



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2015년11월25일

(11) 등록번호 10-1571998

(24) 등록일자 2015년11월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H04B 7/155 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H04B 7/15542 (2013.01)

H04B 7/0456 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2015-0030740

(22) 출원일자 2015년03월05일

심사청구일자 2015년03월05일

(56) 선행기술조사문헌

KR1020130017832 A*

KR1020140077758 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

고려대학교 산학협력단

서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)

(72) 발명자

이인규

서울특별시 강남구 선릉로 221, 302동 404호 (도곡동, 도곡렉슬아파트)

공한배

서울특별시 용산구 백범로90길 26, 101동 907호 (문배동, 용산아크로타워)

(74) 대리인

송인호, 최관락

전체 청구항 수 : 총 5 항

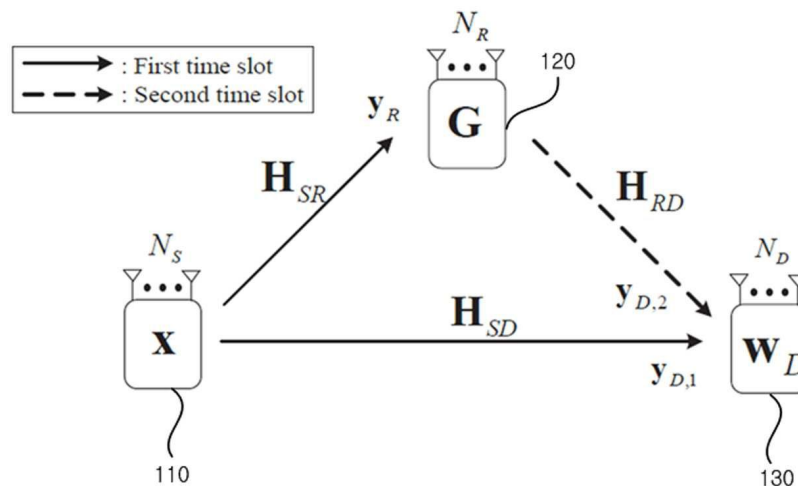
심사관 : 신상길

(54) 발명의 명칭 릴레이 필터 결정 방법 및 릴레이

(57) 요약

릴레이 필터 결정 방법 및 이를 위한 릴레이가 개시된다. 직접 링크를 고려한 릴레이 환경에서 데이터 추정 오류를 최소화할 수 있도록 릴레이 필터를 결정하는 방법은 (a) 릴레이 송신 공분산 행렬의 고유치 중 최대값이 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워 이하가 되도록 릴레이에서의 파워 제한 조건을 설정하는 단계; 및 (b) 상기 설정된 파워 제한 조건에 따라 상기 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워를 이용하여 릴레이 송신 필터를 결정하는 단계를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H04B 7/15521 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2014R1A2A1A10049769

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 중견연구자지원

연구과제명 Eigen-inference 기법에 기반한 자율적 재난 통신 시스템 설계

기 여 율 1/1

주관기관 고려대학교 산학협력단

연구기간 2014.11.01 ~ 2015.10.31

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

직접 링크를 고려한 릴레이 환경에서 데이터 추정 오류를 최소화할 수 있도록 릴레이 필터를 결정하는 방법에 있어서,

(a) 릴레이 송신 공분산 행렬의 고유치 중 최대값이 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워 이하가 되도록 릴레이에서의 파워 제한 조건을 설정하는 단계; 및

(b) 상기 설정된 파워 제한 조건에 따라 상기 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워를 이용하여 릴레이 송신 필터를 결정하는 단계를 포함하되,

상기 송신 공분산 행렬은 상기 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워와 릴레이-수신 장치 사이의 채널을 이용하여 계산되는 것을 특징으로 하는 릴레이 필터 결정 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1 항에 있어서,

상기 (b) 단계는, 릴레이와 수신 장치의 채널 정보 및 채널 행렬을 더 이용하여 결정되는 것을 특징으로 하는 릴레이 필터 결정 방법.

청구항 4

제1 항에 있어서,

상기 릴레이 송신 필터는 하기 수학적식을 이용하여 결정되는 것을 특징으로 하는 릴레이 필터 결정 방법.

$$\mathbf{F}_R = \sqrt{P_{peak}} \tilde{\mathbf{U}}_{RD} \mathbf{\Lambda}_v^{-1/2} \mathbf{U}_v^H \tilde{\mathbf{U}}_\omega^H$$

여기서, $\mathbf{F}_R$ 는 릴레이 송신 필터를 나타내고, P_{peak} 는 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워를 나타내

고, $\tilde{\mathbf{U}}_{RD}$ 는 릴레이와 수신 장치의 채널의 방향을 나타내고, $\mathbf{U}_v^H \tilde{\mathbf{U}}_\omega^H$ 는 릴레이 환경의 채널로부터 계산되

는 행렬을 나타내고, $\mathbf{\Lambda}_v^{-1/2}$ 는 파워 행렬을 나타냄.

청구항 5

제1 항에 있어서, 상기 (b) 단계 이후에,

상기 결정된 릴레이 송신 필터를 이용하여 송신 장치에서 수신된 수신 신호를 수신 장치로 전송하는 단계를 더 포함하는 릴레이 필터 결정 방법.

청구항 6

직접 링크를 고려한 릴레이 환경에서 데이터 추정 오류를 최소화할 수 있도록 릴레이 필터를 결정하는 릴레이에 있어서,

릴레이 송신 공분산 행렬의 고유치 중 최대값이 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워 이하가 되도록 릴레이에서의 파워 제한 조건을 설정하는 설정부; 및

상기 설정된 파워 제한 조건에 따라 상기 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워를 이용하여 릴레이 송신 필터를 결정하는 결정부를 포함하되,

상기 송신 공분산 행렬은 상기 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워와 릴레이-수신 장치 사이의 채널을 이용하여 계산되는 것을 특징으로 하는 릴레이.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 무선 통신 시스템에 관한 것으로, 보다 상세하게 릴레이 중계 통신에서의 릴레이 필터 결정 방법 및 릴레이에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 다중 송수신 안테나를 사용하는 다중송수신(MIMO: multiple-input multiple-output, 이하 MIMO라 칭하기로 함) 기술을 중계 기술에 도입하기 위한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 이러한 MIMO(multiple-input multiple output) 무선 시스템은 스펙트럼 효율과 통신 안정성 향상에 연구가 집중되고 있다. 최근 중계 시스템은 무선 페이딩 경량화와 링크 성능 향상의 효율적인 기술로 간주되고 있다. 이로 인해, MIMO 중계 시스템에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

[0003] 종래의 릴레이 중계 시스템의 MSE(Mean squared Error)를 최소화하기 위한 릴레이 송신 기법으로는, C. Song, K.-J. Lee, and I. Lee, "MMSE ?based MIMO Cooperative Relaying Systems" Closed-form Designs and Outage Behavior", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 30, pp. 1390-1401, September 2012이 제안되었다. 이는 직접링크를 고려한 릴레이 환경에서 릴레이에서 이용 가능한 전체 최대 송신 파워 제약을 고려하는 것으로, 이는 릴레이 송신 공분산 벡터의 대각 원소들의 합에 제약을 두는 것으로, 각 안테나의 파워 제약을 고려하지 못하므로 실제 시스템에는 적합하지 않은 단점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 본 발명은 릴레이 중계 통신에서의 릴레이 필터 결정 방법 및 이를 위한 릴레이를 제공하기 위한 것이다.

