에 도달하기 위한 메신저 분자의 상기 타임의 확률 밀도 함수(probability density function)는 수학식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

[0027] $$f(t) = \begin{cases} 0, & t = 0 \\ \frac{d}{\sqrt{4\pi D t^3}} \cdot \exp(-\frac{d^2}{4Dt}), & t > 0. \end{cases}$$ 수학식(1)

[0028] 수학식(1)을 활용하여, 분자들이 상기 수신기 나노기기에 T_s의 현재 슬롯 내에 도착하는 확률은 수학식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

[0029] $$p_c = \int_0^{T_s} f(t)dt.$$ 수학식(2)

[0030] 상기 슬롯의 시작에서 전송기 나노기기에 의해 방출되어 상기 슬롯 끝 전에 수신기 나노기기에 도착한 n 분자들을 사이의 k 번째 분자를 나타내는 이진 랜덤 변수를 위한 Z_k 를 정의하고, 다시 말해, 상기 분자가 T_s 내에 도착하면 Z_k = 1 이고 그렇지 않으면 Z_k = 0 이다. 그러므로 Z_k 를 고려하여 수학식(3)을 얻을 수 있다.

[0031] $$P(N_c = m) = P(Z_1 + Z_2 + Z_3 + \cdots + Z_n = m),$$ 수학식(3)

[0032] 여기에서, N_c는 상기 수신기 나노기기에서 T_s 이내에 수신된 분자들의 전체 수를 나타내는 랜덤 변수이다. 상기 전송된 분자들 n 의 수는 수학식(3)으로부터 주어지고, 이것은 N_c 가 이항분포(binomial distribution)를 따르는 것을 알 수 있다. 다시 말해, $N_c \sim \text{Binomial}(n, p_c)$ 이다. 큰 n에 대하여, N_c 는 수학식(4)와 같은 평균 및 분산을 갖는 가우시안 분포로 근사 될 수 있다.

[0033] $$N_c \sim \mathcal{N}\left(np_c, np_c(1-p_c)\right)$$ 수학식(4)

[0034] N_c 의 분산은 상기 이전 심볼로부터 늦게 도착하는 메신저 분자들은 고려하지 않는다. N_{cp} 를 이전 슬롯들에서 방출된 n 분자들 사이의 상기 수신기 나노기기들에서 수신된 메신저 분자들의 전체 수를 나타내는 랜덤 변수라고 하자. N_{cp}는 또한 분명히 N_c와 같이 이항 분포를 따르고 수학식(5)와 같이 근사될 수 있다.

[0035] $$N_{cp} \sim \mathcal{N}\left(np_{cp}, np_{cp}(1-p_{cp})\right),$$ 수학식(5)

[0036] 여기에서,

[0037] $$p_{cp} = p_c + (1-\beta)\int_{T_s}^{2T_s} f(t)dt$$ 수학식(6)

[0038] 여기에서 상기 억제 분자들의 억제 효율은 β로 주어진다. 확산 제어 반응에 대하여, β는 전체 잔류 정보 분자들에 대한 억제 및 잔류 정보 분자들 사이의 충돌 인스턴스(collision instances)의 비율에 해당한다. 수학식(4) 및 수학식(5)에 기반하여 상기 랜덤 값의 분산은 상기 메신저 분자들의 수를 나타내고, 이것은 심볼 간의 간섭을 야기할 수 있고, N_p 로 나타낼 수 있다. 그러므로 수학식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

[0039] $$\begin{aligned} N_p &\sim \mathcal{N}\Big(np_{cp}, np_{cp}(1-p_{cp})\Big) - \mathcal{N}\Big(np_c, np_c(1-p_c)\Big) \\ &\sim \mathcal{N}\Big(n(p_{cp}-p_c), np_{cp}(1-p_{cp}) + np_c(1-p_c)\Big). \end{aligned}$$ 수학식(7)

