(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0017641
(43) 공개일자 2023년02월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04B 7/0452 (2017.01) *H04B 7/0426* (2017.01)
H04B 7/0456 (2017.01) *H04B 7/06* (2017.01)
(52) CPC특허분류
H04B 7/0452 (2013.01)
H04B 7/0426 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0099413
(22) 출원일자 2021년07월28일
심사청구일자 2021년07월28일

(71) 출원인
세종대학교산학협력단
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
송형규
경기도 성남시 분당구 중앙공원로 17, 320-303(서현동, 한양아파트)
정지성
서울특별시 노원구 공릉로27길 110, 101-607(공릉동, 현대 성우아파트)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
이강민, 안준형, 남승희

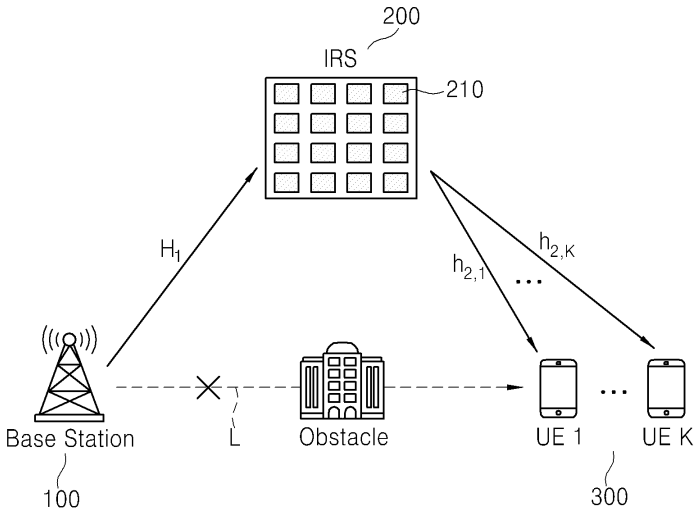
전체 청구항 수 : 총 28 항

(54) 발명의 명칭 **다중 사용자 MISO 통신 시스템 및 그에 적용되는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬 설계 방법**

(57) 요 약

본 발명은 본 발명은 지능형 반사 표면을 활용하는 시스템에서 주파수 스펙트럼 및 전력 효율을 향상시킬 수 있는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 설계하는 다양한 기법에 관한 것이다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
H04B 7/0456 (2013.01)
H04B 7/0634 (2013.01)
(72) 발명자
박찬엽
서울특별시 노원구 덕릉로 459-18, 103-1209(상계동, 미도아파트)
이영롱
서울특별시 광진구 면목로5길 30-8, 304호(군자동)
장준용
경기도 의정부시 오목로35번길 10, 102-102(용현동, 용현그랜드아파트)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711126077
과제번호 2017-0-00217-005
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 정보통신기획평가원
연구사업명 방송통신산업기술개발(R&D)
연구과제명 투명도와 레이어 가변형 실감 사이니지 기술
기 여 율 1/2
과제수행기관명 서울과학기술대학교산학협력단
연구기간 2021.01.01 ~ 2021.12.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1345331679
과제번호 2020R1A6A1A03038540
부처명 교육부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 이공학학술연구기반구축(R&D)
연구과제명 자율지능무인비행체연구소
기 여 율 1/2
과제수행기관명 세종대학교
연구기간 2020.06.01 ~ 2021.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

M 개의 송신 안테나를 구비한 기지국과 K 개의 단일 안테나 사용자 단말 사이에 구성된 2차원으로 배열된 N 개의 반사 소자를 포함하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 설계하는 방법에 있어서,

지능형 반사 표면을 거쳐 기지국으로부터 사용자 단말이 수신하는 신호를 이용하여 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 나타내는 주파수 스펙트럼 효율식을 생성하고, 상기 생성된 주파수 스펙트럼 효율식을 기지국의 송신 전력에 대한 제약을 최소화하는 것으로 변환하여 송신 전력 변환식을 도출하는 송신 전력 변환식 도출 단계; 및

상기 도출된 송신 전력 변환식에 포함된 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 볼록 함수로 변환하는 과정을 기반으로 최적화를 수행하여, 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계;

를 포함하여 구성되는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계는,

상기 도출된 송신 전력 변환식을 변형하여 근사화하고, 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하여, 이를 기반으로 지능형 반사 표면을 경유하는 기지국과 사용자 단말들 사이의 채널 행렬들의 합에 대한 특이 값 분해를 통해 획득되는 가장 큰 특이 값에 해당하는 특이 벡터를 이용하여, 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 제1 기법 수행 단계;

상기 도출된 송신 전력 변환식을 변형하여 근사화하고, 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하여, 이를 기반으로 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 생성하고, 상기 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간 오차가 소정의 수렴 조건을 충족하도록 생성된 위상 변환 행렬을 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬로 획득하는 제2 기법 수행 단계;

지능형 반사 표면과 K 개의 사용자 단말들 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$ 과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$ 의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬 $\ddot{\mathbf{H}}_2$ 과 지능형 반사 표면의 반사 소자들의 소정의 초기 위상 값을 대각 성분으로 갖는 초기 위상 변환 행렬 $\mathbf{\Phi}$ 의 결합 행렬과 상기 도출된 송신 전력 변환식을 이용하여 얻어지는 최적의 행렬과의 오차를 최소화하기 위한 목적함수를 설정하고, 설정된 목적함수를 변형하여, 변형된 목적함수를 기반으로 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 제3 기법 수행 단계;

중 어느 하나를 수행하여 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것; 을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 생성된 주파수 스펙트럼 효율식은 다음의 [수학식 1]에 따르며, 상기 [수학식 1]으로부터 도출되는 송신 전력 변환식은, 다음의 [수학식 2]에 따르는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

[수학식 1]

$$R=\sum_{k=1}^{K}\log\left(1+\frac{p_k}{\sigma^2}\right)$$

제약 1) $\|\mathbf{W}\|_F^2 \le P_{\max}$

제약 2) $|\mathbf{\Phi}(n,n)|=1,\ n=1,\ldots,N$

여기서, 제약 1은 기지국의 송신 전력 제약을 의미하며, 제약 2는 지능형 반사 표면이 위상만을 조절할 수 있기 때문에 발생하는 단위 진폭의 제약을 의미한다. 또한, p_k 는 k 번째 사용자 단말에 할당되는 송신 전력이고, $P_{\max}$ 는 기지국의 최대 송신 전력이며, σ^2 은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)의 분산을 의미한다.