[0005] 또한, 본 발명은 릴레이 송신 공분산 벡터의 고유치 중 최대값을 이용하여 릴레이 송신 필터를 결정할 수 있는 릴레이 필터 결정 방법 및 이를 위한 릴레이를 제공하기 위한 것이다.

[0006] 또한, 본 발명은 릴레이의 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워 제약을 고려하여 릴레이 필터를 결정할 수 있는 릴레이 필터 결정 방법 및 이를 위한 릴레이를 제공하기 위한 것이다.

[0007] 또한, 본 발명은 낮은 복잡도를 가지는 폐쇄형(closed-form) 릴레이 송신 기법을 통해 릴레이 설치 비용 및 통신 지연을 크게 줄일 수 있는 릴레이 필터 결정 방법 및 이를 위한 릴레이를 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 발명의 일 측면에 따르면, 릴레이 송신 공분산 벡터의 고유치 중 최대값을 이용하여 릴레이 송신 필터를 결정할 수 있는 릴레이 필터 결정 방법이 제공된다.

[0009] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 직접 링크를 고려한 릴레이 환경에서 데이터 추정 오류를 최소화할 수 있도록 릴레이 필터를 결정하는 방법에 있어서, (a) 릴레이 송신 공분산 행렬의 고유치 중 최대값이 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워 이하가 되도록 릴레이에서의 파워 제한 조건을 설정하는 단계; 및 (b) 상기 설정된 파워 제한 조건에 따라 상기 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워를 이용하여 릴레이 송신 필터를 결정하는 단계를 포함하는 릴레이 필터 결정 방법이 제공될 수 있다.

[0010] 상기 송신 공분산 행렬은 상기 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워와 릴레이-수신 장치 사이의 채널을 이용하여 계산될 수 있다.

[0011] 상기 (b) 단계는, 릴레이와 수신 장치의 채널 정보 및 채널 행렬을 더 이용하여 결정될 수 있다.

[0012] 상기 릴레이 송신 필터는 하기 수학적식을 이용하여 결정되되,

$$\mathbf{F}_R = \sqrt{P_{peak}} \tilde{\mathbf{U}}_{RD} \mathbf{\Lambda}_v^{-1/2} \mathbf{U}_v^H \tilde{\mathbf{U}}_\omega^H$$

[0013] 여기서, $\mathbf{F}_R$ 는 릴레이 송신 필터를 나타내고, P_{peak} 는 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워를 나타내고, $\tilde{\mathbf{U}}_{RD}$ 는 릴레이와 수신 장치의 채널의 방향을 나타내고, $\mathbf{U}_v^H \tilde{\mathbf{U}}_\omega^H$ 는 릴레이 환경의 채널로부터 계산되는 행렬을 나타내고, $\mathbf{\Lambda}_v^{-1/2}$ 는 파워 행렬을 나타낸다.

[0015] 상기 (b) 단계 이후에, 상기 결정된 릴레이 송신 필터를 이용하여 송신 장치에서 수신된 수신 신호를 수신 장치로 전송하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0016] 본 발명의 다른 측면에 따르면, 릴레이 송신 공분산 벡터의 고유치 중 최대값을 이용하여 릴레이 송신 필터를 결정할 수 있는 릴레이가 제공된다.

[0017] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 직접 링크를 고려한 릴레이 환경에서 데이터 추정 오류를 최소화할 수 있도록 릴레이 필터를 결정하는 릴레이에 있어서, 릴레이 송신 공분산 행렬의 고유치 중 최대값이 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워 이하가 되도록 릴레이에서의 파워 제한 조건을 설정하는 설정부; 및 상기 설정된 파워 제한 조건에 따라 상기 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워를 이용하여 릴레이 송신 필터를 결정하는 결정부를 포함하는 릴레이가 제공될 수 있다.

발명의 효과

[0018] 본 발명의 일 실시예에 따른 릴레이 필터 결정 방법 및 릴레이를 제공함으로써, 릴레이 송신 공분산 벡터의 고유치 중 최대값을 이용하여 릴레이 송신 필터를 결정할 수 있다.

[0019] 또한, 본 발명은 릴레이의 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워 제약을 고려하여 릴레이 필터를 결정할 수 있다.

[0020] 또한, 본 발명은 낮은 복잡도를 가지는 폐쇄형(closed-form) 릴레이 송신 기법을 통해 릴레이 설치 비용 및 통신 지연을 크게 줄일 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0021] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 무선 통신 시스템을 개략적으로 도시한 도면.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 릴레이에서 릴레이 필터를 결정하는 방법을 나타낸 순서도.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 릴레이 내부 구성을 개략적으로 도시한 블록도.

도 4는 종래와 본 발명의 일 실시예에 따른 BER 성능을 비교한 그래프.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0022] 본 발명은 다양한 변환을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변환, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.
- [0023] 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다.
- [0024] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0025] 이하, 본 발명의 실시예를 첨부한 도면들을 참조하여 상세히 설명하기로 한다.
- [0026] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 무선 통신 시스템을 개략적으로 도시한 도면이다.
- [0027] 도 1을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 무선 통신 시스템은 송신 장치(110), 릴레이(120) 및 수신 장치(130)를 포함하여 구성된다.
- [0028] 또한, 송신 장치(110), 릴레이(120) 및 수신 장치(130)는 각각 복수의 안테나를 구비하는 것을 가정하기로 한다. 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 무선 통신 시스템은 송신 장치(110)와 수신 장치(130)간에 직접 링크를 통해 데이터를 송수신할 수 있다. 또한, 무선 통신 시스템은 도 1에 도시된 바와 같이, 수신 장치(130)와 송신 장치(110) 사이에 위치한 릴레이(120)를 통해 데이터를 송수신할 수도 있다.
- [0029] 이때, 본 발명의 일 실시예에 따른 릴레이(120)는 데이터 송신과 수신을 동시에 수행하지 못하는 것을 가정하기로 한다. 따라서 릴레이(120)를 통해 데이터 송신은 전체 두 타임 슬롯(time slot)을 통해 수행될 수 있다. 즉, 제1 타임 슬롯(time slot)에서는 소스(즉, 송신 장치(110))가 릴레이(120)와 데스티네이션(수신 장치(130))로 각각 데이터를 전송할 수 있다. 이어, 제2 타임 슬롯(time slot)에서 릴레이(120)가 데스티네이션(수신 장치(130))로 데이터를 전송한다.
- [0030] 제1 타임 슬롯에서 릴레이(120)와 수신 장치(130)가 각각 수신하는 수신 신호는 수학식 1 및 수학식 2와 같다.