[0040] 수학식(4) 및 수학식(7)에서 N_c 및 N_p 의 분산을 활용하여, 상기 채널 용량을 계산하고, 상기 제안된 변조 기법을 위한 수신기 나노기기의 심볼 에러 성능을 유도할 수 있다. 정보 심볼의 시리얼 전송을 고려하고, 여기에서 이진 심볼 1 및 0은 각각 q 및 1-q 와 동일한 이전 확률(priori probabilities)로 발생한다. 이러한 시리얼 전송에서, 상기 수신기 나노기기에서 전송된 심볼의 정확한 검출의 확률(0은 0이 전송될 때 수신되고, 1은 1이 전송될 때 수신될 확률)은 하나의 이전 전송된 심볼로부터의 간섭에 대하여 조절되고, 수학식(8) 및 수학식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

[0041] $$\begin{aligned} P(0,0) &= (1-q)\cdot 1\cdot(1-q) + (1-q)P(N_p < \lambda)q \\ &= (1-q)^2 + q(1-q)\Big[1 - Q(A_1)\Big], \text{ and} \end{aligned}$$ 수학식(8)

[0042] $$\begin{aligned} P(1,1) &= qP(N_c \geq \lambda)(1-q) + qP(N_c + N_p \geq \lambda)q \\ &= q(1-q)Q(A_2) + q^2Q(A_3), \end{aligned}$$ 수학식(9)

[0043] 여기에서 $Q(\cdot)$ 는 상기 가우시안 확률 분포 함수의 꼬리 확률(tail probability)을 나타내고, $A_1 = \frac{\lambda - n(p_{cp}-p_c)}{[np_{cp}(1-p_{cp}) + np_c(1-p_c)]^{1/2}}$, $A_2 = \frac{\lambda - np_c}{[np_c(1-p_c)]^{1/2}}$ 및 $A_3 = \frac{\lambda - np_{cp}}{[np_{cp}(1-p_{cp}) + 2np_c(1-p_c)]^{1/2}}$ 이다.

[0044] 한편, 상기 수신기 나노기기에서 전송된 심볼의 잘못된 검출의 확률(0이 전송될 때 1이 수신되고, 1이 전송될 때 0이 수신될 확률)은 하나의 이전 전송된 심볼로부터의 간섭에 대하여 조절되고, 수학식(10) 및 수학식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

[0045] $$\begin{aligned} P(0,1) &= (1-q)\cdot 0\cdot(1-q) + (1-q)P(N_p \geq \lambda)q \\ &= q(1-q)Q(A_1), \text{ and} \end{aligned}$$ 수학식(10)

[0046] $$\begin{aligned} P(1,0) &= qP(N_c < \lambda)(1-q) + qP(N_c + N_p < \lambda)q \\ &= q(1-q)\Big[1-Q(A_2)\Big] + q^2\Big[1-Q(A_3)\Big]. \end{aligned}$$ 수학식(11)

[0047] 심볼이 상기 수신기 나노기기에서 잘못 디코딩될 전체 확률은 P_e 로 나타낼 수 있고, 이것은 P(0, 1) 및 P(1, 0)의 합니다. 다음으로 고려된 분자 통신 시스템의 용량 C를 결정할 수 있다. 다시 말해, 상기 전송기 나노기기 및 상기 수신기 나노기기 사이의 전송의 최대 비율을 결정할 수 있다. 이것은 상기 세미널 새넌의 공식(seminal Shannon's formula)을 활용하여 계산할 수 있고, 이것은 상기 전송된 심볼 S 및 수신된 심볼 R 사이의 최대 상호 정보 I(S;R)로서 상기 용량을 정의할 수 있고, 수학식(12)과 같이 나타낸다.

[0048] $$C = \max_{\lambda} I(S;R),$$ 수학식(12)

[0049] 여기에서

[0050] $$I(S;R) = \sum_{S\in\{0,1\}} \sum_{R\in\{0,1\}} P(S,R)\log_2 \frac{P(S,R)}{P(S)P(R)}.$$ 수학식(13)

[0051] 이고, P(S, R)은 수학식(8) 내지 수학식(11)을 이용하여 계산될 수 있고, 한계 확률(marginal probabilities) P(S) 및 P(R)은 $P(S) = \sum_{R\in\{0,1\}} P(S,R)$ 및 $P(R) = \sum_{S\in\{0,1\}} P(S,R)$을 이용하여 얻을 수 있다.