[수학식 2]

$$\begin{aligned}\|\mathbf{W}\|_F^2 &= Tr(\mathbf{W}\mathbf{W}^H)\\ &= Tr\left((\mathbf{H}_{\text{eff}}\mathbf{H}_{\text{eff}}^H)^{-1}\mathbf{P}\right)\\ &= Tr\left((\mathbf{P}^{-1/2}\mathbf{H}_{\text{eff}}\mathbf{H}_{\text{eff}}^H\mathbf{P}^{-1/2})^{-1}\right)\\ &= Tr\left((\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\mathbf{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^{-1}\right)\end{aligned}$$

여기서, $\tilde{\mathbf{H}}_2 = \mathbf{P}^{-1/2}\mathbf{H}_2$ 이며, $\mathbf{H}_{\text{eff}}=\mathbf{H}_2\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1$ 은 지능형 반사 표면을 거치는 기지국과 사용자 단말 사이의 실효 채널이고, $\mathbf{P}=\text{diag}(p_1,\ p_2,\ldots,\ p_K)$ 는 대각 성분들로 구성되는 모든 사용자 단말들에 대한 전력 할당 행렬을 의미한다. 또한, $\mathbf{\Phi}$ 은 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬이고, $\mathbf{H}_2 = \left[\mathbf{h}_{2,1}^T,\mathbf{h}_{2,2}^T,\ldots,\mathbf{h}_{2,K}^T\right]^T \in \mathbb{C}^{K\times N}$ 는 지능형 반사 표면과 K 개의 사용자 단말들 사이의 채널을 의미하며, $\mathbf{H}_1 \in \mathbb{C}^{N\times M}$ 는 기지국과 지능형 반사 표면 사이의 채널을 의미한다.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 제1 기법 수행 단계는,

상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식을 근사화하는 근사화 단계;

상기 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하는 변형 단계;

상기 변형된 송신 전력 변환식에서 지능형 반사 표면을 경유하는 기지국과 사용자 단말들 사이의 채널 행렬들의 합에 대한 특이 값 분해를 통해 획득되는 가장 큰 특이 값에 해당하는 특이 벡터를 이용하여, 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 생성하는 최적의 위상 변환 행렬 생성 단계;

를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

청구항 5

제3항에 있어서,

상기 제2 기법 수행 단계는,

상기 [수학식 2] 의 송신 전력 변환식을 근사화하는 근사화 단계;

상기 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하는 변형 단계;

상기 변형된 송신 전력 변환식을 최대화하도록 하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 생성하는 위상 변환 행렬 생성 단계;

상기 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간의 오차를 산출하고, 상기 산출된 오차가 소정의 오차 범위 내에 포함되는지에 따라 상기 생성된 위상 변환 행렬이 수렴조건을 충족하는지의 여부를 판단하는 수렴조건 충족여부 판단 단계;

상기 수렴조건 충족여부 판단 단계를 통해 비교 위상 변환 행렬과의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속하는 것으로 생성된 위상 변환 행렬을, 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬로 결정하는 최적의 위상 변환 행렬 결정 단계;

를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

청구항 6

제4항 또는 제5항에 있어서,

상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식을 근사화하는 단계는, 다음의 [수학식 3]에 따르는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

[수학식 3]

$$\|\mathbf{W}\|_F^2 = Tr\left((\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^{-1}\right) \overset{(a)}{\geq} \frac{K^2}{Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)},$$

여기서, (a)는 정부호 행렬의 부등식 성질을 활용하여 하한의 수식으로 근사화 하는 과정을 의미한다.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 [수학식 3]에 따르는 근사화 된 송신 전력 변환식을 변형하는 단계는, 다음의 [수학식 4]에 따르는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

[수학식 4]

$$\begin{aligned}
&\max_{\boldsymbol{\Phi}} Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)\\
&= \sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}^H)\\
&= \sum_{k=1}^{K}(\boldsymbol{\varphi}^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H\boldsymbol{\varphi})\\
&= \boldsymbol{\varphi}^H\sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H)\boldsymbol{\varphi}\\
&= \boldsymbol{\varphi}^H\mathbf{Z}\boldsymbol{\varphi},
\end{aligned}$$

여기서, $\boldsymbol{\varphi} = [e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, ..., e^{j\phi_N}]^H \in \mathbb{C}^{N\times 1}$ 는 지능형 반사 표면의 위상 변환 값들로 구성된 벡터를 의미하며, $\tilde{\mathbf{H}}_{2,k} = \mathrm{diag}(\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}) \in \mathbb{C}^{N\times N}$ 는 k 번째 사용자 단말의 채널 벡터를 대각 성분으로 갖는 행렬을 의미한다. 또한, $\mathbf{Z}$ 는 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국(송신단)과 사용자 단말들(수신단) 사이의 채널 행렬들의 합을 나타내는 $\sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H)$ 을 치환한 것이다.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 제1 기법 수행 단계의 최적의 위상 변환 행렬 생성 단계에서, 상기 [수학식 4]에 따라 변형된 송신 전력 변환식을 기반으로 특이 값 분해를 통해 생성되는 최적의 위상 변환 행렬은, 다음의 [수학식 5]에 따라 산출되는 위상 변환 벡터 φ 로 구성되는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면이 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

[수학식 5]

$$\varphi = e^{j\arg(v_{Z,1})}$$

청구항 9

제7항에 있어서,

상기 제2 기법 수행 단계의 위상 변환 행렬 생성 단계에서,

상기 생성되는 위상 변환 행렬은, 다음의 [수학식 6]에 따르는 위상 변환 벡터 $\varphi_{(i+1)}$로 구성되는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

[수학식 6]

$$\varphi_{(i+1)} = e^{j\arg(Z^H \varphi_{(i)})}$$
$$\Phi = \mathrm{diag}(\varphi^H_{(i+1)})$$

여기서, i는 반복 횟수를 의미하고, Z 는 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국과 사용자 단말들 사이의 채널 행렬들의 합을 나타낸다. 또한, ^{H}는 행렬의 허미션을 나타낸다.