수학식 1

[0031]

$$\mathbf{y}_R = \mathbf{H}_{SR}\mathbf{x} + \mathbf{n}_R$$

[0032]

여기서, $\mathbf{y}_R$ 는 릴레이에서 수신된 수신 신호를 나타내고, $\mathbf{H}_{SR} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_S}$ 는 송신 장치와 릴레이간의 채널을 나타내며, N_S 는 송신 장치(110)의 안테나 개수를 나타내고, N_R 는 릴레이의 안테나 개수를 나타내며, $\mathbf{n}_R \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ 은 릴레이에서의 평균이 0이고, 분산이 1인 복소 백색 가우시안 노이즈 벡터를 나타내며, $\mathbf{x}$ 는 전송하고자 하는 데이터 벡터를 나타낸다.

수학식 2

$$\mathbf{y}_{D,1} = \mathbf{H}_{SD}\mathbf{x} + \mathbf{n}_{D,1}$$

여기서, $\mathbf{y}_{D,1}$ 는 수신 장치에서 수신된 수신 신호를 나타내고, $\mathbf{H}_{SD} \in \mathbb{C}^{N_D \times N_S}$ 는 송신 장치와 수신 장치간의 채널을 나타내며, N_D 는 수신 장치의 안테나 개수를 나타내고, $\mathbf{n}_{D,1} \in \mathbb{C}^{N_D \times 1}$ 는 수신 장치에서의 평균이 0이고, 분산이 1인 복소 백색 가우시안 노이즈 벡터를 나타낸다.

이때, 송신 장치(110)에서의 파워 제약은 $E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = \rho \mathbf{I}_{N_S}$ 과 같다. 여기서, $\rho \triangleq P_T/N_S$ 이고, P_T 는 송신 장치에서 사용 가능한 총 파워를 나타낸다.

제2 타임 슬롯에서 릴레이(120)는 제1 타임 슬롯을 통해 송신 장치(110)를 통해 수신된 수신 신호에 릴레이 필터를 곱한 후 수신 장치(130)로 전송한다. 제2 타임 슬롯에서 수신 장치(130)에서 수신된 수신 신호는 수학식 3과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 3

$$\mathbf{y}_{D,2} = \mathbf{H}_{RD}\mathbf{G}\mathbf{y}_R + \mathbf{n}_{D,2}$$

여기서, $\mathbf{y}_{D,2}$ 는 제2 타임 슬롯에서 수신 장치에서 수신된 수신 신호를 나타내고, $\mathbf{H}_{RD} \in \mathbb{C}^{N_D \times N_R}$ 는 릴레이와 수신 장치간의 채널을 나타내고, $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_R}$ 는 릴레이 필터를 나타내며, $\mathbf{n}_{D,2} \in \mathbb{C}^{N_D \times 1}$ 는 제2 타임 슬롯에서 수신 장치에서의 평균이 0이고, 분산이 1인(단위 분산) 백색 가우시안 노이즈 벡터를 나타낸다.

두 타임 슬롯 동안(즉, 제1 타임 슬롯과 제2 타임 슬롯) 수신 장치(130)에서 수신된 수신 신호를 하나의 벡터로 나타내면 수학식 4와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 4

$$\mathbf{y}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{D,1} \\ \mathbf{y}_{D,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{SD} \\ \mathbf{H}_{RD}\mathbf{G}\mathbf{H}_{SR} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{D,1} \\ \mathbf{n}_D \end{bmatrix}$$

여기서, $\mathbf{n}_D = \mathbf{H}_{RD}\mathbf{G}\mathbf{n}_R + \mathbf{n}_{D,2}$ 는 공분산 매트릭스($\mathbf{R}_{n_D} = \mathbf{H}_{RD}\mathbf{G}\mathbf{G}^H\mathbf{H}_{RD}^H + \mathbf{I}_{N_D}$)를 가지는 제2 타임 슬롯에서의 실효 노이즈 벡터를 나타내고, $\mathbf{I}_{N_D}$ 는 크기가 N_D 인 단위 행렬을 나타낸다.

본 발명의 일 실시예에서는 송신 장치(110)와 수신 장치(130)에서 파워 제약이 있다고 가정하며, 데이터 벡터의 공분산은 $E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = \rho \mathbf{I}_{N_S}$ 과 같다고 가정한다. 이와 같은 가정에 따라 송신 장치(110)에서의 각 안테나 파워 제약이 ρ 로 일정하다는 것을 의미한다.

[0043] 마지막으로, 수신 장치(130)에서는 수신 필터($\mathbf{W}_D \in \mathbb{C}^{N_S \times 2N_D}$)를 적용하여 전송된 데이터($\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W}_D \mathbf{y}_D$)를 추정할 수 있다.

[0044] 종래 기술에서 가정한 릴레이(120)에서의 파워 제약은 수학식 5와 같다.

수학식 5

[0045]
$$\text{Tr}(\mathbf{G}(\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{G}^H) \leq P_R$$

[0046] 여기서, P_R 은 릴레이(120)에서 사용 가능한 총 파워를 나타내고, $\mathbf{I}_{N_R}$ 는 크기가 N_R 인 단위벡터를 나타낸다. 릴레이(120)에서 송신 벡터 공분산($\mathbf{G}(\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{G}^H$)의 i 번째 대각 원소 $[\mathbf{G}(\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{G}^H]_{i,i}$ 는 i 번째 안테나에서 사용하는 파워와 동일하다. 그러므로 공분산 대각 원소들의 합에 제약을 두는 것은 각 안테나의 파워 제약을 고려하지 못하므로 실제 시스템에 적합하지 않은 문제점이 있다.

[0047] 각 안테나에서의 파워 제약은 각 안테나에서 사용하는 파워의 최대값에 제약을 둬으로써 만족시킬 수 있다. 이를 수학식으로 나타내면 수학식 6과 같다.

수학식 6

[0048]
$$\max_i [\mathbf{G}(\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{G}^H]_{i,i} \leq P_{peak}$$

[0049] 여기서, P_{peak} 는 각 안테나에서 사용 가능한 최대 출력 파워를 나타낸다. 이와 같은 파워 제약을 고려하여 릴레이 송신 기법을 설계해야 하나, 상기와 같은 복잡한 파워 제약을 고려한 상황에서 릴레이 송신 기법을 도출하는 것은 매우 어렵다.

