(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2011-0139350
(43) 공개일자 2011년12월29일

(51) Int. Cl.
H04B 10/10 (2006.01) *H01L 33/00* (2010.01)
(21) 출원번호 10-2010-0059373
(22) 출원일자 2010년06월23일
심사청구일자 없음

(71) 출원인
삼성전자주식회사
경기도 수원시 영통구 매탄동 416
고려대학교 산학협력단
서울 성북구 안암동5가 1
(72) 발명자
배태한
서울특별시 송파구 잠실3동 레이크팰리스아파트 114동 2103호
손재승
경기도 수원시 권선구 곡반정동 10블럭 4롯트 201호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
이건주

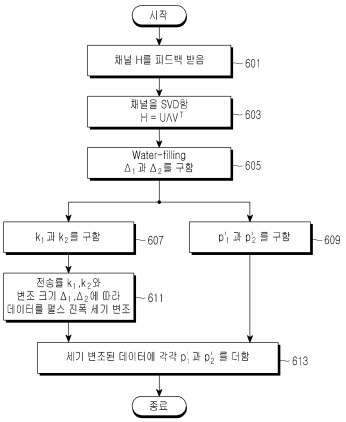
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 가시광 통신 시스템에서 다중 발광 다이오드를 이용하여 최적의 전송률을 얻기 위한 장치 및 방법

(57) 요 약

가시광 통신 시스템에서 다중 발광 다이오드를 이용하여 최적의 전송률을 얻기 위한 방법에 있어서, 복수의 데이터를 동시에 입력 받는 과정과, 주어진 채널에 대해 특이값 분해를 수행하고, 상기 수행된 특이값 분해를 통하여 상기 복수의 데이터의 변조 크기 값을 구하는 과정과, 상기 변조 크기 값을 이용하여 상기 복수의 데이터의 전송률을 구하는 과정과, 상기 구해진 변조 크기 값 및 전송률에 따라 상기 복수의 데이터를 변조하는 과정을 포함함을 특징으로 한다.

대 표 도 - 도6



(72) 발명자

고영채

서울특별시 성북구 정릉동 우성아파트 105동 807호

박기홍

경기도 수원시 권선구 고색동 890-84번지

원은태

서울특별시 강서구 우장산동 1159번지 우장산 현대아이파크 115동 2202호

특허청구의 범위

청구항 1

가시광 통신 시스템에서 다중 발광 다이오드를 이용하여 최적의 전송률을 얻기 위한 방법에 있어서,

복수의 데이터를 동시에 입력 받는 과정과,

주어진 채널에 대해 특이값 분해를 수행하고, 상기 수행된 특이값 분해를 통하여 상기 복수의 데이터의 변조 크기 값을 구하는 과정과,

상기 변조 크기 값을 이용하여 상기 복수의 데이터의 전송률을 구하는 과정과,

상기 구해진 변조 크기 값 및 전송률에 따라 상기 복수의 데이터를 변조하는 과정을 포함함을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 방법.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 변조 크기 값을 이용하여 상기 복수의 데이터의 심볼의 중심을 이동시키기 위한 오프셋을 구하는 과정과,

상기 변조된 복수의 데이터에 상기 오프셋을 더하여 송신하는 과정을 더 포함함을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 방법.

청구항 3

제 1항에 있어서,

상기 특이값 분해를 수행하여 상기 주어진 채널을 병렬 채널로 변환하여 상기 두 개의 서로 다른 데이터를 동시에 전송함을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 방법.

청구항 4

제 1항에 있어서, 상기 변조 크기 값을 구하는 과정은

PAM의 심볼 성상(Symbol Constellation) 상에서 0에서 가장 먼 거리의 심볼 간의 거리를 구하는 과정임을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 방법.

청구항 5

제 4항에 있어서, 상기 변조 크기 값은

워터 필링 기법(Water Filling) 또는 비트 로딩 기법을 이용하여 구함을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 방법.

청구항 6

제 1항에 있어서, 상기 전송률이 최대값을 가지기 위한 조건으로

상기 두 개의 서로 다른 데이터가 양의 값을 가지며, 최대 송신 광출력의 값이 기 설정된 광출력의 값보다 작고, 상기 두 개의 서로 다른 데이터를 변조하는 변조 기법을 사용할 경우 얻을 수 있는 비트 오류율이 임의의 임계값보다 작음을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 방법.

청구항 7

제 1항에 있어서, 상기 두 개의 서로 다른 데이터를 변조하는 과정은

상기 구해진 전송률 및 변조 크기에 따라 변조 기법을 결정하여 상기 두 개의 서로 다른 데이터를 펄스 진폭 세기 변조함을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 방법.

청구항 8

가시광 통신 시스템에서 다중 발광 다이오드를 이용하여 최적의 전송률을 얻기 위한 장치에 있어서,

복수의 데이터가 입력되면, 주어진 채널에 대해 특이값 분해를 수행하고, 상기 수행된 특이값 분해를 통하여 상기 복수의 데이터의 변조 크기 값을 구하고, 상기 변조 크기 값을 이용하여 상기 복수의 데이터의 전송률을 구하는 제어부와,

상기 구해진 변조 크기 값 및 전송률에 따라 상기 복수의 데이터를 변조하는 두 개의 변조기와,

상기 변조된 복수의 데이터를 송신하는 송신부를 포함함을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 장치.

청구항 9

제 8항에 있어서, 상기 제어부는

상기 변조 크기 값을 이용하여 상기 복수의 데이터의 심볼의 중심을 이동시키기 위한 오프셋을 구함을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 장치.

청구항 10

제 9항에 있어서, 상기 송신부는

상기 변조된 복수의 데이터에 상기 오프셋을 더하여 송신함을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 장치.

청구항 11

제 8항에 있어서, 상기 제어부는

상기 특이값 분해를 수행하여 상기 주어진 채널을 병렬 채널로 변환하여 상기 두 개의 서로 다른 데이터를 동시에 전송함을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 장치.

청구항 12

제 8항에 있어서, 상기 변조 크기 값을 구하는 것은

PAM의 심볼 성상(Symbol Constellation) 상에서 0에서 가장 먼 거리의 심볼 간의 거리를 구하는 것임을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 장치.

청구항 13

제 12항에 있어서, 상기 변조 크기 값은

워터 필링 기법(Water Filling) 또는 비트 로딩 기법을 이용하여 구함을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 장치.

청구항 14

제 8항에 있어서, 상기 전송률이 최대값을 가지기 위한 조건으로

상기 두 개의 서로 다른 데이터가 양의 값을 가지며, 최대 송신 광출력의 값이 기 설정된 광출력의 값보다 작고, 상기 두 개의 서로 다른 데이터를 변조하는 변조 기법을 사용할 경우 얻을 수 있는 비트 오류율이 임의의 임계값보다 작음을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 장치.

청구항 15

제 8항에 있어서, 상기 두 개의 서로 다른 데이터를 변조하는 것은

상기 구해진 전송률 및 변조 크기에 따라 변조 기법을 결정하여 상기 두 개의 서로 다른 데이터를 펄스 진폭 세기 변조하는 것임을 특징으로 하는 최적의 전송률을 얻기 위한 장치.

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 가시광 통신 시스템에 관한 것으로 특히 다중 발광 다이오드를 이용하여 최적의 전송률을 얻기 위한 장치 및 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 가시광 무선 통신은 백열 전구와 형광등과 같은 조명이 디지털 반도체에 의한 발광 다이오드 조명으로 교체되면서 발광 다이오드의 빠른 깜박임을 이용한 변복조 기술을 이용하여 통신하는 기술을 의미한다. 즉, 가시광 통신은 반도체가 조명으로도 사용되기 시작하면서 조명을 통신 광원으로 사용할 수 있는 기술로써의 조명과 통신의 융합된 실체라고 할 수 있다. 현재 물리 계층 및 매체 제어 접근 계층에 대한 표준이 활발히 진행되고 있으며, 발광 다이오드 조명 인프라를 활용하여 지능형 교통 시스템, 무선 홈 네트워크 및 초정밀 실내 측위 등의 통신 서비스를 제공할 수 있다.

[0003] 가시광 무선 통신은 통상적으로 380nm에서 780nm에 이르는 가시광 대역에서 이루어지며, 가시광 통신이 가지는 중요한 특징으로는 기본적으로 조명 기능으로서의 역할이 있으며, 광원의 도달 거리까지만 통신이 가능하여 보안성이 높으며, 인체에 무해하고, 가시광 대역에 대한 규제가 없다는 것으로 요약할 수 있다. 최근 무선 가시광 통신에서 사용되는 광원으로는 발광 다이오드가 각광을 받고 있으며, 여타 광원들과 비교하여 낮은 전력 소비량과 긴 수명 및 친환경적이라는 장점이 있다.