청구항 10

제5항에 있어서,

상기 수렴조건 충족여부 판단 단계는,

상기 위상 변환 행렬 생성 단계에서 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간의 오차를 산출하는 오차 산출 단계;

상기 산출된 두 행렬 간의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속하는지를 비교하는 비교 단계;

상기 비교 결과, 상기 산출된 오차가 소정의 오차 범위 내에 속하지 않으면, 상기 비교 변환 위상 변환 행렬을 상기 생성된 위상 변환 행렬로 갱신하는 비교 위상 변환 행렬 갱신 단계;

상기 비교 위상 변환 행렬 갱신 단계 후, 상기 위상 변환 행렬 생성 단계로 회귀하는 회귀 단계;

를 포함하여 구성되며,

상기 회귀 단계 후, 생성되는 위상 변환 행렬이 비교 변환 행렬과의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속할 때까지 상기 위상 변환 행렬 생성 단계 내지 수렴조건 충족여부 판단 단계를 반복 수행하는 것; 을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

청구항 11

제3항에 있어서,

상기 제3 기법 수행 단계는, 상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식에서 지능형 반사 표면과 K명의 사용자 단

말 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$ 과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$ 의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_2$과 초기 위상 변환 행렬 $\mathbf{\Phi}$ 의 결합 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}$ 의 최적의 해를 구하는 최적의 해 획득 단계;

상기 송신 전력 변환식으로부터 특이 값 분해를 통해 기지국과 지능형 반사 표면 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_1$에 대하여 상기 송신 전력 변환식을 최대화할 수 있는 최적의 행렬을 구하는 최적의 행렬 획득 단계;

상기 획득된 결합 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}$ 의 최적의 해와 상기 최적의 행렬과의 평균제곱오차(Mean Square Error, MSE)를 최소화하기 위한 목적함수를 설정하는 목적함수 설정 단계; 상기 설정된 목적함수를 변형하는 목적함수 변형 단계; 상기 변형된 목적함수를 최대화하는 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값을 산출하여 최적의 위상 변환 행렬을 생성하는 최적의 위상 변환 행렬 생성 단계; 를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 최적의 해 획득 단계에서 획득되는 결합 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}$ 의 최적의 해는, 다음의 [수학식 7]에 따라 구해지는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

[수학식 7]

$$(\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi})_{\text{opt}} = \mathbf{V}_{(1:K)}^H = \mathbf{V}_{\text{opt}}^H \in \mathbb{C}^{N\times K}$$

여기서, $\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}$ 의 최적의 해는, 지능형 반사 표면의 반사 소자의 위상에 대한 제약이 존재하지 않는 경우 얻어진다. 또한, $\mathbf{V}_{(1:K)}$ 는 $\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H$ 의 가장 큰 K 개의 특이 값에 해당하는 특이 행렬을 의미한다.

청구항 13

제11항에 있어서,

상기 목적함수 설정 단계에서 설정되는 목적함수는, 다음의 [수학식 8]에 따르는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

[수학식 8]

$$\min_{\mathbf{\Phi}} Tr\left\{(\mathbf{V}_{\text{opt}} - \mathbf{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)(\mathbf{V}_{\text{opt}} - \mathbf{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^H\right\}$$
$$\text{s.t. } |\mathbf{\Phi}(n,n)| = 1,\ n = 1,\ldots,N.$$

여기서, $\mathbf{H}_2$ 는 지능형 반사 표면과 K 명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬이고, $\mathbf{\Phi}$은 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬이며, N 은 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수를 의미한다. 또한, ^{H}는 행렬의 허미션을 나타낸다.

청구항 14

제11항에 있어서,

상기 목적함수 변형 단계에서 변형되는 목적함수는, 다음의 [수학식 9]에 따르는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

[수학식 9]

$$\sum_{n=1}^{N}\max_{\phi_n}\left(\alpha_n e^{-j(\beta_n+\phi_n)}+\alpha_n e^{j(\beta_n+\phi_n)}\right)$$

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 최적의 위상 변환 행렬 생성 단계에서, 상기 [수학식 9]과 같이 변형된 목적함수를 최대화하는 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값을 산출하는 것은, 다음의 [수학식 10]에 따르는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

[수학식 10]

$$\phi_n = -\beta_n = -\arg(\mathbf{v}_n\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}).$$

여기서, n = 1, 2, …, N (N 은 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수)이고, $\mathbf{v}_n$ 과 $\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}$는 $\mathbf{V}_{opt}$ 과 $\tilde{\mathbf{H}}_2$의 n번째 행 벡터를 의미한다. 또한, $\tilde{\mathbf{H}}_2$는 [수학식 5]에 따르는 송신 전력 변환식에서 지능형 반사 표면과 K 명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$ 과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$ 의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬을 의미한다.

청구항 16

제10항에 있어서,

상기 수렴조건 충족여부 판단 단계에서,

초기 비교 위상 변환 행렬은, 각 위상 변환 행렬 값이 1로 구성된 행렬로 설정되는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

청구항 17

M 개의 송신 안테나를 가진 기지국에서 2차원으로 배열된 N 개의 반사 소자를 가지는 지능형 반사 표면(IRS)을 통해 단일 수신 안테나를 가진 K 개의 사용자 단말로 데이터를 송신하는 다중 사용자 MISO 기반의 무선 통신 시스템에 있어서,

소정의 위상 변환 행렬 획득 방식으로 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 최적의 위상 변환 행렬을 획득하여, 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값으로 제어하는 제어부를 포함하는 기지국;

상기 기지국의 제어부에 의해 제어되는 위상 변화율에 따라 상기 기지국으로부터 입력되는 신호에 대한 위상을 조절하여 적어도 둘 이상의 사용자 단말로 반사하는 지능형 반사 표면(IRS); 및

각 수신 안테나를 통해 상기 지능형 반사 표면의 각 반사 소자에 의해 위상이 조절된 신호를 수신하는 사용자 단말들;

을 포함하여 구성되며,

상기 제어부에서 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것은, 지능형 반사 표면을 거쳐 기지국으로부터 사용자 단말이 수신하는 신호를 이용하여 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 나타내는 주파수 스펙트럼 효율식을 생성하고, 상기 생성된 주파수 스펙트럼 효율식을 기지국의 송신 전력에 대한 제약을 최소화하는 것으로 변환하여 송신 전력 변환식을 도출한 후, 상기 도출된 송신 전력 변환식에 포함된 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 볼록 함수로 변환하는 과정을 기반으로 최적화를 수행하는 제1 내지 제3 기법 중 어느 하나의 기법을 사용하여

획득하는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

청구항 18

제17항에 있어서,

상기 생성된 주파수 스펙트럼 효율식은 다음의 [수학식 1]에 따르며, 상기 [수학식 1]로부터 도출되는 송신 전력 변환식은, 다음의 [수학식 2]에 따르는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 1]

$$R=\sum_{k=1}^{K}\log\left(1+\frac{p_k}{\sigma^2}\right)$$

$$\text{제약 1)}\ \|\mathbf{W}\|_F^2 \le P_{\max}$$

$$\text{제약 2)}\ |\mathbf{\Phi}(n,n)|=1,\ n=1,\ldots,N$$

여기서, 제약 1은 기지국의 송신 전력 제약을 의미하며, 제약 2는 지능형 반사 표면이 위상만을 조절할 수 있기 때문에 발생하는 단위 진폭의 제약을 의미한다. 또한, p_k 는 k 번째 사용자 단말에 할당되는 송신 전력이고, $P_{\max}$ 는 기지국의 최대 송신 전력이며, σ^2 은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)의 분산을 의미한다.