[0052] 도 2은 본 발명의 일 실시예에 따른 전송기 나노기기에 의해 전송된 이진 심볼들 및 상기 수신기 나노기기에 의해 수신된 이진 심볼들 사이의 상호 정보를 나타내는 그래프이다.

[0053] 다시 말해, 상기 Zebra-CSK 변조된 전송기 나노기기에 의해 전송된 이진 심볼들 및 상기 수신기 나노기기에 의해 수신된 이진 심볼들 사이의 상호 정보를 나타내는 그래프이다. 3가지의 경우(다시 말해, β= 1, β= 0.5, 및 β= 0)의 억제 분자들의 억제 효율에 대하여 나타내었고, 상호 정보는 최대값에 도달할 때까지 증가하고, 상기 최대값에 도달하면, 다시 감소하기 시작한다.

[0054] 도 3는 본 발명의 일 실시예에 따른 수신기 나노기기의 심볼 에러 기능을 나타내는 그래프이다.

[0055] 다시 말해, 도 3은 Zebra-CSK 변조 이진 심볼들의 복조 동안 수신기 나노기기의 심볼 에러 성능을 나타내는 그래프이다. 상기 Zebra-CSK의 심볼 에러 확률은 CSK에 대한 상기 최적 검출 임계값 보다 작은 대부분의 검출 가능한 임계값에 대하여 상기 종래 CSK의 에러 확률보다 상당히 낮다.

[0056] 도 4는 본 발명의 또 다른 일 실시예에 따른 수신기 나노기기의 심볼 에러 기능을 나타내는 그래프이다.

[0057] 다시 말해, 도 4는 상기 전송기 나노기기로부터 다양한 거리에 위치한 상기 수신기 나노기기의 심볼 에러 성능을 나타낸다. 주어진 검출 임계값에 대하여, 상기 심볼 에러 확률은 상기 전송기 및 수신기 나노기기 사이의 거리가 증가할수록 증가한다.

[0058] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는 하드웨어 구성요소 및 소프트웨어 구성요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPA(field programmable array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(processing element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 콘트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(parallel processor)와 같은, 다른 처리 구성(processing configuration)도 가능하다.

[0059] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(computer program), 코드(code), 명령(instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성요소(component), 물리적 장치, 가상 장치(virtual equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치, 또는 전송되는 신호 파(signal wave)에 영구적으로, 또는 일시적으로 구체화(embody)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

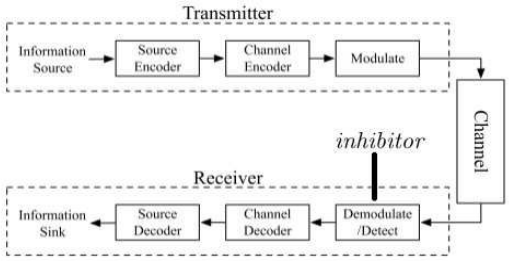
[0060] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다. 상기된 하드웨어 장치는 실시예의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

[0061] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

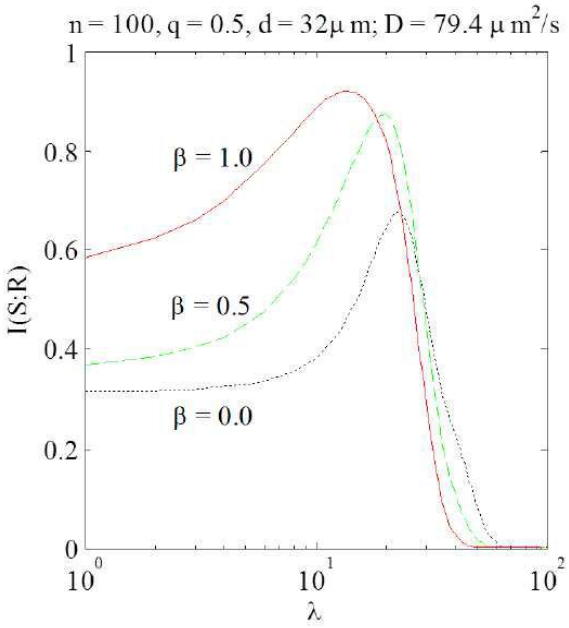
[0062] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