[0050] 따라서, 본 발명의 일 실시예에서는 송신 벡터 공분산의 고유치 중 최대값(MVC: maximum eigenvalue constraint) 제약을 고려한다. 즉, 본 발명의 일 실시예에 따르면, MVC는 릴레이 송신 벡터 공분산의 고유치 중 최대값에 제약을 두는 것이다. 이를 수학식으로 나타내면 수학식 7과 같다.

수학식 7

[0051]
$$\lambda_{max}(\mathbf{G}(\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{G}^H) \leq P_{peak}$$

[0052] 여기서, $\lambda_{max}(\mathbf{A})$ 는 송신 벡터 공분산의 고유치 중 최대값을 나타낸다. 릴레이 송신 벡터 공분산은 양의 준정부호행렬(positive semi-definite matrix)이며, 이는 수학식 8과 같은 특성을 가지고 있다.

수학식 8

[0053]
$$\max_i [\mathbf{A}]_{i,i} \leq \lambda_{max}(\mathbf{A})$$

[0054] 여기서, $\mathbf{A} \in \mathbb{S}^N$ 는 임의의 준정부호행렬이다. 즉, 릴레이 송신 벡터 공분산은 모든 고유값이 음수가 아닌 특성을 가지며, 릴레이 송신 벡터 공분산은 고유치 중 최대값보다 작은 특성을 가진다.

[0055] 따라서, MVC를 고려한 릴레이 송신 기법은 항상 최대 파워 제약을 만족하는 것을 알 수 있다.

[0056] 릴레이 필터가 주어진 상황에서 릴레이 환경의 MSE를 최소화하는 최적의 수신 벡터는 수학식 9와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 9

[0057]
$$\mathbf{W}_D = (\mathbf{H}_{SR}^H \mathbf{G}^H \mathbf{H}_{RD}^H \mathbf{R}_{n_D}^{-1} \mathbf{H}_{RD} \mathbf{G} \mathbf{H}_{SR} + \Psi^{-1})^{-1} \mathbf{H}_w^H$$

[0058] 여기서, $\Psi \triangleq (\mathbf{H}_{SD}^H \mathbf{H}_{SD} + \rho^{-1} \mathbf{I}_{N_S})^{-1}$ 이고, $\mathbf{H}_w \triangleq [\mathbf{H}_{SD}^T (\mathbf{R}_{n_D}^{-1} \mathbf{H}_{RD} \mathbf{G} \mathbf{H}_{SR})^T]^T$ 이다.

[0059] 본 발명의 일 실시예에서, 수신 장치(130)가 수학식 9와 같은 수신 벡터를 사용한다고 가정하자. 이때, 시스템 에러 벡터를 $\mathbf{e} \triangleq \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x} = \mathbf{W}_D \mathbf{y}_D - \mathbf{x}$ 로 정의하면, 에러 공분산 행렬($\mathbf{R}_e(\mathbf{G}) \triangleq E[\mathbf{e} \mathbf{e}^H]$)는 수학식 10과 같다.

수학식 10

[0060]
$$\mathbf{R}_e(\mathbf{G}) = (\mathbf{H}_{SR}^H \mathbf{G}^H \mathbf{H}_{RD}^H \mathbf{R}_{n_D}^{-1} \mathbf{H}_{RD} \mathbf{G} \mathbf{H}_{SR} + \Psi^{-1})^{-1}$$

[0061] 시스템 MSE는 $\text{Tr}(\mathbf{R}_e(\mathbf{G}))$ 이며, 본 발명의 일 실시예에서는 이 값을 최소화하는 것을 목표로 한다.

[0062] 릴레이 필터($\mathbf{G}$)는 최적성의 손실 없이 항상 $\mathbf{G} = \mathbf{G}_{\parallel} + \mathbf{G}_{\perp}$ 과 같이 쓸 수 있다. 여기서, $\mathbf{G}_{\parallel}$ 와 $\mathbf{G}_{\perp}$ 는 각각 $\mathbf{G}$ 의 성분 중에서 $\mathbf{H}_{SR}$ 컬럼 스페이스(column space)와 평행 또는 직교하는 로우 스페이스를 가지는 성분을 나타낸다. $\mathbf{G} = \mathbf{G}_{\parallel} + \mathbf{G}_{\perp}$ 를 수학식 10에 대입하여 시스템의 MSE를 계산하면 수학식 11과 같이 정리될 수 있다.

수학식 11

[0063]
$$\begin{aligned} \text{Tr}(\mathbf{R}_e(\mathbf{G})) &= \text{Tr} \left(\left(\mathbf{H}_{SR}^H \mathbf{G}_{\parallel}^H \mathbf{H}_{RD}^H (\mathbf{H}_{RD} (\mathbf{G}_{\parallel} \mathbf{G}_{\parallel}^H + \mathbf{G}_{\perp} \mathbf{G}_{\perp}^H) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \mathbf{H}_{RD}^H + \mathbf{I}_{N_D} \right)^{-1} \mathbf{H}_{RD} \mathbf{G}_{\parallel} \mathbf{H}_{SR} + \Psi^{-1} \right)^{-1} \Big) \\ &\geq \text{Tr} \left(\left(\mathbf{H}_{SR}^H \mathbf{G}_{\parallel}^H \mathbf{H}_{RD}^H (\mathbf{H}_{RD} \mathbf{G}_{\parallel} \mathbf{G}_{\parallel}^H \mathbf{H}_{RD}^H \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \mathbf{I}_{N_D} \right)^{-1} \mathbf{H}_{RD} \mathbf{G}_{\parallel} \mathbf{H}_{SR} + \Psi^{-1} \right)^{-1} \Big) \\ &= \text{Tr}(\mathbf{R}_e(\mathbf{G}_{\parallel})) \end{aligned}$$

[0064] 수학식 11은 양의 준정부호행렬 $\mathbf{A}$ 와 $\mathbf{B}$ 에 대해 $\mathbf{A} \succeq \mathbf{B}$ 면, $\text{Tr}(\mathbf{A}) \geq \text{Tr}(\mathbf{B})$ 이라는 사실에 기초하여 유도

된 수학적식이다. 송신 공분산 매트릭스는 수학적식 12와 같이 나타낼 수 있다.

수학적식 12

$$\begin{aligned} & \mathbf{G}(\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{G}^H \\ &= (\mathbf{G}_{\parallel} + \mathbf{G}_{\perp}) (\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) (\mathbf{G}_{\parallel} + \mathbf{G}_{\perp})^H \\ &= \mathbf{G}_{\parallel} (\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{G}_{\parallel}^H + \mathbf{G}_{\perp} \mathbf{G}_{\perp}^H \\ &\succeq \mathbf{G}_{\parallel} (\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{G}_{\parallel}^H. \end{aligned}$$

이때, $\mathbf{A} \succeq \mathbf{B}$ 라는 것은, $\lambda_{\max}(\mathbf{A}) \geq \lambda_{\max}(\mathbf{B})$ 를 나타내므로, 이는 다시 수학적식 13과 같이 나타낼 수 있다.