[0004] 이러한 가시광 통신에서 사용될 수 있는 대표적인 변복조 기법은 크게 기저대역에서 변조가 이루어지는 기저대역 변조 기법(Baseband Modulation)과 부반송파를 이용하는 변조 기법(Subcarrier Modulation)으로 분류할 수 있다. 대표적인 기저대역 변조 기법에는 라인 코딩과 펄스의 특성(위치, 넓이, 간격 등)을 이용하는 펄스 변조 기법이 있고, 부반송파를 이용하는 변조 기법에는 일반적인 M-ary PSK/PAM/QAM/OOK 변조 기법 등이 있다. 현재 가시광 통신에서 고려되는 변조 기법으로는 적외선 통신에서도 이미 사용되고 있는 On-Off Keying(OOK) 변조 기법과 펄스 위치 변조(PPM)가 있다. 상기 변조 기법을 하기의 도 1을 참조하여 설명하면 다음과 같다.

[0005] 도 1은 종래의 가시광 통신에 고려되는 대표적인 변조 기법을 나타낸 도면이다.

[0006] 도 1을 참조하면, OOK는 진폭 변조 기법의 기본적인 형태라고 할 수 있는데, 이진 정보에 따라 전기적인 신호를 특정 시간만큼 On/Off 시킴으로써 데이터를 전송하는 방식이다. OOK는 다른 변조 기법에 비해 구현이 비교적 단순하고 주파수 효율성이 높기 때문에 높은 잡음 면역성이 요구되지 않는 경우에 사용되고, 전기적인 신호를 Off 시켰을 경우, 송신 전력을 절감할 수 있기 때문에 휴대용 어플리케이션에서 많이 고려되는 방식이다. 펄스 위치 변조 방식은 이진 정보에 따라 펄스의 위치를 변화시켜 전송하는 방식으로 에너지 효율성이 뛰어나 적외선 통신의 표준 변복조 방식으로 주로 이용되고 있다.

[0007] 현재의 가시광 통신에서는 다수의 발광 다이오드에 하나의 데이터를 전송하는 송신 구조를 가지고 있다. 그러나 다수의 발광 다이오드가 송신부로 고려될 경우에 발광 다이오드에 다수의 데이터를 실어 전송함으로써 단일의 데이터를 전송하는 경우보다 높은 전송률의 가시광 통신 시스템을 설계할 수 있다. 또한 종래에는 다수의 발광 다이오드를 이용하여 다수의 데이터를 동시에 보낼 경우 각 데이터를 세기 변조 할 때, 채널에 따라 각 데이터의 전송률을 어떻게 고려해야 하는지, 각 데이터의 변조기에 얼마의 광출력 값을 할당해야 하는지에 대한 연구가 이루어지지 않았다. 따라서 이러한 다수의 발광 다이오드를 이용한 송신 시스템의 설계는 전통적인 무선 주파수 통신의 다중 송신 시스템의 전송 기법과는 다른 조건을 가지고 있다.

[0008] 먼저 가장 기본적은 기준이 되는 송신 전력의 경우를 살펴보면 무선 주파수 통신의 경우는 송신 단에서 전송되는 신호의 크기나 위상에 보내고자 하는 정보가 부호화되어 전송되는 형태를 갖고 있다. 이러한 경우에 전송되는 신호의 신호 전력을 살펴보면 아래와 같이 구할 수 있다.

수학식 1

[0009] $$P = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{T} |x(t)|^2 dx$$

[0010] 일반적으로 전기적 신호의 전력을 구할 때 사용되는 위의 식과 달리, 발광 다이오드를 이용하여 신호를 전송하는 가시광 통신의 경우에는 데이터를 전송되는 신호의 세기, 즉 전기적 신호의 전력에 해당하는 광출력에 부호화하여 전송되는 형태가 일반적이다. 따라서 이 때 전송되는 신호의 전력은 다음과 같이 구할 수 있다.

수학식 2

[0011] $$P_{opt} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{T} x(t)dx$$

[0012] 수학식 1의 전기적 신호에 대한 전력 기준은 수학식 2와 같은 가시광 통신에서의 전력 기준과 엄밀히 다른 것으로 고려되고 따라서 광출력 기준에 맞는 다중 송신에 적합한 전송 기법을 찾아야 한다는 것을 알 수 있다.

[0013] 다음으로 가시광 통신에서 일반적으로 이용되는 세기 변조를 고려해본다. 세기 변조는 앞서 설명한 것과 같이 신호의 세기 (intensity) 에 데이터를 실어 전송하는 기법이다. 전송되는 신호 자체가 전력에 해당하는 신호를 의미한다. 따라서 전송되는 신호가 하기의 수학식 3과 같이 항상 양의 값을 가지고 있어야 한다.

수학식 3

[0014] $$x(t) \geq 0$$

[0015] 일반적인 무선 주파수 통신 시스템에서는 이러한 제한 조건이 필요하지 않다. 그러나 세기 변조를 이용하는 가시광 통신의 송신 신호는 상기와 같은 조건을 만족시켜야 하기 때문에 다중화 이득을 취하는 다중 발광 다이오드 송신 시스템에서 광출력을 할당하기 위해서는 상기와 같은 조건을 전제로 최적화가 이루어져야 한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0016] 본 발명에서는 다수의 발광 다이오드를 이용하여 세기 변조를 통해 핸드폰과 같은 모바일 장치 (hand-held mobile device)에 데이터를 전송하고자 할 때, 2개의 다른 데이터를 동시에 전송할 수 있는 송신 시스템을 제안한다. 주어진 채널 H에 대해 채널을 특이값 분해(Singular Value Decomposition: SVD)를 통해 ($H=U\Lambda V^{T}$) 병렬 채널로 바꾸고, 송신부의 특이값 행렬 (V)와 각 채널에 데이터가 각기 세기 변조될 때 고려되어야 할 조건을 바탕으로 최적의 변조 크기는 무엇인지, 특이값 행렬 (V)에 따른 변조 방식의 오프셋값은 무엇인지, 이 때의 전송율은 어떻게 되는지를 구하여 최적의 변조 크기, 오프셋, 전송율을 구할 수 있는 알고리듬과 송수신 시스템을 제안한다.

과제의 해결 수단

[0017] 본 발명의 일 견지에 따르면, 가시광 통신 시스템에서 다중 발광 다이오드를 이용하여 최적의 전송률을 얻기 위한 방법에 있어서, 복수의 데이터를 동시에 입력 받는 과정과, 주어진 채널에 대해 특이값 분해를 수행하고, 상기 수행된 특이값 분해를 통하여 상기 복수의 데이터의 변조 크기 값을 구하는 과정과, 상기 변조 크기 값을 이용하여 상기 복수의 데이터의 전송률을 구하는 과정과, 상기 구해진 변조 크기 값 및 전송률에 따라 상기 복수의 데이터를 변조하는 과정을 포함함을 특징으로 특징으로 한다.

[0018] 본 발명의 다른 견지에 따르면, 가시광 통신 시스템에서 다중 발광 다이오드를 이용하여 최적의 전송률을 얻기 위한 장치에 있어서, 복수의 데이터가 입력되면, 주어진 채널에 대해 특이값 분해를 수행하고, 상기 수행된 특이값 분해를 통하여 상기 복수의 데이터의 변조 크기 값을 구하고, 상기 변조 크기 값을 이용하여 상기 복수의 데이터의 전송률을 구하는 제어부와, 상기 구해진 변조 크기 값 및 전송률에 따라 상기 복수의 데이터를 변조하는 두 개의 변조기와, 상기 변조된 복수의 데이터를 송신하는 송신부를 포함함을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0019] 본 발명은 두 개의 서로 다른 데이터를 동시에 전송할 때에 각 데이터가 가지는 최대 전송률을 계산하여 데이터를 전송하므로 데이터 전송에 끊김이 없이 전송률의 최적화가 가능한 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0020] 도 1은 종래의 가시광 통신에 고려되는 대표적인 변조 기법을 나타낸 도면

도 2는 본 발명의 일 실시 예에 따른 다중 발광 다이오드를 이용하는 전송 시스템을 나타낸 구성도

도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 송신부에서 데이터의 변조 크기, 오프셋위치 및 전송률을 결정하는 동작을 나타낸 예시도

도 4는 본 발명의 일 실시 예에 따른 세기 변조의 조건을 충족시키는 오프셋 영역을 나타낸 도면

도 5는 본 발명의 일 실시 예에 따른 세기 변조의 모든 심볼이 형성되는 영역과 최대 전송률을 얻을 수 있는 영역을 나타낸 도면

도 6은 본 발명의 일 실시 예에 따른 송신부에서 변조 크기, 오프셋 위치 및 전송률을 결정하는 과정을 나타낸 흐름도

도 7은 본 발명의 일 실시 예에 따른 세기 변조 이후의 결과를 나타낸 그래프

도 8은 본 발명의 일 실시 예에 따른 평균 전송률의 변화를 나타낸 그래프

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0021] 이하 본 발명에 따른 바람직한 실시 예를 첨부한 도면을 참조하여 상세히 설명한다. 하기 설명에서는 구체적인 구성 소자 등과 같은 특정 사항들이 나타나고 있는데 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐 이러한 특정 사항들이 본 발명의 범위 내에서 소정의 변형이나 혹은 변경이 이루어질 수 있음은 이 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게는 자명하다 할 것이다.