도면

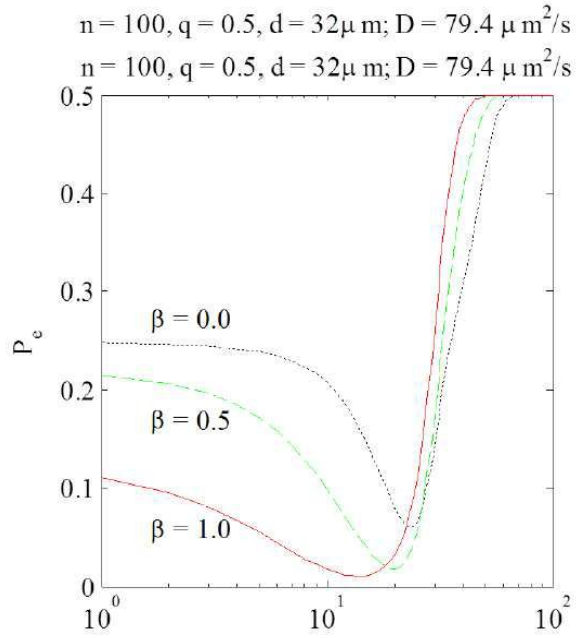
도면1


Transmitter
Information Source
Source Encoder
Channel Encoder
Modulate
Channel
inhibitor
Receiver
Information Sink
Source Decoder
Channel Decoder
Demodulate /Detect

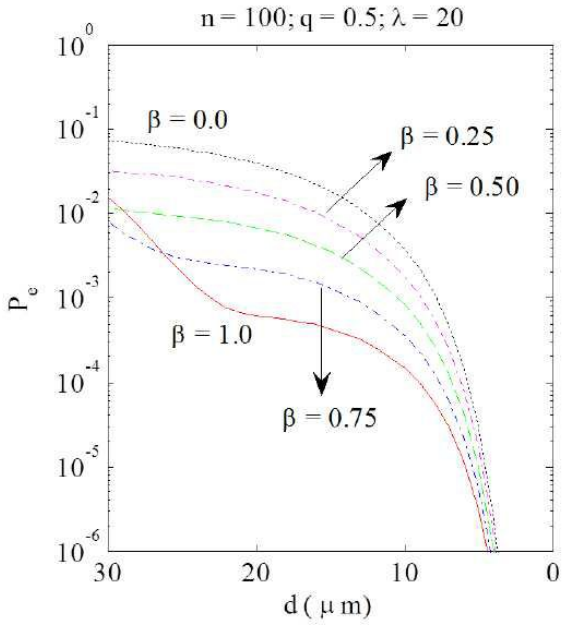
도면2


n = 100, q = 0.5, d = 32μ m; D = 79.4 μ m²/s
β = 1.0
β = 0.5
β = 0.0
I(S:R)
λ

도면3


n = 100, q = 0.5, d = 32μ m; D = 79.4 μ m²/s
n = 100, q = 0.5, d = 32μ m; D = 79.4 μ m²/s
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
P_e
β = 0.0
β = 0.5
β = 1.0
10^0
10^1
10^2

도면4


n = 100; q = 0.5; λ = 20
10^0
10^-1
10^-2
10^-3
10^-4
10^-5
10^-6
P_e
β = 0.0
β = 0.25
β = 0.50
β = 1.0
β = 0.75
30
20
10
0
d (μ m)