수학적식 13

$$\begin{aligned} & \lambda_{\max}(\mathbf{G}(\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{G}^H) \\ & \geq \lambda_{\max}(\mathbf{G}_{\parallel} (\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{G}_{\parallel}^H) \end{aligned}$$

그러므로, 일반적인 손실 없이, $\mathbf{G}_{\perp} = \mathbf{0}$ 으로 설정할 수 있다. 또한, $\mathbf{H}_{SR}^H \mathbf{H}_{SR} + \mathbf{H}_{SD}^H \mathbf{H}_{SD} + \rho^{-1} \mathbf{I}_{N_S}$ 는 비특이성을 가진다. 또한, $\mathbf{G}_{\parallel}$ 의 로우 스페이스는 $\mathbf{H}_{SR}$ 의 컬럼 스페이스와 평행하므로, 릴레이 필터는 수학적식 14와 같이 정리될 수 있다.

수학적식 14

$$\mathbf{G} = \mathbf{F}_R \mathbf{W}_R$$

여기서, $\mathbf{W}_R \triangleq (\mathbf{H}_{SR}^H \mathbf{H}_{SR} + \mathbf{H}_{SD}^H \mathbf{H}_{SD} + \rho^{-1} \mathbf{I}_{N_S})^{-1} \mathbf{H}_{SR}^H$ 이고, $\mathbf{F}_R$ 는 임의의 행렬을 나타낸다.

수학적식 14를 수학적식 10에 대입하여 정리하면, 예리 공분산 행렬은 수학적식 15와 같이 정리될 수 있다.

수학적식 15

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_e(\mathbf{F}_R) &= (\mathbf{H}_{SR}^H \mathbf{H}_{SR} + \mathbf{H}_{SD}^H \mathbf{H}_{SD} + \rho^{-1} \mathbf{I}_{N_S})^{-1} \\ &+ \tilde{\mathbf{U}}_{\omega} \left(\tilde{\mathbf{U}}_{\omega}^H \mathbf{F}_R^H \mathbf{H}_{RD}^H \mathbf{H}_{RD} \mathbf{F}_R \tilde{\mathbf{U}}_{\omega} + \tilde{\Lambda}_{\omega}^{-1} \right)^{-1} \tilde{\mathbf{U}}_{\omega}^H. \end{aligned}$$

여기서, $\mathbf{\Omega} \triangleq \mathbf{W}_R \mathbf{H}_{SR} \mathbf{\Psi}$ 이며, 이 행렬의 고유치 분해(EVD: eigenvalue decomposition)는 $\mathbf{\Omega} = \mathbf{U}_{\omega} \mathbf{\Lambda}_{\omega} \mathbf{U}_{\omega}^H$ 이고, $\mathbf{U}_{\omega}$ 는 유니터리 행렬(unitary matrix)이며, $\mathbf{\Lambda}_{\omega}$ 는 i번째 대각 원소가 $\lambda_{\omega,i}$ 인 대각

행렬을 나타내고, $\lambda_{\omega,i}$ 는 Ω 의 고유치들 중 i 번째 큰 고유치를 나타낸다. $M = \min(N_S, N_R)$ 이며, $\tilde{\mathbf{U}}_{\omega}$ 는 $\mathbf{U}_{\omega}$ 의 첫번째부터 M 번째까지의 컬럼으로 구성된 행렬을 나타내고, $\tilde{\Lambda}_{\omega}$ 는 Λ_{ω} 의 좌상측(upper-left) $M \times M$ 행렬을 나타낸다.

[0074] 수학식 15에서 보여지는 바와 같이, $\mathbf{F}_R$ 은 수학식 15의 두번째 항인 에러 공분산 메트릭스의 값에만 영향을 미치므로, 본 발명의 일 실시예에서는 수학식 15의 두번째 항의 에러 공분산 메트릭스의 값에 의한 MSE를 최소화하는 것에 집중하였다.

[0075] 수학식 9 내지 수학식 15의 수식을 이용하여 릴레이 송수신 설계에서 MSE를 최소화하는 문제를 정리하면 수학식 16과 같다.

수학식 16

[0076]
$$\min_{\mathbf{F}_R} \text{Tr} \left(\left(\tilde{\mathbf{U}}_{\omega}^H \mathbf{F}_R^H \mathbf{H}_{RD}^H \mathbf{H}_{RD} \mathbf{F}_R \tilde{\mathbf{U}}_{\omega} + \tilde{\Lambda}_{\omega}^{-1} \right)^{-1} \right)$$

[0077]
$$\text{subject to} \quad \lambda_{\max}(\mathbf{F}_R \Upsilon \mathbf{F}_R^H) \leq P_{\text{peak}}$$

[0078] 여기서, $\Upsilon \triangleq \mathbf{W}_R (\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{W}_R^H$ 이다.

[0079] $\mathbf{H}_{RD}^H \mathbf{H}_{RD}$ 의 EVD는 $\mathbf{H}_{RD}^H \mathbf{H}_{RD} = \mathbf{U}_{RD} \Lambda_{RD} \mathbf{U}_{RD}^H$ 이고, $\mathbf{U}_{RD}$ 는 유니터리 행렬이며, Λ_{RD} 는 i 번째 대각 원소가 $\lambda_{RD,i}$ 인 대각 행렬을 나타낸다. 또한, $\lambda_{RD,i}$ 는 $\mathbf{H}_{RD}^H \mathbf{H}_{RD}$ 의 고유치 중 i 번째 큰 고유치를 나타낸다.

[0080] 따라서, 계산을 통해 $\mathbf{F}_R$ 이 수학식 17과 같은 구조를 가지는 것이 최적성에 큰 손실이 없다는 것을 증명할 수 있다.

수학식 17

[0081]
$$\mathbf{F}_R = \tilde{\mathbf{U}}_{RD} \Phi_1 \tilde{\mathbf{U}}_{\omega}^H$$

[0082] 여기서, $\tilde{\mathbf{U}}_{RD}$ 는 $\mathbf{U}_{RD}$ 의 첫번째 M 개의 컬럼으로 구성된 행렬이다. 수학식 17을 수학식 16에 대입하면, 릴레이 송수신 설계에서 MSE를 최소화하는 문제는 수학식 18과 같이 재구성될 수 있다.