[0022] 도 2는 본 발명의 일 실시 예에 따른 다중 발광 다이오드를 이용하는 전송 시스템을 나타낸 구성도이다. 다중 발광 다이오드를 이용하는 채널을 H(201)로 정의할 경우, 채널 H(201)는 행렬 형태로 나타낼 수 있고 각 행렬의 값은 가시광 통신 채널의 특성에 따라 양의 실수 값을 갖는다. 채널 H(201)는 고유의 특성에 따라 세 개의 행렬의 곱 $H=U\Lambda V^T$로 특이값 분해 (Singular Value Decomposition) 할 수 있다. 하기의 수학식을 참조하여 설명하기로 한다.

수학식 4

[0023]
$$\mathbf{H}=\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}=\mathbf{U}\Lambda\mathbf{V}^T,\quad \Lambda=\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix},\quad \mathbf{V}=\begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix}$$

[0024] 수학식 4에서 U는 채널 행렬의 오른쪽 특이 매트릭스(right singular matrix)를 나타내고 V는 채널 행렬의 왼쪽 특이 매트릭스(left singular matrix)를 의미한다. Λ는 채널 행렬의 특이값을 대각 행렬의 원소로 갖는 대각 행렬이다. 이 때, 수학연산자 $(*)^T$는 Transpose를 의미한다.

[0025] 송신부(203)에서는 채널 H(201)를 알고 있고, 각 송신부(203)와 수신부(205)에서는 채널의 특성에 따라 송신 매트릭스 (precoding matrix) V(207)와 수신 매트릭스 (combining matrix) $\mathbf{U}^T$ (209)를 결정하여 다중 안테나 채널을 병렬 채널로 만들 수 있다. 이러한 병렬 채널을 구성할 수 있기 때문에 송신 단에서는 최대 2개의 데이터를 동시에 전송할 수 있다. 따라서 두 개의 데이터가 동시에 각 변조기(211, 213)를 거치고 송신 매트릭스와 곱해진 후 전송이 된다. 변조가 이루어진 데이터들은 사각 펄스를 기저 함수로 이용하여 실제 송신되는 송신 신호를 형성하게 된다. 이후 수신부(205)에서는 수신된 송신 신호를 복조기(215, 217)를 통하여 복조한다.

[0026] 도면에는 도시하지 않았지만, 발광 다이오드의 수가 두 개 이상일 경우 그룹화를 통해 두 개의 그룹으로 나눌 수 있고 따라서 두 개의 발광 다이오드를 이용할 경우와 동일한 방법을 적용할 수 있다.

[0027] 도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 송신부(203)에서 데이터의 변조 크기, 오프셋위치 및 전송률을 결정하는 동작을 나타낸 예시도이다.

[0028] 도 3에서와 같이 2개의 서로 다른 데이터가 각각 다른 변조기(211, 213)로 입력되면 제안된 기법에 의해 계산된 펄스 진폭 세기 변조 (이하 PAM)의 전송률 Ki와 PAM의 Symbol space의 Constellation 상에서 0에서 가장 먼 거리의 심볼간의 거리 Δi를 바탕으로 심볼 S'i를 형성하고 여기에 오프셋 P'i를 더하여 송신 매트릭스 V로 보낼 변조 심볼 S1(=S'1+P'1)과 S2(=S'2+P'2)를 형성한다. 즉, 오프셋이 적용된 변조기의 출력 값은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 5

[0029]
$$s_1 = s_1' + p_1'$$
$$s_2 = s_2' + p_2'$$

[0030] 이 때 발광다이오드를 통해 수신 단으로 전송되는 신호 x는 도면 2에서와 같이 송신 행렬 V(207)와 곱해져 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 6

[0031]
$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \mathrm{V}s$$

[0032] 채널을 지난 후 백색 잡음 (AWGN) 이 더해져 다음과 같은 수신 신호를 얻을 수 있다.

수학식 7

[0033]
$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}$$

[0034] 위의 수신 신호에 수신 행렬 $\mathbf{U}^T$ (209)를 곱해주면 다음과 같은 2개의 병렬 수신 신호를 얻을 수 있다.

수학식 8

[0035]
$$\begin{aligned} \mathbf{U}^T\mathbf{y} &= \mathbf{U}^T\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{U}^T\mathbf{n} \\ &= \mathbf{U}^T\mathbf{U}\Lambda\mathbf{V}^T\mathbf{V}\mathbf{s} + \mathbf{U}^T\mathbf{n} \\ &= \Lambda\mathbf{s} + \mathbf{U}^T\mathbf{n} \\ \Leftrightarrow \mathbf{r} &= \mathbf{U}^T\mathbf{y}, \mathbf{z} = \mathbf{U}^T\mathbf{n} \\ \mathbf{r} &= \Lambda\mathbf{s} + \mathbf{z} = \Lambda\mathbf{s}' + \Lambda\mathbf{p}' + \mathbf{z} \end{aligned}$$

[0036] 수학식 8에서 $\mathbf{r}$와 $\mathbf{z}$은 수신 행렬 $\mathbf{U}^T$ 에 의해 변형된 수신신호와 그 때의 백색 잡음을 의미하고, 백색 잡음의 확률 분포는 수신 행렬과 관계없이 변하지 않는다.

[0037] 수신부(205)에서는 Λ과 P'를 알고 있기 때문에 위의 신호에서 ΛP'를 제거하고 다음과 같은 새로운 수신 신호

r'1과 r'2을 만들 수 있다.

수학식 9

[0038] $$r_1' = \lambda_1 s_1' + z_1$$
$$r_2' = \lambda_2 s_2' + z_2$$

[0039] 수학식 9의 두 수신 신호는 각각 ML 디코딩하여 다음과 같이 복조할 수 있다.

수학식 10

[0040] $$\hat{s}_1' = \arg\max_{\tilde{s} \in S} \left\| r_1' - \lambda_1 \tilde{s} \right\|^2, \ (S_1 : \text{set with constellation symbols for the first modulator})$$
$$\hat{s}_2' = \arg\max_{\tilde{s} \in S} \left\| r_2' - \lambda_2 \tilde{s} \right\|^2, \ (S_2 : \text{set with constellation symbols for the second modulator})$$

[0041] 이 때, $\hat{s}_1'$ 과 $\hat{s}_2'$ 은 ML Decoding을 하여 가능한 송신 심볼 중에서 거리가 가장 가까운 거리의 송신 심볼을 찾아 결정한 복조 심볼을 의미한다. 수학 연산자 arg max는 최대값을 찾기 위한 집합 내의 변수값들 중에서 최대값을 갖게 하는 변수값을 찾는 연산자이다.

[0042] 또한 피드백된 채널 H를 특이값 분해(SVD, 305)하고, 워터 필링 기법(307)을 이용하여 전송률, 변조 크기 값, 오프셋을 구할 수 있다. 정수 값을 변조 기법의 전송률로 가지는 불연속적인 PAM의 경우에 워터 필링 기법 대신 비트 로딩 기법을 이용한다. 그렇다면, 하기에서 어떻게 위의 변조기(211, 213)에 적용되는 전송률 k, 변조 크기 값 Δ 그리고 오프셋 p'를 계산하는지에 대해 설명한다.

[0043] 먼저 본 발명에서 고려하고 있는 송신 신호에 대한 조건들을 살펴본다.

[0044] <세기 변조의 조건>

[0045] 먼저 변조기를 통과하여 송신부(203)의 송신 행렬로 보내지는 벡터를 먼저 정의하면 아래와 같다.

수학식 11

[0046] $$\mathbf{s} = \mathbf{p}' + \mathbf{s}'$$
$$\mathbf{s}' = [s_1' \quad s_2']^T : \text{평균값이 0인 펄스 진폭 세기 변조 심볼}$$
$$\mathbf{p}' = [p_1' \quad p_2']^T : \text{심볼의 중심을 이동시키는 오프셋 값}$$

[0047] 변조기로 들어가는 비트 정보들은 s'의 세기 변조를 통해 변조가 이루어지고, 변조된 심볼의 위치는 임의의 p' 값이 더해져서 위치를 바꿀 수 있다. 본 발명에서 세기 변조 기법으로 다수의 레벨을 갖는 펄스 세기 변조 기법을 가정하였다. 송신 매트릭스를 거쳤을 경우에 송신 벡터는 다음과 같다.

수학식 12

[0048] $$\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{s} = \mathbf{V}\mathbf{p}' + \mathbf{V}\mathbf{s}' = \mathbf{p} + \mathbf{x}'$$
$$\text{where } \mathbf{p} = \mathbf{V}\mathbf{p}' \text{ and } \mathbf{x}' = \mathbf{V}\mathbf{s}'$$

[0049] 본 발명에서는 세기 변조를 가정하였기 때문에, 송신 신호는 세기(power)에 대한 신호라고 할 수 있으므로 양의 값을 가져야 한다. 따라서 다음의 두 가지 조건을 만족시켜야 하는데, 이를 벡터 형태로 고칠 경우 다음과

같다.