[수학식 2]

$$\begin{aligned}\|\mathbf{W}\|_F^2 &= Tr(\mathbf{W}\mathbf{W}^H)\\ &= Tr\left((\mathbf{H}_{\text{eff}}\mathbf{H}_{\text{eff}}^H)^{-1}\mathbf{P}\right)\\ &= Tr\left((\mathbf{P}^{-1/2}\mathbf{H}_{\text{eff}}\mathbf{H}_{\text{eff}}^H\mathbf{P}^{-1/2})^{-1}\right)\\ &= Tr\left((\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\mathbf{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^{-1}\right)\end{aligned}$$

여기서, $\tilde{\mathbf{H}}_2 = \mathbf{P}^{-1/2}\mathbf{H}_2$, 이며, $\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H}_2\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1$ 은 지능형 반사 표면을 거치는 기지국과 사용자 단말 사이의 실효 채널이고, $\mathbf{P} = \text{diag}(p_1, p_2, \ldots, p_K)$ 는 대각 성분들로 구성되는 모든 사용자 단말들에 대한 전력 할당 행렬을 의미한다. 또한, $\mathbf{\Phi}$ 은 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬이고, $\mathbf{H}_2 = \left[\mathbf{h}_{2,1}^T, \mathbf{h}_{2,2}^T, \ldots, \mathbf{h}_{2,K}^T\right]^T \in \mathbb{C}^{K\times N}$ 는 지능형 반사 표면과 K 개의 사용자 단말들 사이의 채널을 의미하며, $\mathbf{H}_1 \in \mathbb{C}^{N\times M}$ 는 기지국과 지능형 반사 표면 사이의 채널을 의미한다.

청구항 19

제18항에 있어서,

상기 제1 기법은,

상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식을 변형하여 근사화하고, 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하여, 이를 기반으로 지능형 반사 표면을 경유하는 기지국과 사용자 단말들 사이의 채널 행렬들의 합에 대한 특이 값 분해를 통해 획득되는 가장 큰 특이 값에 해당하는 특이 벡터를 이용하여 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것; 을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

청구항 20

제18항에 있어서,

상기 제2 기법은,

상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식을 변형하여 근사화하고, 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하여, 이를 기반으로 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 생성하고, 상기 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간 오차가 소정의 수렴 조건을 충족하도록 생성된 위상 변환 행렬을 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬로 획득하는 것; 을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

청구항 21

제18항에 있어서,

상기 제3 기법은,

지능형 반사 표면과 K 개의 사용자 단말들 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$ 과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$ 의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬 $\ddot{\mathbf{H}}_2$ 과 지능형 반사 표면의 반사 소자들의 소정의 초기 위상 값을 대각 성분으로 갖는 초기 위상 변환 행렬 $\mathbf{\Phi}$ 의 결합 행렬과 상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식을 이용하여 얻어지는 최적의 행렬과의 오차를 최소화하기 위한 목적함수를 설정하고, 설정된 목적함수를 변형하여, 변형된 목적함수를 기반으로 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것; 을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

청구항 22

제19항 또는 제20항에 있어서,

상기 근사화 된 [수학식 2]의 송신 전력 변환식은, 다음의 [수학식 3]에 따르는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 3]

$$\begin{aligned}\|\mathbf{W}\|_F^2 &= Tr\left((\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\mathbf{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^{-1}\right)\\ &\overset{(a)}{\geq} \frac{K^2}{Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\mathbf{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)},\end{aligned}$$

여기서, (a)는 정부호 행렬의 부등식 성질을 활용하여 하한의 수식으로 근사화 하는 과정을 의미한다.

청구항 23

제22항에 있어서,

상기 변형된 [수학식 3]의 송신 전력 변환식은, 다음의 [수학식 4]에 따르는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 4]

$$\begin{aligned}&\max_{\mathbf{\Phi}} Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\mathbf{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)\\ &= \sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\mathbf{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}^H)\\ &= \sum_{k=1}^{K}(\boldsymbol{\varphi}^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H\boldsymbol{\varphi})\\ &= \boldsymbol{\varphi}^H\sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H)\boldsymbol{\varphi}\\ &= \boldsymbol{\varphi}^H\mathbf{Z}\boldsymbol{\varphi},\end{aligned}$$

여기서, $\boldsymbol{\varphi} = [e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, ..., e^{j\phi_N}]^H \in \mathbb{C}^{N\times 1}$ 는 지능형 반사 표면의 위상 변환 값들로 구성된 벡터를

의미하며, $\hat{\mathbf{H}}_{2,k} = \mathrm{diag}(\hat{\mathbf{h}}_{2,k}) \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 는 k 번째 사용자 단말의 채널 벡터를 대각 성분으로 갖는 행렬을 의미한다. 또한, $\mathbf{Z}$ 는 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국(송신단)과 사용자 단말들(수신단) 사이의 채널 행렬들의 합을 나타내는 $\sum_{k=1}^{K}(\hat{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^{H}\hat{\mathbf{H}}_{2,k}^{H})$ 을 치환한 것이다.

청구항 24

제23항에 있어서,

상기 제1 기법은,

상기 [수학식 4]에 따르는 변형된 송신 전력 변환식을 기반으로 특이 값 분해를 통해 다음의 [수학식 5]에 따라 산출되는 위상 변환 벡터 $\boldsymbol{\varphi}$ 로 구성되는 위상 변환 행렬을 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법.

[수학식 5]

$$\boldsymbol{\varphi} = e^{j\arg(\mathbf{v}_{\mathbf{Z},1})}$$

청구항 25

제23항에 있어서,

상기 제2 기법은,

상기 [수학식 4]과 같이 변형된 송신 전력 변환식을 기반으로 다음의 [수학식 6]에 따르는 위상 변환 벡터 $\boldsymbol{\varphi}_{(i+1)}$ 로 구성되는 위상 변환 행렬을 생성하는 것을 특징으로 무선 통신 시스템.