수학식 18

[0083]
$$\begin{aligned} \min_{\Phi_1} \quad & \text{Tr} \left(\left(\Phi_1^H \tilde{\Lambda}_{RD} \Phi_1 + \tilde{\Lambda}_{\omega}^{-1} \right)^{-1} \right) \\ \text{subject to} \quad & \lambda_{\max}(\Phi_1 \Upsilon_{\omega} \Phi_1^H) \leq P_{\text{peak}}, \end{aligned}$$

[0084] 여기서, $\Upsilon_{\omega} \triangleq \tilde{\mathbf{U}}_{\omega}^H \Upsilon \tilde{\mathbf{U}}_{\omega}$ 이다.

[0085] $\mathbf{A} \in \mathbb{S}^N$ 는 임의의 준정부호행렬이므로 부등식, $\text{Tr}(\mathbf{A}^{-1}) \geq \sum_{i=1}^M ([\mathbf{A}]_{i,i})^{-1}$ 와, 부등식 $\lambda_{\max}(\mathbf{A}) \geq \max_i [\mathbf{A}]_{i,i}$ 를 만족하며, 이때 등호는 $\mathbf{A}$ 가 대각 행렬(diagonal matrix)일 때 만족된다. 그러므로 수학식 18에서 두 행렬

$\Phi_1^H \tilde{\Lambda}_{RD} \Phi_1$ 와 $\Phi_1 \Upsilon_\omega \Phi_1^H$ 를 동시에 대각선화하는 Φ_1 을 찾음으로써 최적의 솔루션을 획득할 수 있다.

[0086]

그러나, Υ_ω 의 비대각 구조로 인해, 수학식 18에서 문제를 위한 최적 솔루션을 구하는 것은 어려운 문제점이 있다. 이러한 어려움을 해결하기 위해, 수학식 18에서 목적 함수의 상한을 고려한다.

[0087]

$\tilde{\Lambda}_\omega$ 와 Υ_ω 간의 관계는 아래의 전제에 의해 유도될 수 있다.

[0088]

제1 전제(Lemma 1): $\tilde{\Lambda}_\omega$ 의 좌상측 파트 행렬 $\tilde{\Lambda}_\omega \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 와 $\Upsilon_\omega = \tilde{\mathbf{U}}_\omega^H \Upsilon \tilde{\mathbf{U}}_\omega$ 는 수학식 19와 같은 부등식을 만족한다.

수학식 19

[0089]

$$\tilde{\Lambda}_\omega \preceq \Upsilon_\omega$$

[0090]

수학식 19의 행렬 도치를 설명하기 위해, 릴레이에서의 수신 신호는 수학식 20과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 20

[0091]

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_R &= (\mathbf{H}_{SR}^H \mathbf{H}_{SR} + \Psi^{-1})^{-1} \mathbf{H}_{SR}^H \\ &= \Psi \mathbf{H}_{SR}^H (\mathbf{H}_{SR} \Psi \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R})^{-1} \end{aligned}$$

[0092]

$\mathbf{H}_{SR} \Psi \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}$ 를 수학식 20의 양측에 곱하는 것에 의해 수학식 20은 수학식 21과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 21

[0093]

$$\mathbf{H}_{SR} \Psi = (\mathbf{H}_{SR} \Psi \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{W}_R^H$$

[0094]

여기서, $\Omega = \mathbf{W}_R \mathbf{H}_{SR} \Psi$ 이므로, 수학식 21은 수학식 22와 같이 다시 정리될 수 있다.

수학식 22

[0095]

$$\Omega = \mathbf{W}_R (\mathbf{H}_{SR} \Psi \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{W}_R^H$$

[0096]

여기서, $\mathbf{A} \succeq \mathbf{B}$ 는 $\mathbf{A}^{-1} \preceq \mathbf{B}^{-1}$ 인 사실에 의해, $\Upsilon = \mathbf{W}_R (\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{W}_R^H$ 및 $\Psi = (\mathbf{H}_{SD}^H \mathbf{H}_{SD} + \rho^{-1} \mathbf{I}_{N_S})^{-1} \preceq \rho \mathbf{I}_{N_S}$ 이다.

[0097]

그러므로, 수학식 22는 수학식 23와 같이 부등식이 된다.

수학식 23

$$\Omega \preceq \Upsilon$$

그리고, 왼쪽에 $\tilde{\mathbf{U}}_\omega$ 을 곱하고, 오른쪽에, $\tilde{\mathbf{U}}_\omega$ 를 불균하게 곱하는 것에 의해, 수학식 19를 획득할 수 있다.

수학식 19를 이용하면, 수학식 18의 목적함수(MSE)의 상한값을 유도할 수 있다. 즉, 수학식 19를 이용하여 수학식 18의 목적함수(MSE)의 상한값은 수학식 24와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 24

$$\begin{aligned} & \text{Tr} \left(\left(\Phi_1^H \tilde{\Lambda}_{RD} \Phi_1 + \tilde{\Lambda}_\omega^{-1} \right)^{-1} \right) \\ & \leq \text{Tr} \left(\left(\Phi_1^H \tilde{\Lambda}_{RD} \Phi_1 + \Upsilon_\omega^{-1} \right)^{-1} \right) \end{aligned}$$

수학식 24에서 목적함수(MSE)의 상한값을 최소화하는 것을 구체화할 수 있다. Υ_ω 의 EVD를 $\Upsilon_\omega = \mathbf{U}_v \Lambda_v \mathbf{U}_v^H$ 라고 가정하자. 여기서, $\mathbf{U}_v \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 와 $\Lambda_v \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 는 고유치($\lambda_{v,i}$, $i=1, \dots, M$)를 포함하는 유니터리 행렬과 대각 행렬을 나타낸다. 이때, 일반적으로 손실 없이 Φ_1 는 수학식 25와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 25

$$\Phi_1 = \tilde{\Phi} \mathbf{U}_v^H$$

여기서, $\tilde{\Phi} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 는 임의의 행렬(arbitrary matrix)이다.

수학식 24 및 수학식 25를 이용하여 수학식 18을 다시 정리하면 수학식 26과 같이 정리될 수 있다.

수학식 26

$$\begin{aligned} & \min_{\tilde{\Phi}} \quad \text{Tr} \left(\left(\tilde{\Phi}^H \tilde{\Lambda}_{RD} \tilde{\Phi} + \Lambda_v^{-1} \right)^{-1} \right) \\ & \text{subject to} \quad \lambda_{\max}(\tilde{\Phi} \Lambda_v \tilde{\Phi}^H) \leq P_{\text{peak}}. \end{aligned}$$

수학식 26에서의 목적함수는 $\tilde{\Phi}^H \tilde{\Lambda}_{RD} \tilde{\Phi}$ 와 $\tilde{\Phi} \Lambda_v \tilde{\Phi}^H$ 이 대각화되었을 때 최소화된다. 그러므로 일반적인 손실 없이 $\tilde{\Phi}$ 는 대각 요소(ϕ_i , $i=1, \dots, M$)를 가지는 대각 행렬이라고 가정하면, 수학식 26은 수학식 27과 같이 정리될 수 있다.