수학식 13

[0050] $$\begin{cases} \mathbf{x}(t) \geq 0 \\ E[\mathbf{x}(t)] \geq 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \mathbf{x} \geq 0 \\ \mathbf{p} \geq 0 \end{cases}$$

[0051] 여기에서 E[x(t)]는 확률변수의 평균값을 구하는 연산자를 의미한다. 또한 벡터에 대한 부등식이 0보다 같거나 크다는 것은 각 벡터의 원소들이 0보다 같거나 크다는 것을 의미한다.

[0052] <송신 광출력에 대한 조건>

[0053] 본 발명에서는 송신 단에서 사용할 수 있는 최대 송신 광출력 값이 주어진 값(P_{opt})에 의해 제한되어 있다고 가정한다. 이를 다음과 같이 조건화 할 수 있다.

수학식 14

[0054] $$E[x_1(t)] + E[x_2(t)] \leq P_{opt} \Leftrightarrow p_1 + p_2 \leq P_{opt} \Rightarrow \mathbf{1}^T \mathbf{p} \leq P_{opt}$$

[0055] <변조 기법의 비트 오류율에 대한 조건>

[0056] 만약 각 s'1과 s'2 두 변조 기법을 사용했을 경우 얻을 수 있는 비트 오류율이 있다고 했을 경우, 본 발명에서는 비트 오류율이 신뢰도가 높은 통신이 이뤄질 수 있도록 임의의 임계값보다 작아야 한다고 가정하였다. 만약 s'1과 s'2 두 변조 기법에 의해 얻을 수 있는 비트 오류율을 BER1와 BER2로 정의한다면, 이를 다음과 같이 조건화 할 수 있다.

수학식 15

[0057] $$BER_i \leq BER_{tgt} \quad \text{for } i = 1,2 \quad (BER_{tgt}: \text{target BER})$$

[0058] 만약 각 s'1과 s'2의 두 변조에 의해 얻을 수 있는 전송률을 각각 k1과 k2이라고 했을 경우, 본 발명에서 구하고자 하는 것은 위와 같은 조건 하에서 두 변조에 의한 전송률을 최대로 하는 것이다. 또한 이렇게 최대의 전송률을 얻는 문제를 풀 경우에, 몇 개의 레벨을 갖는 PAM을 사용할 것인지, 또한 각 변조 기법에 부여할 광출력 값은 얼마인지, 각 변조 기법의 오프셋 값은 어떻게 주어져야 하는지를 구할 수 있다. 위의 세 가지 조건에 따라 최적화 문제를 제기하면 다음과 같은 문제를 해결해야 한다.

수학식 16

$$\begin{aligned}
&\text{maximize} \quad \sum_{i=1}^{2} k_i \\
&\text{subject to} \quad \mathbf{x} \geq 0, \quad \mathbf{p} \geq 0 \\
&\qquad\qquad \mathbf{1}^T \mathbf{p} \leq P_{opt} \\
&\qquad\qquad BER_i \leq BER_{tgt} \\
&\xrightarrow{\mathbf{x}=\mathbf{V}\mathbf{s}} \\
&\text{maximize} \quad \sum_{i=1}^{2} k_i \\
&\text{subject to} \quad \mathbf{V}(\mathbf{p}'+\mathbf{s}') \geq 0 \qquad \text{(I)} \\
&\qquad\qquad \mathbf{V}\mathbf{p}' \geq 0 \qquad \text{(II)} \\
&\qquad\qquad \mathbf{1}^T \mathbf{V}\mathbf{p}' \leq P_{opt} \qquad \text{(III)} \\
&\qquad\qquad BER_i \leq BER_{tgt} \qquad \text{(IV)}
\end{aligned}$$

[0059]

[0060] 상기 수학식 16에 제시된 세 가지 조건에 따른 최적화 문제 해결 과정을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 수학식 16의 조건 (II)와 (III)를 만족시키는 p'의 오프셋 지역을 도출하는 과정을 설명하기로 한다.

[0061] 수학식 16의 조건 (II)의 식에 따라 두 개의 직선을 다음과 같이 얻을 수 있다.

수학식 17

$$\begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1' \\ p_2' \end{bmatrix} = \mathbf{0} \Leftrightarrow \begin{cases} p_2' = a p_1' \\ p_2' = -\dfrac{1}{a} p_1' \end{cases}, \left(a = -\frac{v_{11}}{v_{12}} = \frac{v_{22}}{v_{21}} \right)$$

[0062]

[0063] 여기서 a는 가로 안의 정의와 같이 송신매트릭스 V(207)의 원소들에 의해 계산되는 값이다. 위 수학식 17의 두 직선에 따라 네 개의 영역이 생기게 되는데, 송신 매트릭스 V(207)에 따라 부등호의 방향이 바뀌게 되어 네 개의 영역 중 한 영역 만이 조건 (II)를 만족시키는 오프셋 값을 구할 수 있는 영역이 된다. $\mathbf{H} = \mathbf{u}_1 \lambda_1 \mathbf{v}_1^T + \mathbf{u}_2 \lambda_2 \mathbf{v}_2^T$ 이기 때문에 V(207)를 적절히 변형하여 다음과 같은 영역에서만 고려하면 다른 영역의 최적화 문제도 동일하게 해결 할 수 있다.

수학식 18

$$v_{11} < 0, v_{12} > 0, v_{21} > 0, v_{22} > 0, a > 0$$

[0064]

[0065] 예를 들어, $v_{11} > 0, v_{12} > 0, v_{21} > 0, v_{22} < 0$ 일 경우를 살펴보면

수학식 19

[0066] $$\mathbf{U}' = [-\mathbf{u}_2 \quad \mathbf{u}_1]$$
$$\mathbf{\Lambda}' = \mathrm{diag}([\lambda_2 \quad \lambda_1])$$
$$\mathbf{V}' = [-\mathbf{v}_2 \quad \mathbf{v}_1]$$

[0067] 로 변형하면 $\mathbf{H} = \mathbf{U}'\mathbf{\Lambda}'\mathbf{V}'^T$ 로 동일한 특이값 분해임을 알 수 있고, 여기서 구한 V' 는 수학식 18의 조건을 만족시킨다는 것을 알 수 있다. 따라서 다른 조건들을 수학식 18과 같은 동일한 조건으로 변형하여 최적화 문제를 해결할 수 있다.

[0068] 이러한 수학식 18의 조건 하에서 수학식 16의 조건 (II)와 조건 (III)을 만족시키는 오프셋 지역을 살펴보면 다음과 같다.

수학식 20

[0069] $$\begin{cases} p_2' \geq a p_1' \\ p_2' \geq -\dfrac{1}{a} p_1' \\ p_2' \leq \dfrac{v_{22} - v_{12}}{v_{22} + v_{12}} p_1' + \dfrac{P_{opt}}{v_{22} + v_{12}} \end{cases}$$

[0070] 수학식 20의 세 번째 조건은 수학식 16의 조건 (III)으로부터 유도되었는데, 그 과정은 다음과 같다.

수학식 21

[0071] $$\mathbf{1}^T \mathbf{V}\mathbf{p}' = [1 \quad 1] \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1' \\ p_2' \end{bmatrix}$$
$$= [v_{11} + v_{21} \quad v_{12} + v_{22}] \begin{bmatrix} p_1' \\ p_2' \end{bmatrix}$$
$$= (v_{11} + v_{21}) p_1' + (v_{12} + v_{22}) p_2'$$
$$\Rightarrow p_2' \leq \frac{-(v_{11} + v_{21})}{v_{22} + v_{12}} p_1' + \frac{P_{opt}}{v_{22} + v_{12}}$$
$$\text{since } v_{11} = -v_{22} \text{ and } v_{12} = v_{21}$$
$$p_2' \leq \frac{v_{22} - v_{12}}{v_{22} + v_{12}} p_1' + \frac{P_{opt}}{v_{22} + v_{12}}$$

[0072] 이를 충족시키는 영역을 하기의 도면을 통해 살펴보면 다음과 같다.

[0073] 도 4는 본 발명의 일 실시 에에 따른 세기 변조의 조건을 충족 시키는 오프셋 영역을 나타낸 도면이다. 상기 수학식 21을 충족시키는 영역을 예를 들어 살펴보면 도 4에 표시된 음영 지역임을 알 수 있고, 임의의 오프셋 값은 항상 음영 지역 안에 있어야 한다.

[0074] 다음으로 조건 (I)에 의한 변조 기법의 크기를 정의하는 과정을 설명하기로 한다.