[수학식 6]

$$\boldsymbol{\varphi}_{(i+1)} = e^{j\arg(\mathbf{Z}^{H}\boldsymbol{\varphi}_{(i)})}$$
$$\boldsymbol{\Phi} = \mathrm{diag}(\boldsymbol{\varphi}^{H}_{(i+1)})$$

여기서, i는 반복 횟수를 의미하고, $\mathbf{Z}$ 는 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국과 사용자 단말들 사이의 채널 행렬들의 합을 나타낸다. 또한, ^{H}는 행렬의 허미션을 나타낸다.

청구항 26

제20항에 있어서,

상기 제2 기법에서,

초기 비교 위상 변환 행렬은 각 위상 변환 값이 1로 구성된 행렬로 설정되며, 그 이후에는 상기 소정의 수렴조건을 충족하지 않는 것으로 생성된 위상 변환 행렬로 갱신되는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

청구항 27

제21항에 있어서,

상기 제3 기법은, 다음의 [수학식 8]와 같이 설정된 목적함수를 [수학식 9]와 같이 변형하는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 8]

$$\min_{\Phi} Tr\left\{(\mathbf{V}_{opt}-\Phi^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)(\mathbf{V}_{opt}-\Phi^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^H\right\}$$
$$\text{s.t. } |\Phi(n,n)|=1,\ n=1,\ldots,N.$$

여기서, $\mathbf{H}_2$는 지능형 반사 표면과 K명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬이고, Φ은 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬이며, N은 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수를 의미한다. 또한, ^{H}는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[수학식 9]

$$\sum_{n=1}^{N}\max_{\phi_n}\left(\alpha_n e^{-j(\beta_n+\phi_n)}+\alpha_n e^{j(\beta_n+\phi_n)}\right)$$

청구항 28

제27항에 있어서,

상기 제3 기법은,

상기 [수학식 9]에 따르는 변형된 목적함수를 최대화하는 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값을 다음의 [수학식 10]에 따라 산출하여 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 10]

$$\phi_n=-\beta_n=-\arg(\mathbf{v}_n\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}).$$

여기서, n = 1, 2, …, N (N은 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수)이고, $\mathbf{v}_n$과 $\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}$는 $\mathbf{V}_{opt}$과 $\tilde{\mathbf{H}}_2$의 n번째 행 벡터를 의미한다. 또한, $\tilde{\mathbf{H}}_2$는 [수학식 5]에 따르는 송신 전력 변환식에서 지능형 반사 표면과 K명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬을 의미한다.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 다중 사용자 다중 입력 단일 출력(MU-MISO) 통신 시스템에서 주파수 스펙트럼 효율을 최대화 하기 위한 지능형 반사 표면(Intelligent reflecting surface)의 위상 변환 행렬 설계 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 이동통신의 세대가 진화함에 따라 높은 데이터 속도에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 높은 데이터 속도를 충족시키기 위해서는 다수의 배열 안테나를 사용하는 것이 필수적이며, 이는 고 주파수 대역을 이용하여 데이터를 전송하는 밀리미터파(mmWave) 기술로 달성할 수 있다. 하지만, 다수의 안테나를 사용함에 따라 높은 전력 소비를 요하는 RF(Radio Frequency) 체인을 다수 필요로 하기 때문에, 높은 전력 소모를 야기하게 된다. 또한, 고 대역의 주파수를 사용할수록 경로 손실과 장애물에 따른 신호의 감쇠가 크게 발생하는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 통신 커버리지를 확대하기 위하여 송수신기 사이에 중계기를 배치하는 중계기 통신 기법을 사용할 수 있다. 하지만, 중계기에서도 송수신 모듈이 사용되기 때문에, 이 역시 전력 효율이 떨어지는 문제가 있다.

[0003] 이와 같은 고 대역의 주파수를 사용함에 따라 발생하는 문제들을 다루기 위하여, 최근 지능형 반사 표면(Intelligent reflecting surface, IRS)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 지능형 반사 표면(IRS)이란 메타 물질로 이루어진 다수의 수동 반사 소자들을 장착하고 있는 표면으로서, 각 반사 소자는 컨트롤러의 제어를 통해 들어오는 입력 신호의 위상 편이를 조절하여 반사할 수 있다.

[0004] 이러한 지능형 반사 표면(IRS)의 경우, 기존의 중계기와 달리 별도의 송수신 모듈을 필요로 하지 않고, 단순히 들어오는 입력 신호에 대한 반사를 수행하기 때문에, 기존 중계기 통신 기법에 비해 높은 전력 효율을 확보할 수 있는 장점이 있다. 또한, 지능형 반사 표면(IRS)은 송수신기 사이의 직접적인 경로가 장애물에 의해 차단된 경우 등과 같은 채널 환경이 좋지 않은 경우에도 효과적인 통신을 위하여 사용될 수 있다.

[0005] 따라서, 지능형 반사 표면(IRS)을 활용하는 통신 시스템에서 채널 정보에 따른 반사 소자의 효율적인 위상 설계 기법에 대한 연구가 필요하다.

[0006] (특허문헌 1) KR 10-2192234 B1

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 지능형 반사 표면을 활용하는 시스템에서 주파수 스펙트럼 및 전력 효율을 향상시킬 수 있는 지능형 반사 표면(IRS)의 위상 설계 기법을 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 발명에 따른 M 개의 송신 안테나를 구비한 기지국과 K 개의 단일 안테나 사용자 단말 사이에 구성된 2차원으로 배열된 N 개의 반사 소자를 포함하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 설계하는 방법은, 지능형 반사 표면을 거쳐 기지국으로부터 사용자 단말이 수신하는 신호를 이용하여 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 나타내는 주파수 스펙트럼 효율식을 생성하고, 상기 생성된 주파수 스펙트럼 효율식을 기지국의 송신 전력에 대한 제약을 최소화하는 것으로 변환하여 송신 전력 변환식을 도출하는 송신 전력 변환식 도출 단계; 및 상기 도출된 송신 전력 변환식에 포함된 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 볼록 함수로 변환하는 과정을 기반으로 최적화를 수행하여, 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계; 를 포함하여 구성된다.