수학식 27

$$\begin{aligned} \text{Tr} \left((\tilde{\Phi}^H \tilde{\Lambda}_{RD} \tilde{\Phi} + \Lambda_v^{-1})^{-1} \right) &= \sum_{i=1}^M \lambda_{v,i} (1 + \lambda_{RD,i} \lambda_{v,i} |\phi_i|^2)^{-1} \\ &\geq \sum_{i=1}^M \lambda_{v,i} (1 + P_{peak} \lambda_{RD,i})^{-1} \end{aligned}$$

여기서, 부등식은 $\lambda_{\max}(\tilde{\Phi} \Lambda_v \tilde{\Phi}^H) = \max_{i=1, \dots, M} (\lambda_{v,i} |\phi_i|^2) \leq P_{peak}$ 으로부터 따른다. 또한, 목적함수를 위한 등식은 $\lambda_{v,i} |\phi_i|^2 = P_{peak}$ ($i=1, \dots, M$)일 때로 제한된다. 따라서, $\tilde{\Phi}$ 는 수학식 28과 같이 제작성될 수 있다.

수학식 28

$$\tilde{\Phi} = \sqrt{P_{peak}} \Lambda_v^{-1/2}$$

수학식 17, 수학식 25 및 수학식 28에 의해, 릴레이 송신은 수학식 29와 같은 폐쇄 형태(closed-form)에 의해 결정될 수 있다.

수학식 29

$$\mathbf{F}_R = \sqrt{P_{peak}} \tilde{\mathbf{U}}_{RD} \Lambda_v^{-1/2} \mathbf{U}_v^H \tilde{\mathbf{U}}_\omega^H$$

여기서, $\mathbf{F}_R$ 는 릴레이 송신 필터를 나타내고, P_{peak} 는 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워를 나타내고, $\tilde{\mathbf{U}}_{RD}$ 는 릴레이와 수신 장치의 채널의 방향을 나타내고, $\mathbf{U}_v^H \tilde{\mathbf{U}}_\omega^H$ 는 릴레이 환경의 채널로부터 계산되는 행렬을 나타내고, $\Lambda_v^{-1/2}$ 는 파워 행렬을 나타낸다. 일반적으로 송신 공분산 행렬의 비대각 구조로 인해 최대 파워는 송신 공분산 행렬의 고유치 중 최대값과 동일하지 않다. 그러나, 수학식 29의 $\mathbf{F}_R$ 과 수학식 14의 $\mathbf{G}_R$ 을 가지는 공분산 행렬은 $\mathbf{G}(\rho \mathbf{H}_{SR} \mathbf{H}_{SR}^H + \mathbf{I}_{N_R}) \mathbf{G}^H = P_{peak} \tilde{\mathbf{U}}_{RD} \tilde{\mathbf{U}}_{RD}^H$ 과 같다. 따라서, $N_S \geq N_R$ 일 때, 최대 파워는 $\max_i \left[P_{peak} \tilde{\mathbf{U}}_{RD} \tilde{\mathbf{U}}_{RD}^H \right]_{i,i} = \lambda_{\max} \left(P_{peak} \tilde{\mathbf{U}}_{RD} \tilde{\mathbf{U}}_{RD}^H \right) = P_{peak}$ 로써, 송신 공분산 행렬의 고유치중 최대값과 동일하게 된다.

본 발명의 일 실시예에 따른 릴레이 필터의 성능을 평가하기 위해서는 수학식 16의 문제를 최적 솔루션과 성능을 비교해야 한다. 그러나, 현재까지 수학식 16의 문제에 대한 최적 솔루션은 알려져 있지 않다. 따라서, 본 발명의 일 실시예에서는 성능을 평가하기 위해 수학식 16의 문제의 최적 솔루션의 성능 보다 항상 좋은 성능을 가지는 솔루션을 유도하였다. 이를 위해, 수학식 19를 수학식 16에 대입하면, 수학식 30과 같이 MVC의 하한값을 유도할 수 있다.

수학식 30

$$\lambda_{max}(\Phi_1 \Upsilon_\omega \Phi_1^H) \geq \lambda_{max}(\Phi_1 \tilde{\Lambda}_\omega \Phi_1^H)$$

수학식 30에서의 하한값에 제한을 둬으로써 최적화 문제는 수학식 31과 같이 재정리될 수 있다.

수학식 31

$$\begin{aligned} \min_{\Phi_1} \quad & \text{Tr} \left(\left(\Phi_1^H \tilde{\Lambda}_{RD} \Phi_1 + \tilde{\Lambda}_\omega^{-1} \right)^{-1} \right) \\ \text{subject to} \quad & \lambda_{max}(\Phi_1 \tilde{\Lambda}_\omega \Phi_1^H) \leq P_{peak}. \end{aligned}$$

수학식 31은 수학식 16 문제의 파워 제약을 릴렉스하게 나타내므로, 수학식 31의 최적 솔루션은 항상 수학식 16의 최적 솔루션보다 좋은 성능을 가지게 된다.

수학식 31의 최적 솔루션은 수학식 32와 같다.

수학식 32

$$\mathbf{F}_R = \sqrt{P_{peak}} \tilde{\mathbf{U}}_{RD} \tilde{\Lambda}_\omega^{-1/2} \tilde{\mathbf{U}}_\omega^H$$

여기서, $\mathbf{F}_R$ 는 릴레이 송신 필터를 나타내고, P_{peak} 는 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워를 나타내고, $\tilde{\mathbf{U}}_{RD}$ 는 릴레이와 수신 장치의 채널의 방향을 나타내고, $\tilde{\mathbf{U}}_\omega^H \tilde{\mathbf{U}}_\omega^H$ 는 릴레이 환경의 채널로부터 계산되는 행렬을 나타내고, $\tilde{\Lambda}_\omega^{-1/2}$ 는 파워 행렬을 나타냄.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 릴레이에서 릴레이 필터를 결정하는 방법을 나타낸 순서도이다.

단계 210에서 릴레이(120)는 송신 장치(110)로부터 수신 신호를 수신한다.

이어, 단계 215에서 릴레이(120)는 릴레이 송신 공분산 행렬의 고유치 중 최대값이 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워 이하가 되도록 릴레이에서의 파워 제한 조건을 설정한다.

이때, 릴레이(120)의 송신 공분산 행렬의 고유치는 최대 송신 파워와 릴레이-수신 장치 사이의 채널을 이용하여 도출할 수 있다.