[0075] 앞서 설명한 것과 같이 두 개의 변조기를 통해 s'1과 s'2의 변조가 이루어지게 되는데, 이러한 변조는 p'점을 중심으로 도 4에서와 같이 좌우와 상하로 형성된다. 조건 (I)에서와 같이 변조가 이루어지고 형성된 점들은 항상 $\mathbf{V}(\mathbf{p}' + \mathbf{s}') \geq 0$ 를 만족시켜야 하기 때문에 두 개의 선 위에 존재해야 한다. 이를 하기의 도 5에 나타내었다.

[0076] 도 5는 본 발명의 일 실시 예에 따른 세기 변조의 모든 심볼이 형성되는 영역과 최대 전송률을 얻을 수 있는 영역을 나타낸 도면이다. 도 5와 같이 p'점을 중심으로 두 변조 기법을 이용할 경우 형성되는 성상(Constellation) 영역은 사각형으로 형성된다.

[0077] 성상을 형성할 수 있는 사각형 영역을 구할 때, a의 값에 따라 크게 두 범위, a>1과 0<a<1로 나눠서 고려해볼 수 있는데, 먼저 a>1인 경우를 살펴보도록 한다.

[0078] 도 5에서와 같이 최적화 문제를 풀기 위한 p'의 영역을 줄일 수가 있는데, 그 이유는 다음과 같다. 실제 p'점을 형성할 수 있는 영역 중에 위의 그림과 같이 음영 처리된 부분 중에서 전송률을 최대로 할 수 있는 변조 기법의 크기를 찾을 수 있다는 것이다. 도 4의 오프셋 영역 중에서 도 5의 음영지역 왼쪽에 있는 부분에 오프셋 값이 있을 경우에는 도 5의 음영의 삼각형 영역의 왼쪽 모서리에 오프셋 값이 있을 경우보다 항상 전송률이 낮다. 따라서 음영지역 왼쪽에 위치한 오프셋 영역은 고려할 필요가 없어진다. 마찬가지로 도 4의 음영 지역 중에 도 5의 음영지역 오른쪽에 있는 영역에 오프셋이 형성되는 경우는 도 5의 삼각형 음영 영역의 오른쪽 모서리에 오프셋 값이 형성되는 경우보다 항상 전송률이 낮다. 따라서 이 영역도 고려할 필요가 없다.

[0079] 따라서 도 5와 같이 최적화에 고려되는 음영 처리된 영역은 수식적으로 다음과 같다. 도 5에서 직선(501)은 임의의 p'2값에 대해 두 직선 p'2=ap'1와 p'2=p'1/a에서부터 p'1축으로의 거리가 동일한 점들의 집합에 해당한다. 또한 p'1방향으로 최대로 성상을 형성할 수 있는 중심점들의 집합이라고 할 수 있다. 이러한 직선은 p'2값에 대한 두 직선의 p'1축의 값을 구하여 p'1에서부터 거리가 같다고하여 다음과 같이 구할 수 있다.

수학식 22

[0080] $$p_1' + a p_2' = p_2' / a - p_1'$$

[0081] 도 5에서 직선(503)은 p'1=0이다. 따라서 음영 처리된 영역은 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

수학식 23

[0082] $$\begin{cases} p_1' \le 0 & (\mathrm{I})' \\ p_2' \ge \dfrac{2}{(1/a - a)} p_1' & (\mathrm{II})' \end{cases}$$

$$p_2' \le \frac{v_{22} - v_{12}}{v_{22} + v_{12}} p_1' + \frac{P_{opt}}{v_{22} + v_{12}}$$

[0083] 다음으로 임의의 오프셋 값이 정해져 있을 때, 전송률을 최대한으로 높이기 위해 변조 기법의 크기는 어떻게 형성해야 하는지에 대해 알아본다.

[0084] 변조 기법의 크기는 각 변조 기법의 크기의 반에 해당되는 Δ1와 Δ2에 의해 형성되는 성상 점이 p'2=ap'1 과 p'2=-p'1/a에 닿을 경우에 가장 큰 변조 크기를 형성한다. Δ1와 Δ2에 의해 형성되는 성상 점이 p'2=ap'1 과 p'2=-p'1/a에 닿을 경우에 각 직선에 닿는 점은 구해보면 먼저 p'2=ap'1 에 닿는 점은 (p'1+Δ1, p'2-Δ2) 가 되고 p'2=-p'1/a 에 닿는 점은 (p'11Δ1, p'2-Δ2)가 된다. 각 점을 직선에 넣었을 때 나오는 식은 다음과 같다.

수학식 24

[0085] $$p_2' - \Delta_2 = -\frac{1}{a}(p_1' - \Delta_1)$$

$$p_2' - \Delta_2 = a(p_1' + \Delta_1)$$

[0086] 수학식 24를 정리하면 다음과 같은 p'와 Δ간의 관계식을 얻을 수 있다.

수학식 25

[0087]
$$\begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ a & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ -a & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} p_1' \\ p_2' \end{bmatrix}$$

[0088] 지금까지는 a>1인 경우에 대해 살펴보았다. 만약 0<a<1일 경우에는 하기 수학식 26과 같은 영역 내에 p'점이 형성될 경우에 전송율을 최대로 할 수 있는 변조 기법의 크기를 찾을 수 있고 수학식 25와 동일한 식을 이용하여 하기의 수학식과 같이 a>1인 경우와 동일하게 최적화 문제를 해결할 수 있다.

수학식 26

[0089]
$$\begin{cases} p_1' \geq 0 & \text{(I)}' \\ p_2' \geq \dfrac{2}{(1/a-a)}p_1' & \text{(II)}' \end{cases}$$
$$p_2' \leq \frac{v_{22}-v_{12}}{v_{22}+v_{12}}p_1'+\frac{P_{opt}}{v_{22}+v_{12}}$$

[0090] p'와 Δ간의 관계식은 a>1 일 경우에 구한 관계식과 동일하다.

[0091] 다음으로 수학식 16의 조건 (IV)에 의한 타겟 비트 오류율을 만족시키는 변조 기법의 형성 과정을 살펴보기로 한다.

[0092] Δ1와 Δ2를 정하여 임의의 M-ary PAM으로 전송하였을 경우에 비트 오류율이 조건 (IV)를 만족시켜야 한다. 이를 만족시키는 M값을 결정하기 위해 임의의 Δ와 M에 따른 비트 오류율을 먼저 계산하여 본다. 임의의 Δ에 대한 M-ary PAM을 형성한다면 인접 심볼 간의 거리는 2Δ/(M-1) 가 되는 성상을 고려할 수 있다. 이 때 평균 심볼 에너지를 구하면 다음과 같다.

수학식 27

[0093]
$$E_s=\frac{1}{M}\sum_{k=0}^{M-1}\left(-\Delta+k\frac{2}{M-1}\Delta\right)^2$$
$$=\frac{\Delta^2}{3}\left(\frac{M+1}{M-1}\right)$$

[0094] 이 때, 백색 잡음의 분산 값을 1로 가정했을 때, Es의 심볼 에너지와 λ 의 채널 이득을 갖는 채널을 지날 때의 M-ary PAM의 비트오류율은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

수학식 28

[0095]
$$BER_{M-PAM}\cong 0.2\exp\left[-\frac{3E_s\lambda^2}{(M^2-1)}\right]$$
$$=0.2\exp\left[-\frac{\Delta^2\lambda^2}{(M-1)^2}\right]$$

[0096] 따라서 본 발명에서 만족시키고자 했던 최소한의 타겟 비트 오류율 BER_{tgt}을 만족시키기 위해 각 변조 기법의 크

기 Δi에 따라 ki의 전송율을 얻을 수 있는 2^k-ary PAM 은 다음과 같은 식을 만족시켜야 한다.

수학식 29

[0097] $$BER_{tgt} = 0.2\exp\left[-\frac{\Delta_i^2\lambda_i^2}{(2^{k_i}-1)^2}\right]$$

[0098] 이를 ki에 대해 나타낼 경우 다음과 같다.

수학식 30

[0099] $$k_i = \log_2(1+K\Delta_i\lambda_i),\quad K = \left(\sqrt{-\ln(5BER_{tgt})}\right)^{-1}$$

[0100] 상기에서 새로 구한 조건들을 이용하여 p'에 대한 최적화 문제를 Δ에 대한 최적화 문제로 치환할 수 있다. 먼저 p'에 대한 최적화 문제를 살펴보면 다음과 같다.

수학식 31

[0101] $$\text{maximize}\quad \sum_{i=1}^{2}\log_2(1+K\Delta_i\lambda_i)$$

$$\text{subject to}\quad p_1' \le 0$$

$$p_2' \ge \frac{2}{(1/a-a)}p_1'$$

$$p_2' \le \frac{v_{22}-v_{12}}{v_{22}+v_{12}}p_1' + \frac{P_{opt}}{v_{22}+v_{12}}$$

$$\begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ a & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta_1 \\ \Delta_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ -a & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix}p_1' \\ p_2'\end{bmatrix}$$

[0102] 상기 수학식 31에서와 같이 $p_1' \le 0$ 인 첫 번째 조건과, $p_2' \ge \frac{2}{(1/a-a)}p_1'$ 인 두 번째 조건과, $p_2' \le \frac{v_{22}-v_{12}}{v_{22}+v_{12}}p_1' + \frac{P_{opt}}{v_{22}+v_{12}}$ 인 세 번째 조건으로 나누어 최적화 문제를 살펴볼 수 있다. 이를 p'와 Δ간의 관계식을 사용하여 바꾸면 다음과 같은 Δ에 대한 최적화 문제로 치환할 수 있다. 첫 번째 조건은 다음과 같이 치환할 수 있다.