[0009] 보다 구체적으로, 상기 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계는, 상기 도출된 송신 전력 변환식을 변형하여 근사화하고, 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하여, 이를 기반으로 지능형 반사 표면을 경유하는 기지국과 사용자 단말들 사이의 채널 행렬들의 합에 대한 특이 값 분해를 통해 획득되는 가장 큰 특이 값에 해당하는 특이 벡터를 이용하여, 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 제1 기법 수행 단계; 상기 도출된 송신 전력 변환식을 변형하여 근사화하고, 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하여, 이를 기반으로 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 생성하고, 상기 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간 오차가 소정의 수렴 조건을 충족하도록 생성된 위상 변환 행렬을 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬로 획득하는 제2 기법 수행 단계; 지능형 반사 표면과 K 개의 사용자 단말들 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$ 과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$ 의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬 $\ddot{\mathbf{H}}_2$ 과 지능형 반사 표면의 반사 소자들의 소정의 초기 위상 값을 대각 성분으로 갖는 초기 위상 변환 행렬 $\mathbf{\Phi}$ 의 결합 행렬과 상기 도출된 송신 전력 변환식을 이용하여 얻어지는 최적의 행렬과의 오차를 최소화하기 위한 목적함수를 설정하고, 설정된 목적함수를 변형하여, 변형된 목적함수를 기반으로 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 제3 기법 수행 단계; 중 어느 하나를 수행하여 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것; 을 특징으로 한다.

[0010] 여기서, 상기 생성된 주파수 스펙트럼 효율식은 다음의 [수학식 1]에 따르며, 상기 [수학식 1]으로부터 도출되는 송신 전력 변환식은, 다음의 [수학식 2]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0011] [수학식 1]

$$R=\sum_{k=1}^{K}\log\left(1+\frac{p_k}{\sigma^2}\right)$$
$$\text{제약 1)}\ \|\mathbf{W}\|_F^2 \le P_{\max}$$
$$\text{제약 2)}\ |\mathbf{\Phi}(n,n)|=1,\ n=1,\ldots,N$$

[0012]

[0013] 여기서, 제약 1은 기지국의 송신 전력 제약을 의미하며, 제약 2는 지능형 반사 표면이 위상만을 조절할 수 있기 때문에 발생하는 단위 진폭의 제약을 의미한다. 또한, p_k 는 k 번째 사용자 단말에 할당되는 송신 전력이고, $P_{\max}$ 는 기지국의 최대 송신 전력이며, σ^2 은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)의 분산을 의미한다.

[0014] [수학식 2]

$$\begin{aligned}\|\mathbf{W}\|_F^2 &= Tr(\mathbf{W}\mathbf{W}^H)\\ &= Tr\left((\mathbf{H}_{\text{eff}}\mathbf{H}_{\text{eff}}^H)^{-1}\mathbf{P}\right)\\ &= Tr\left((\mathbf{P}^{-1/2}\mathbf{H}_{\text{eff}}\mathbf{H}_{\text{eff}}^H\mathbf{P}^{-1/2})^{-1}\right)\\ &= Tr\left((\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\mathbf{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^{-1}\right)\end{aligned}$$

[0015]

[0016] 여기서, $\tilde{\mathbf{H}}_2 = \mathbf{P}^{-1/2}\mathbf{H}_2$ 이며, $\mathbf{H}_{\text{eff}}=\mathbf{H}_2\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1$ 은 지능형 반사 표면을 거치는 기지국과 사용자 단말 사이의 실효 채널이고, $\mathbf{P}=\text{diag}(p_1, p_2, \ldots, p_K)$ 는 대각 성분들로 구성되는 모든 사용자 단말들에 대한 전력 할당 행렬을 의미한다. 또한, $\mathbf{\Phi}$ 은 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬이고, $\mathbf{H}_2 = [\mathbf{h}_{2,1}^T, \mathbf{h}_{2,2}^T, \ldots, \mathbf{h}_{2,K}^T]^T \in \mathbb{C}^{K\times N}$ 는 지능형 반사 표면과 K 개의 사용자 단말들 사이의 채널을 의미하며, $\mathbf{H}_1 \in \mathbb{C}^{N\times M}$ 는 기지국과 지능형 반사 표면 사이의 채널을 의미한다.

[0017] 한편, 상기 제1 기법 수행 단계는, 상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식을 근사화하는 근사화 단계; 상기 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하는 변형 단계; 상기 변형된 송신 전력 변환식에서 지능형 반사 표면을 경유하는 기지국과 사용자 단말들 사이의 채널 행렬들의 합에 대한 특이 값 분해를 통해 획득되는 가장 큰 특이 값에 해당하는 특이 벡터를 이용하여, 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 생성하는 최적의 위상 변환 행렬 생성 단계; 를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 한다.

[0018] 한편, 상기 제2 기법 수행 단계는, 상기 [수학식 2] 의 송신 전력 변환식을 근사화하는 근사화 단계; 상기 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하는 변형 단계; 상기 변형된 송신 전력 변환식을 최대화하도록 하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 생성하는 위상 변환 행렬 생성 단계; 상기 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간의 오차를 산출하고, 상기 산출된 오차가 소정의 오차 범위 내에 포함되는지에 따라 상기 생성된 위상 변환 행렬이 수렴조건을 충족하는지의 여부를 판단하는 수렴조건 충족여부 판단 단계; 상기 수렴조건 충족여부 판단 단계를 통해 비교 위상 변환 행렬과의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속하는 것으로 생성된 위상 변환 행렬을, 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬로 결정하는 최적의 위상 변환 행렬 결정 단계; 를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 한다.

[0019] 여기서, 상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식을 근사화하는 단계는, 다음의 [수학식 3]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0020] [수학식 3]

$$\|\mathbf{W}\|_F^2 = Tr\left((\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^{-1}\right) \overset{(a)}{\geq} \frac{K^2}{Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)},$$

[0021]

[0022] 여기서, (a)는 정부호 행렬의 부등식 성질을 활용하여 하한의 수식으로 근사화 하는 과정을 의미한다.

[0023] 또한, 상기 [수학식 3]에 따르는 근사화 된 송신 전력 변환식을 변형하는 단계는, 다음의 [수학식 4]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0024] [수학식 4]

$$\begin{aligned}\max_{\boldsymbol{\Phi}} & Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)\\ &= \sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}^H)\\ &= \sum_{k=1}^{K}(\boldsymbol{\varphi}^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H\boldsymbol{\varphi})\\ &= \boldsymbol{\varphi}^H\sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H)\boldsymbol{\varphi}\\ &= \boldsymbol{\varphi}^H\mathbf{Z}\boldsymbol{\varphi},\end{aligned}$$

[0025]

[0026] 여기서, $\boldsymbol{\varphi} = [e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, ..., e^{j\phi_N}]^H \in \mathbb{C}^{N\times 1}$ 는 지능형 반사 표면의 위상 변환 값들로 구성된 벡터를 의미하며, $\tilde{\mathbf{H}}_{2,k} = \mathrm{diag}(\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}) \in \mathbb{C}^{N\times N}$ 는 k 번째 사용자 단말의 채널 벡터를 대각 성분으로 갖는 행렬을 의미한다. 또한, $\mathbf{Z}$ 는 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국(송신단)과 사용자 단말들(수신단) 사이의 채널 행렬들의 합을 나타내는 $\sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H)$ 을 치환한 것이다.