단계 220에서 릴레이(120)는 설정된 파워 제한 조건을 만족하도록 릴레이에서의 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워를 이용하여 릴레이 송신 필터를 도출한다.

예를 들어, 릴레이 송신 필터는 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워, 릴레이-수신 장치 사이의 채널, 파워 행렬 및 채널 행렬을 이용하여 계산될 수 있다.

릴레이(120)는 수학식 32에서 전술한 바와 같이 릴레이 송신 필터를 도출할 수 있다.

단계 225에서 릴레이(120)는 도출된 릴레이 송신 필터를 이용하여 송신 장치(110)로부터 수신된 수신 신호를 수신 장치(130)로 전송한다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 릴레이 내부 구성을 개략적으로 도시한 블록도이고, 도 4는 종래와 본 발명

의 일 실시예에 따른 BER 성능을 비교한 그래프이다.

- [0131] 도 3을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 릴레이(120)는 수신부(310), 설정부(315), 결정부(320), 송신부(325), 메모리(330), 프로세서(335)를 포함하여 구성된다.
- [0132] 수신부(310)는 수신 장치(130)로부터 수신되는 수신 신호를 수신하기 위한 수단이다.
- [0133] 설정부(315)는 릴레이 송신 공분산 행렬의 고유치 중 최대값이 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워 이하가 되도록 릴레이에서의 파워 제한 조건을 설정하는 기능을 한다.
- [0134] 결정부(320)는 설정된 파워 제한 조건을 만족하도록 릴레이에서의 각 안테나에서 사용 가능한 최대 송신 파워를 이용하여 릴레이 송신 필터를 결정하는 기능을 한다.
- [0135] 송신부(325)는 릴레이 송신 필터를 이용하여 송신 장치(110)로부터 수신된 수신 신호를 수신 장치(130)로 전송하는 기능을 한다.
- [0136] 메모리(330)는 본 발명의 일 실시예에 따른 릴레이 송신 공분산 행렬의 고유치 중 최대값을 기반으로 릴레이 필터를 결정하는 방법을 수행하기 위한 알고리즘, 이 과정에서 파생되는 다양한 데이터 등을 저장한다.
- [0137] 프로세서(335)는 본 발명의 일 실시예에 따른 릴레이(120)의 내부 구성 요소들(예를 들어, 수신부(310), 설정부(315), 결정부(320), 송신부(325), 메모리(330) 등)을 제어하기 위한 수단이다.
- [0138] 도 4는 종래와 본 발명의 일 실시예에 따른 BER 성능을 비교한 그래프이다. 도 4에서 송신 장치-릴레이 채널 SNR과 송신 장치-수신 장치 채널 SNR은 동일한 것을 가정하며, 릴레이-수신 장치 채널 SNR은 15dB로 고정된 것을 가정하기로 한다.
- [0139] 도 4에 도시된 바와 같이, 릴레이 송신 공분산 행렬의 고유치 중 최대값을 기반으로 릴레이 필터를 결정하는 방법의 성능이 종래에 비해 더 좋은 것을 알 수 있다.
- [0140] 한편, 본 발명의 실시예에 따른 릴레이 필터 결정 방법은 다양한 전자적으로 정보를 처리하는 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 저장 매체에 기록될 수 있다. 저장 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다.
- [0141] 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 전자적으로 정보를 처리하는 장치, 예를 들어, 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다.
- [0142] 상술한 하드웨어 장치는 본 발명의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.
- [0143] 상기에서는 본 발명의 바람직한 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 하기의 특허 청구의 범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

- [0144] 110: 송신 장치
- 120: 릴레이
- 130: 수신 장치
- 310: 수신부
- 315: 설정부
- 320: 결정부

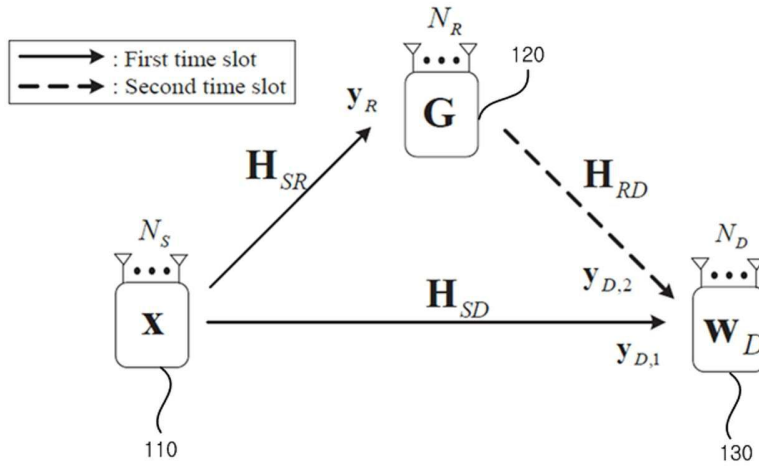
325: 송신부

330: 메모리

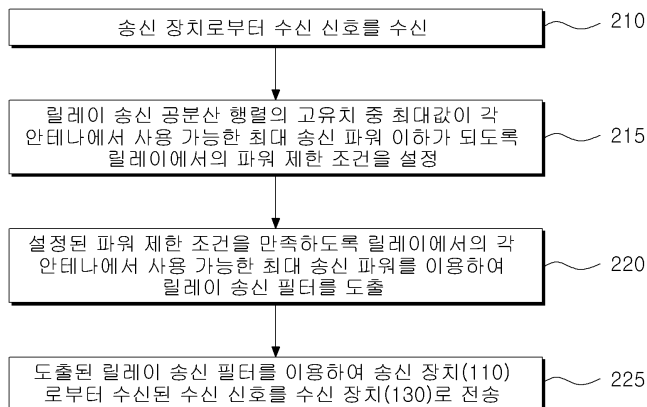
335: 프로세서

도면

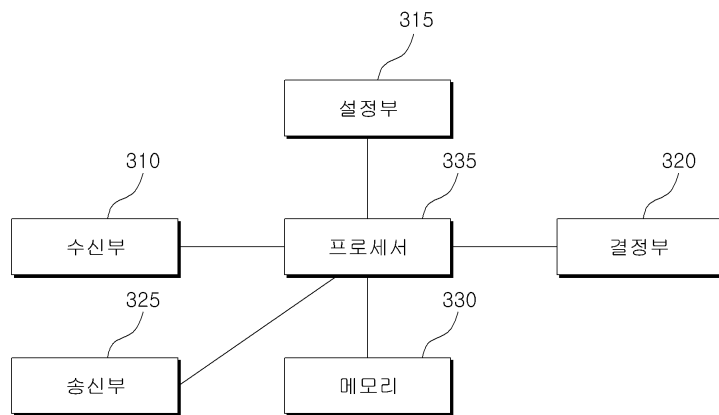
도면1



도면2



도면3



도면4