수학식 32

$$\begin{bmatrix} p_1' \\ p_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ -a & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{(1/a+a)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ a & 1/a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix}$$

$$p_1' \le 0$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1' \\ p_2' \end{bmatrix} \le 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{(1/a+a)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ a & 1/a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix} \le 0$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix} \le 0$$

$$\Leftrightarrow (1/a - a)\Delta_1 \le 0$$

$$\Leftrightarrow \Delta_1 \ge 0$$

[0103]

[0104] 두 번째 조건은 다음과 같이 치환할 수 있다.

수학식 33

$$p_2' \ge \frac{2}{(1/a-a)} p_1'$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \frac{2}{(1/a-a)} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1' \\ p_2' \end{bmatrix} \le 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{(1/a+a)} \begin{bmatrix} \frac{2}{(1/a-a)} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ a & 1/a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix} \le 0$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \frac{2}{(1/a-a)} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/a-a & 0 \\ 2 & a+1/a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix} \le 0$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} 0 & -(a+1/a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix} \le 0$$

$$\Leftrightarrow -(a+1/a)\Delta_2 \le 0$$

$$\Leftrightarrow \Delta_2 \ge 0$$

[0105]

[0106] 세 번째 조건은 다음과 같이 치환할 수 있다.

수학식 34

$$\mathbf{1}^T\mathbf{V}\mathbf{p}' = \begin{bmatrix}1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_{11} & v_{12}\\ v_{21} & v_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p_1'\\ p_2'\end{bmatrix} \le P_{opt}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{(1/a+a)}\begin{bmatrix}1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_{11} & v_{12}\\ v_{21} & v_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & -1\\ a & 1/a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1/a & 1\\ a & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta_1\\ \Delta_2\end{bmatrix} \le P_{opt}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{(1/a+a)}\begin{bmatrix}1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_{11} & v_{12}\\ v_{21} & v_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1/a-a & 0\\ 2 & a+1/a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta_1\\ \Delta_2\end{bmatrix} \le P_{opt}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{(1/a+a)}\begin{bmatrix}1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}(1/a-a)v_{11}+2v_{12} & (a+1/a)v_{12}\\ (1/a-a)v_{21}+2v_{22} & (a+1/a)v_{12}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta_1\\ \Delta_2\end{bmatrix} \le P_{opt}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{(1/a+a)}\begin{bmatrix}1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}(1/a-a)v_{11}-2v_{11}/a & (a+1/a)v_{12}\\ (1/a-a)v_{21}+2av_{21} & (a+1/a)v_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta_1\\ \Delta_2\end{bmatrix} \le P_{opt}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix}1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-v_{11} & v_{12}\\ v_{21} & v_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta_1\\ \Delta_2\end{bmatrix} \le P_{opt}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix}1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_{22} & v_{12}\\ v_{12} & v_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta_1\\ \Delta_2\end{bmatrix} \le P_{opt}$$

$$\Leftrightarrow (v_{12}+v_{22})(\Delta_1+\Delta_2) \le P_{opt}$$

$$\Leftrightarrow \Delta_1+\Delta_2 \le P_{opt}/(v_{12}+v_{22})$$

[0107]

[0108] 따라서 위의 최적화 문제는 다음과 같은 Δ에 대한 최적화 문제로 치환할 수 있다.

수학식 35

$$\text{maximize} \quad \sum_{i=1}^{2}\log_2(1+K\Delta_i\lambda_i)$$

$$\text{subject to} \quad \Delta_1+\Delta_2 \le \frac{P_{opt}}{v_{12}+v_{22}}$$

$$\Delta_1 \ge 0, \Delta_2 \ge 0$$

[0109]

[0110] 만약 연속적인 레벨의 PAM을 사용한다고 가정하면, 즉 PAM의 전송율이 임의의 실수값을 가질 수 있는 경우, 수학식 35의 최적화 문제는 다음과 같은 워터 필링(Water-filling) 기법을 사용하여 계산할 수 있다. Water-filling 알고리즘은 물리계층에서 일반적으로 사용되는 알고리즘이고 기존의 Water-filling 알고리즘을 이용하여 전송률을 구하는 것이나 bit-loading 알고리즘을 이용하여 각 변조 기법에 적용될 bit 전송률을 구하는 것은 이미 알려져 있다. Water-filling solution의 유도 과정은 다음과 같다. 위의 최적화 문제를 Lagrange multiplier를 사용하여 아래와 같은 비용 함수(cost function)를 얻을 수 있다.

수학식 36

$$C = \sum_{i=1}^{2}\log_2(1+K\Delta_i\lambda_i)+\mu'(\Delta_1+\Delta_2-P_{opt})$$

[0111]

[0112] Δi에 대한 최대값을 얻기 위해 C를 각 Δi로 미분하였을 때 미분된 값이 0이 되는 값을 찾아야 한다. 이를 하기의 수학식을 통하여 찾을 수 있다.

수학식 37

$$\frac{dC}{d\Delta_i} = \frac{K\lambda_i}{1+K\Delta_i\lambda_i} + \mu' = 0$$

$$\Leftrightarrow \Delta_i = -\frac{1}{\mu'} - \frac{1}{K\lambda_i}$$

$$= \mu' - \frac{1}{K\lambda_i}$$

Since $\Delta_i \geq 0$,

$$\Delta_i^* = \left(\mu - \frac{1}{K\lambda_i}\right)^+$$

[0113]

[0114] $C = \frac{P_{opt}}{\nu_{12}+\nu_{22}}$ 로 정의할 경우, 다음과 같은 최적의 Δ값을 얻을 수 있다. 여기에서 구한 Δi의 합이 C가 되도록 하는 μ를 찾고, 이를 대입하여 각 변조기의 크기를 구할 수 있다.

수학식 38

$$\Delta_i^* = \left[\mu - \frac{1}{K\lambda_i}\right]^+ \text{ ,where } \sum_{i=1}^{2}\left[\mu - \frac{1}{K\lambda_i}\right]^+ = C$$

[0115]

[0116] 여기에서 연산자 $(a)^+$ 는 $\max(0,a)$ 로 정의된다.

[0117] 이에 따라 p'와 Δ간의 관계식 (31)에 위의 Δ*을 대입하여 최적의 p' 또한 아래와 같이 얻을 수 있다.

수학식 39

$$\begin{bmatrix} p_1^{**} \\ p_2^{**} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ -a & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1^* \\ \Delta_2^* \end{bmatrix}$$

[0118]

[0119] 또한 이 때 전송에 사용할 변조 기법을 수학식 29에 Δ*을 대입함으로 인하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

수학식 40

$$k_i^* = \log_2\left(1 + K\Delta_i^*\lambda_i\right)$$

[0120]

[0121] 실제 임의의 채널 H에 대해 최적의 Δ를 구하여 수학식 40에서와 같이 전송률을 구할 경우 실수 값의 ki*를 얻게 된다. 만약 2PAM (k_i=1), 4PAM (k_i=2), 8PAM (k_i=3) 등과 같은 불연속적인 PAM만을 사용할 경우에는 Levin-Campello의 비트 로딩 알고리즘과 같은 불연속적인 PAM에 대한 최적화 문제를 푼 알고리즘을 이용하여야 한다.

[0122] 도 6은 본 발명의 일 실시 예에 따른 송신부에서 변조 크기, 오프셋 위치 및 전송률을 결정하는 과정을 나타낸 흐름도이다. 채널 H와 광출력 레벨 P_{opt}가 주어져 있을 때, 본 발명에서 제안하는 알고리즘을 통해 변조의 크기, 오프셋 값의 위치와 전송률을 결정하는 과정을 살펴보면 다음과 같다.

[0123] 601단계에서 채널 H를 피드백 받고, 603단계에서 주어진 채널 H에 대한 특이값 분해를 통해 행렬 V와 Λ를 계산한다. 연속적인 전송률(Continuous rate)을 가정하여 시스템을 구성하는 경우, 605단계로 진행하여 V와 Λ를 이용하여 Water-filling solution을 구한다. 구하는 과정은 다음과 같다.