[0027] 한편, 상기 제1 기법 수행 단계의 최적의 위상 변환 행렬 생성 단계에서, 상기 [수학식 4]에 따라 변형된 송신 전력 변환식을 기반으로 특이 값 분해를 통해 생성되는 최적의 위상 변환 행렬은, 다음의 [수학식 5]에 따라 산출되는 위상 변환 벡터 $\boldsymbol{\varphi}$ 로 구성되는 것을 특징으로 한다.

[0028] [수학식 5]

$$\boldsymbol{\varphi} = e^{j\arg(\mathbf{v}_{\mathbf{Z},1})}$$

[0029]

[0030] 한편, 상기 제2 기법 수행 단계의 위상 변환 행렬 생성 단계에서, 상기 생성되는 위상 변환 행렬은, 다음의 [수학식 6]에 따르는 위상 변환 벡터 $\boldsymbol{\varphi}_{(i+1)}$ 로 구성되는 것을 특징으로 한다.

[0031] [수학식 6]

$$\boldsymbol{\varphi}_{(i+1)} = e^{j\arg(\mathbf{Z}^H\boldsymbol{\varphi}_{(i)})}$$
$$\boldsymbol{\Phi} = \mathrm{diag}(\boldsymbol{\varphi}^H{}_{(i+1)})$$

[0032]

[0033] 여기서, i는 반복 횟수를 의미하고, $\mathbf{Z}$ 는 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국과 사용자 단말들 사이의

채널 행렬들의 합을 나타낸다. 또한, ^{H}는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0034] 한편, 상기 수렴조건 충족여부 판단 단계는, 상기 위상 변환 행렬 생성 단계에서 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간의 오차를 산출하는 오차 산출 단계; 상기 산출된 두 행렬 간의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속하는지를 비교하는 비교 단계; 상기 비교 결과, 상기 산출된 오차가 소정의 오차 범위 내에 속하지 않으면, 상기 비교 변환 위상 변환 행렬을 상기 생성된 위상 변환 행렬로 갱신하는 비교 위상 변환 행렬 갱신 단계; 상기 비교 위상 변환 행렬 갱신 단계 후, 상기 위상 변환 행렬 생성 단계로 회귀하는 회귀 단계; 를 포함하여 구성되며, 상기 회귀 단계 후, 생성되는 위상 변환 행렬이 비교 변환 행렬과의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속할 때까지 상기 위상 변환 행렬 생성 단계 내지 수렴조건 충족여부 판단 단계를 반복 수행하는 것; 을 특징으로 한다.

[0035] 한편, 상기 제3 기법 수행 단계는, 상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식에서 지능형 반사 표면과 K명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_2$과 초기 위상 변환 행렬 $\mathbf{\Phi}$의 결합 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}$의 최적의 해를 구하는 최적의 해 획득 단계; 상기 송신 전력 변환식으로부터 특이 값 분해를 통해 기지국과 지능형 반사 표면 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_1$에 대하여 상기 송신 전력 변환식을 최대화할 수 있는 최적의 행렬을 구하는 최적의 행렬 획득 단계; 상기 획득된 결합 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}$의 최적의 해와 상기 최적의 행렬과의 평균제곱오차(Mean Square Error, MSE)를 최소화하기 위한 목적함수를 설정하는 목적함수 설정 단계; 상기 설정된 목적함수를 변형하는 목적함수 변형 단계; 상기 변형된 목적함수를 최대화하는 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값을 산출하여 최적의 위상 변환 행렬을 생성하는 최적의 위상 변환 행렬 생성 단계; 를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 한다.

[0036] 여기서, 상기 최적의 해 획득 단계에서 획득되는 결합 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}$의 최적의 해는, 다음의 [수학식 7]에 따라 구해지는 것을 특징으로 한다.

[0037] [수학식 7]

[0038] $$(\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi})_{\text{opt}} = \mathbf{V}_{(1:K)}^{H} = \mathbf{V}_{\text{opt}}^{H} \in \mathbb{C}^{N\times K}$$

[0039] 여기서, $\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}$의 최적의 해는, 지능형 반사 표면의 반사 소자의 위상에 대한 제약이 존재하지 않는 경우 얻어진다. 또한, $\mathbf{V}_{(1:K)}$는 $\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^{H} = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^{H}$의 가장 큰 K개의 특이 값에 해당하는 특이 행렬을 의미한다.

[0040] 한편, 상기 목적함수 설정 단계에서 설정되는 목적함수는, 다음의 [수학식 8]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0041] [수학식 8]

[0042] $$\min_{\mathbf{\Phi}} Tr\left\{(\mathbf{V}_{\text{opt}} - \mathbf{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^{H})(\mathbf{V}_{\text{opt}} - \mathbf{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^{H})^{H}\right\}$$
$$\text{s.t.}\ \ |\mathbf{\Phi}(n,n)| = 1,\ \ n = 1,\ldots,N.$$

[0043] 여기서, $\mathbf{H}_2$는 지능형 반사 표면과 K명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬이고, $\mathbf{\Phi}$은 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬이며, N은 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수를 의미한다. 또한, ^{H}는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0044] 한편, 상기 목적함수 변형 단계에서 변형되는 목적함수는, 다음의 [수학식 9]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0045] [수학식 9]

$$\sum_{n=1}^{N}\max_{\phi_n}\left(\alpha_e e^{-j(\beta_n+\phi_n)}+\alpha_e e^{j(\beta_n+\phi_n)}\right)$$

[0046]

[0047] 한편, 상기 최적의 위상 변환 행렬 생성 단계에서, 상기 [수학식 9]과 같이 변형된 목적함수를 최대화하는 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값을 산출하는 것은, 다음의 [수학식 10]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0048] [수학식 10]

$$\phi_n = -\beta_n = -\arg(\mathbf{v}_n\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}).$$

[0049]

[0050] 여기서, n = 1, 2, …, N (N 은 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수)이고, $\mathbf{v}_n$ 과 $\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}$는 $\mathbf{V}_{opt}$ 과 $\tilde{\mathbf{H}}_{2'}$ 의 n번째 행 벡터를 의미한다. 또한, $\tilde{\mathbf{H}}_{2'}$ 는 [수학식 5]에 따르는 송신 전력 변환식에서 지능형 반사 표면과 K 명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$ 과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$ 의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬을 의미한다.