수학식 41

[0124] $$\Delta_i^* = \left[\mu - \frac{1}{K\lambda_i}\right]^+ \quad \text{,where} \quad \sum_{i=1}^{2}\left[\mu - \frac{1}{K\lambda_i}\right]^+ = \frac{P_{opt}}{v_{12}+v_{22}}$$

[0125] 불연속적인 전송률(Discrete rate)를 가정한 경우에는 워터 필링 기법 대신 Levin Campello 비트 로딩 기법을 적용하여 Δ를 계산한다. 이를 통해 구한 Δ를 이용하여 전송률과 오프셋 위치를 구한다. 이후 607단계에서 k1, k2를 구하고, 609단계에서 p1, p2를 구한다. 구하는 식은 하기와 같다.

수학식 42

[0126] $$\begin{bmatrix} p_1^{**} \\ p_2^{**} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ -a & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1/a & 1 \\ a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1^* \\ \Delta_2^* \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} k_1^* = \log_2\left(1 + K\Delta_1^*\lambda_1\right) \\ k_2^* = \log_2\left(1 + K\Delta_2^*\lambda_2\right) \end{cases}$$

[0127] 이후 611단계에서 앞서 구한 전송율 ki*과 변조의 크기 Δi*에 따라 변조 기법을 결정하여 데이터를 변조한다. 이후 613단계로 진행하여 변조된 값에 각각 p_1^{**} 과 p_2^{**} 을 더하여 송신 행렬 V에 곱할 벡터 $\mathbf{s} = [s_1 \quad s_2]^T$를 형성한다.

[0128] 다음은 실제로 특정 채널에 대해 특이값 분해를 하여 두 신호를 동시에 전송하는 과정을 하기의 실시 예를 들어 설명하기로 한다.

[0129] 도 7은 본 발명의 일 실시 예에 따른 세기 변조 이후의 결과를 나타낸 그래프이다.

[0130] 임의의 주어진 채널 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1.866 & 0.9444 \\ 1.7873 & 2.1894 \end{bmatrix}$ 에 대해 P_{opt}=15의 광출력을 사용할 경우에 대한 실시 예를 보여준다. 위의 채널을 특이값 분해 할 경우에 다음과 같다.

수학식 43

[0131] $$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} -0.8115 & 0.5843 \\ 0.5843 & 0.8115 \end{bmatrix}, \quad \Lambda = \begin{bmatrix} 0.6956 & 0 \\ 0 & 3.4464 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} -0.6757 & 0.7372 \\ 0.7372 & 0.6757 \end{bmatrix}$$

[0132] 비트 오류률은 10^{-3}을 가정하였을 때, K=0.4344가 되고, 이 때, 수학식 38에 따라 값을 구하면 $p_1' = 0.3469$, $\Delta_1 = 3.9878$, $\Delta_2 = 6.6288$ 로 계산될 수 있다. 이 값을 수학식 39에 대입하여 $p_1' = 0.3469$와 $p_2' = 10.6016$를 얻을 수 있다. 또한 수학식 40에 대입하여 $k_1 = 1.1409$ 비트와 $k_2 = 3.4496$ 비트의 전송률을 얻을 수 있고 이에 따라 각 변조기에서 최소한 2-PAM과 8-PAM이 사용될 수 있다.

[0133] 이 때 각 오프셋 값에 따라 두 신호의 중심이 변한 신호 파형이 왼쪽에 나타나 있다. 왼쪽 위의 신호에는 2-PAM에 $p_1' = 0.3469$ 의 오프셋이 더해진 것을 볼 수 있고, 왼쪽 아래의 신호에는 8-PAM에 $p_2' = 10.6016$의 오프셋이 더해진 것을 볼 수 있다. 또한 오른쪽은 신호 파형들은 송신 매트릭스 V를 거친 후 볼 수 있는 신호 파형으로 세기 변조를 이용하였을 경우 만족시켜야 하는 x(t)>0의 조건을 충족시키고 있다는 것을 보여준다.

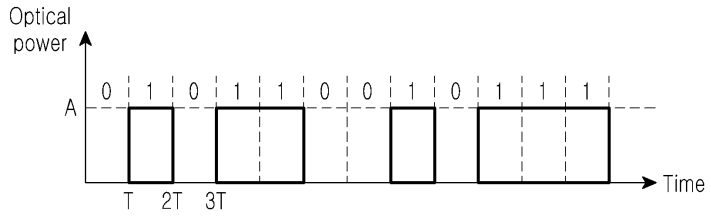
[0134] 도 8은 본 발명의 일 실시 예에 따른 평균 전송률의 변화를 나타낸 그래프이다.

[0135] 광출력 값 P_{opt}에 따라 평균 전송률의 변화를 모의 실험을 통해 살펴보았다. 모의 실험에 사용한 H의 분포는 Rayleigh amplitude 분포를 따른다고 임의로 가정하였다. 모의 실험에서 가정한 타겟 비트 오류율은 10^{-3}이다. 이 때, 제안한 방법과 같이 최적화된 p'와 Δ*를 사용하는 경우와 동일한 $\Delta, (\Delta_1 = \Delta_2)$를 사용하는 경우를 비교하였다. 최적화 문제를 풀 경우에 $\Delta_1 + \Delta_2 \le \frac{P_{opt}}{\nu_{12} + \nu_{22}}$ 인 조건에 따라서 $\Delta_1 = \Delta_2 = \frac{P_{opt}}{2(\nu_{12} + \nu_{22})}$ 로 동일한 경우에 대한 값을 구할 수 있고 이 값을 이용하여 전송하였을 경우를 최적화된 경우와 비교하였다. 그림과 같이 최적화된 Δ*를 사용하는 경우가 낮은 광출력 값에 비하여 최대 2 dB 이득을 보인다는 것을 볼 수 있다. 이는 동일한 전송률을 보낼 수 있는 시스템을 구성할 경우 최대 2dB의 광출력 값을 절약할 수 있다는 것을 의미한다.

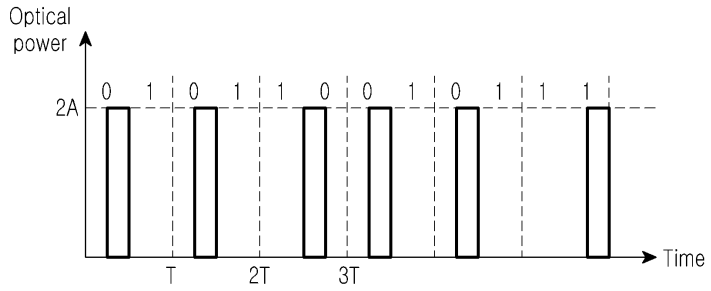
[0136] 한편 상기한 본 발명의 설명에서는 구체적인 실시 예에 관해 설명하였으나 여러 가지 변형이 본 발명의 범위를 벗어나지 않고, 실시될 수 있다. 따라서 본 발명의 범위는 설명된 실시 예에 의하여 정할 것이 아니고 청구범위와 청구범위의 균등한 것에 의하여 정하여져야 할 것이다.

도면

도면1

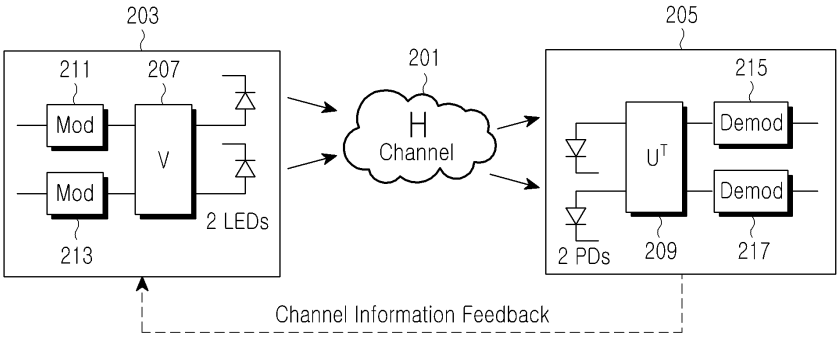


(a) On-Off Keying

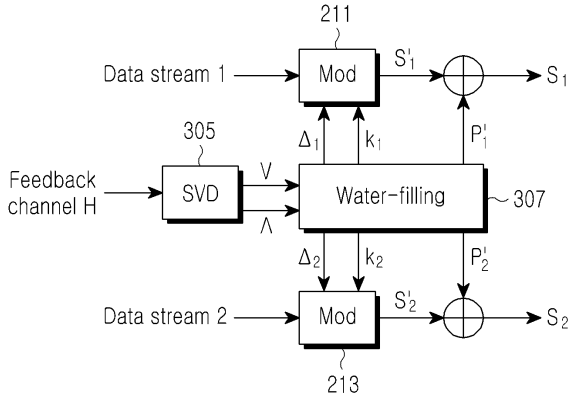


(b) 4 Pulse Position Modulation

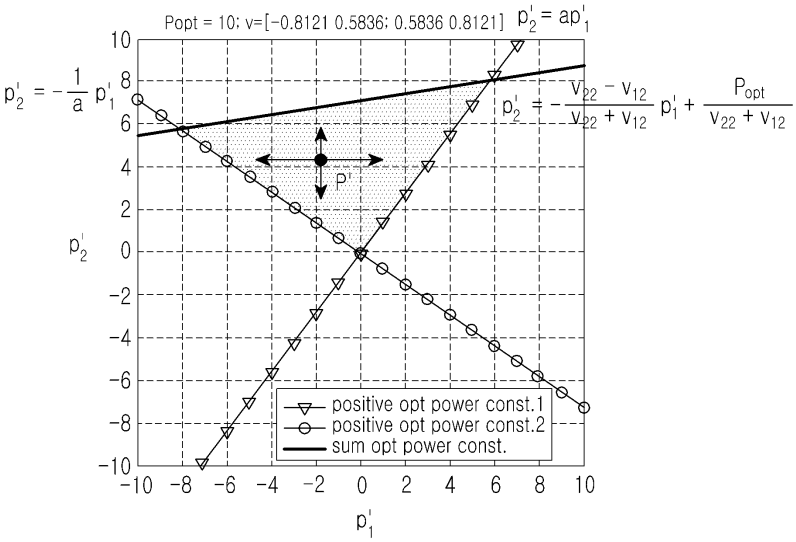
도면2


203
211
207
Mod
Mod
V
2 LEDs
213
201
H
Channel
205
215
Demod
Demod
U^T
2 PDs
209
217
Channel Information Feedback

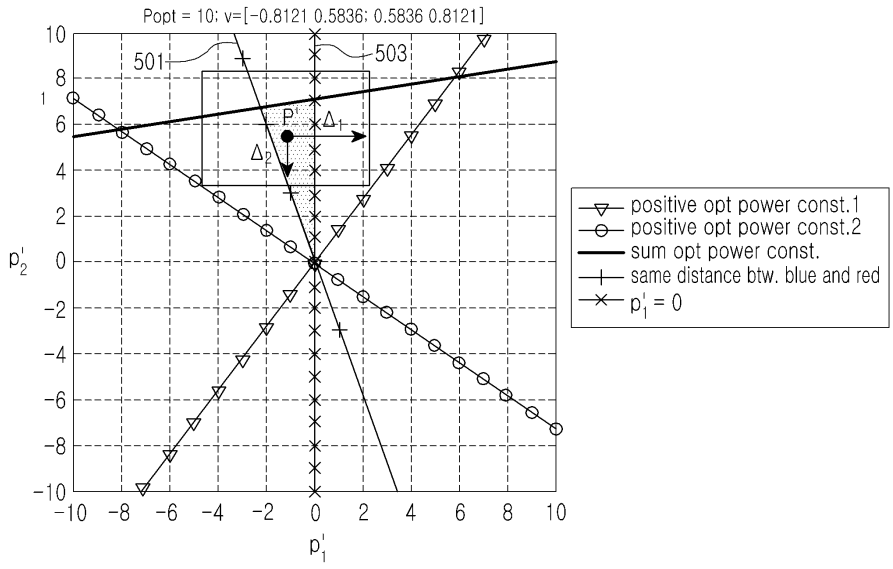
도면3


211
Data stream 1
Mod
S'1
S1
305
Δ1
k1
P'1
Feedback channel H
SVD
V
Λ
Water-filling
307
Δ2
k2
P'2
Data stream 2
Mod
S'2
S2
213

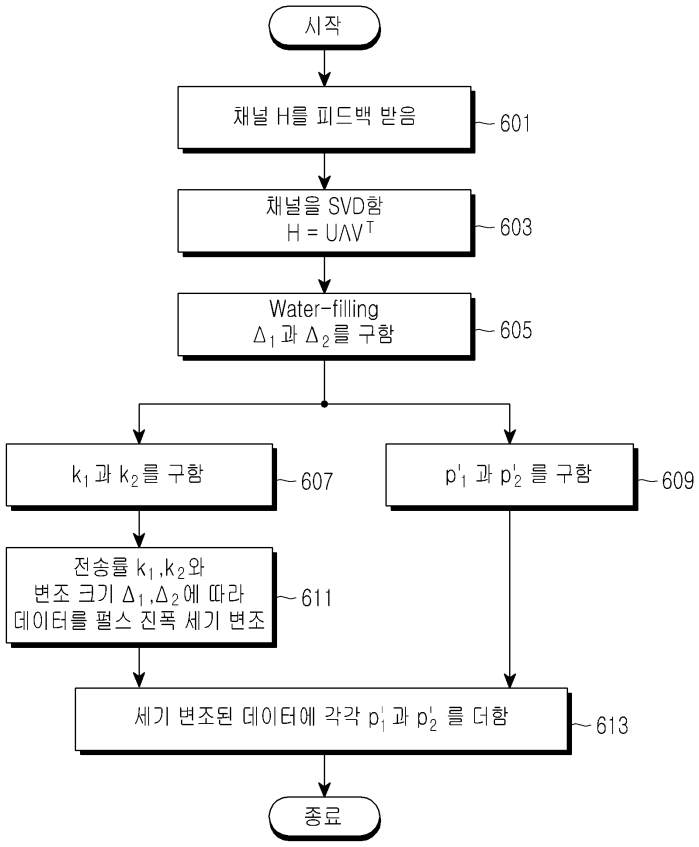
도면4


Popt = 10; v=[-0.8121 0.5836; 0.5836 0.8121]
p'2 = ap'1
p'2 = -1/a p'1
p'2 = -(v22 - v12)/(v22 + v12) p'1 + Popt/(v22 + v12)
P'
p'2
p'1
positive opt power const.1
positive opt power const.2
sum opt power const.

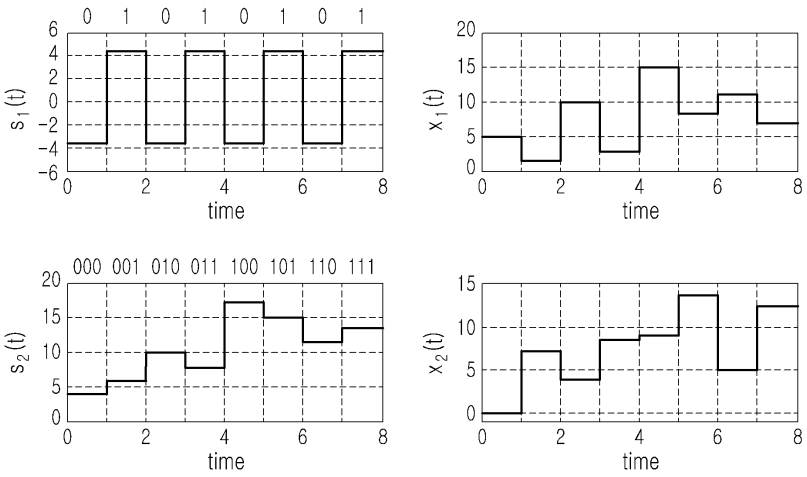
도면5


Popt = 10; v=[-0.8121 0.5836; 0.5836 0.8121]
501
503
P'
Δ1
Δ2
positive opt power const.1
positive opt power const.2
sum opt power const.
same distance btw. blue and red
p'1 = 0
p'2
p'1

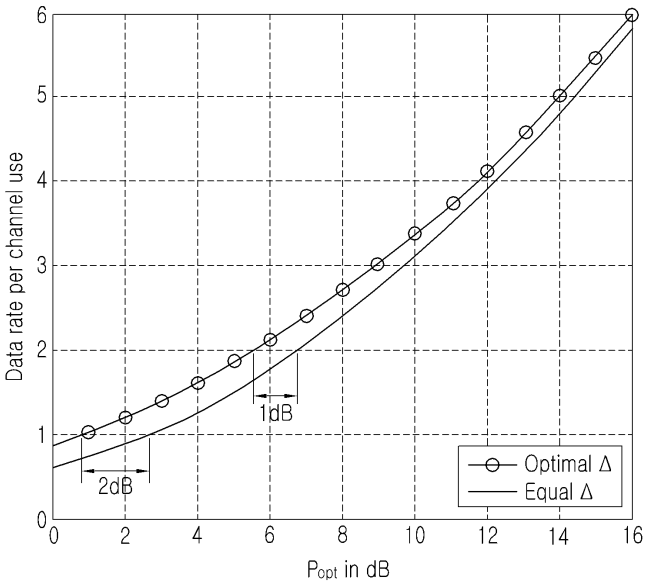
도면6


시작
채널 H를 피드백 받음
601
채널을 SVD함
H = UΛV^T
603
Water-filling
Δ1 과 Δ2를 구함
605
k1 과 k2를 구함
607
p'1 과 p'2 를 구함
609
전송률 k1,k2와
변조 크기 Δ1,Δ2에 따라
데이터를 펄스 진폭 세기 변조
611
세기 변조된 데이터에 각각 p'1 과 p'2 를 더함
613
종료

도면7


0 1 0 1 0 1 0 1
$s_1(t)$
time
$x_1(t)$
time
000 001 010 011 100 101 110 111
$s_2(t)$
time
$x_2(t)$
time

도면8


Data rate per channel use
P_{opt} in dB
1dB
2dB
Optimal Δ
Equal Δ