[0051] 한편, 상기 수렴조건 충족여부 판단 단계에서, 초기 비교 위상 변환 행렬은, 각 위상 변환 행렬 값이 1로 구성된 행렬로 설정되는 것을 특징으로 한다.

[0052] 본 발명에 따른 M 개의 송신 안테나를 가진 기지국에서 2차원으로 배열된 N 개의 반사 소자를 가지는 지능형 반사 표면(IRS)을 통해 단일 수신 안테나를 가진 K 개의 사용자 단말로 데이터를 송신하는 다중 사용자 MISO 기반의 무선 통신 시스템은, 소정의 위상 변환 행렬 획득 방식으로 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 최적의 위상 변환 행렬을 획득하여, 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값으로 제어하는 제어부를 포함하는 기지국; 상기 기지국의 제어부에 의해 제어되는 위상 변화율에 따라 상기 기지국으로부터 입력되는 신호에 대한 위상을 조절하여 적어도 둘 이상의 사용자 단말로 반사하는 지능형 반사 표면(IRS); 및 각 수신 안테나를 통해 상기 지능형 반사 표면의 각 반사 소자에 의해 위상이 조절된 신호를 수신하는 사용자 단말들; 을 포함하여 구성되며, 상기 제어부에서 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것은, 지능형 반사 표면을 거쳐 기지국으로부터 사용자 단말이 수신하는 신호를 이용하여 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 나타내는 주파수 스펙트럼 효율식을 생성하고, 상기 생성된 주파수 스펙트럼 효율식을 기지국의 송신 전력에 대한 제약을 최소화하는 것으로 변환하여 송신 전력 변환식을 도출한 후, 상기 도출된 송신 전력 변환식에 포함된 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 볼록 함수로 변환하는 과정을 기반으로 최적화를 수행하는 제1 내지 제3 기법 중 어느 하나의 기법을 사용하여 획득하는 것을 특징으로 한다.

[0053] 여기서, 상기 생성된 주파수 스펙트럼 효율식은 다음의 [수학식 1]에 따르며, 상기 [수학식 1]로부터 도출되는 송신 전력 변환식은, 다음의 [수학식 2]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0054] [수학식 1]

$$R=\sum_{k=1}^{K}\log\left(1+\frac{p_k}{\sigma^2}\right)$$

$$\text{제약 1)}\ \|\mathbf{W}\|_F^2 \le P_{max}$$

$$\text{제약 2)}\ |\mathbf{\Phi}(n,n)|=1,\ n=1,\ldots,N$$

[0055]

[0056] 여기서, 제약 1은 기지국의 송신 전력 제약을 의미하며, 제약 2는 지능형 반사 표면이 위상만을 조절할 수 있기 때문에 발생하는 단위 진폭의 제약을 의미한다. 또한, p_k 는 k 번째 사용자 단말에 할당되는 송신 전력이고,

$P_{\max}$ 는 기지국의 최대 송신 전력이며, σ^2 은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)의 분산을 의미한다.

[0057] [수학식 2]

$$\begin{aligned}\|\mathbf{W}\|_F^2 &= Tr(\mathbf{W}\mathbf{W}^H)\\ &= Tr\left((\mathbf{H}_{\text{eff}}\mathbf{H}_{\text{eff}}^H)^{-1}\mathbf{P}\right)\\ &= Tr\left((\mathbf{P}^{-1/2}\mathbf{H}_{\text{eff}}\mathbf{H}_{\text{eff}}^H\mathbf{P}^{-1/2})^{-1}\right)\\ &= Tr\left((\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^{-1}\right)\end{aligned}$$

[0058]

[0059] 여기서, $\tilde{\mathbf{H}}_2 = \mathbf{P}^{-1/2}\mathbf{H}_2$, 이며, $\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1$ 은 지능형 반사 표면을 거치는 기지국과 사용자 단말 사이의 실효 채널이고, $\mathbf{P} = \text{diag}(p_1, p_2, \ldots, p_K)$ 는 대각 성분들로 구성되는 모든 사용자 단말들에 대한 전력 할당 행렬을 의미한다. 또한, $\boldsymbol{\Phi}$ 은 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬이고, $\mathbf{H}_2 = [\mathbf{h}_{2,1}^T, \mathbf{h}_{2,2}^T, \ldots, \mathbf{h}_{2,K}^T]^T \in \mathbb{C}^{K\times N}$ 는 지능형 반사 표면과 K 개의 사용자 단말들 사이의 채널을 의미하며, $\mathbf{H}_1 \in \mathbb{C}^{N\times M}$ 는 기지국과 지능형 반사 표면 사이의 채널을 의미한다.

[0060] 한편, 상기 제1 기법은, 상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식을 변형하여 근사화하고, 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하여, 이를 기반으로 지능형 반사 표면을 경유하는 기지국과 사용자 단말들 사이의 채널 행렬들의 합에 대한 특이 값 분해를 통해 획득되는 가장 큰 특이 값에 해당하는 특이 벡터를 이용하여 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것; 을 특징으로 한다.

[0061] 한편, 상기 제2 기법은, 상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식을 변형하여 근사화하고, 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하여, 이를 기반으로 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 생성하고, 상기 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간 오차가 소정의 수렴 조건을 충족하도록 생성된 위상 변환 행렬을 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬로 획득하는 것; 을 특징으로 한다.

[0062] 한편, 상기 제3 기법은, 지능형 반사 표면과 K 개의 사용자 단말들 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$ 의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬 $\ddot{\mathbf{H}}_2$과 지능형 반사 표면의 반사 소자들의 소정의 초기 위상 값을 대각 성분으로 갖는 초기 위상 변환 행렬 $\boldsymbol{\Phi}$ 의 결합 행렬과 상기 [수학식 2]의 송신 전력 변환식을 이용하여 얻어지는 최적의 행렬과의 오차를 최소화하기 위한 목적함수를 설정하고, 설정된 목적함수를 변형하여, 변형된 목적함수를 기반으로 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것; 을 특징으로 한다.

[0063] 한편, 상기 근사화 된 [수학식 2]의 송신 전력 변환식은, 다음의 [수학식 3]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0064] [수학식 3]

$$\begin{aligned}\|\mathbf{W}\|_F^2 &= Tr\left((\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^{-1}\right)\\ &\overset{(a)}{\geq} \frac{K^2}{Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)},\end{aligned}$$

[0065]

[0066] 여기서, (a)는 정부호 행렬의 부등식 성질을 활용하여 하한의 수식으로 근사화 하는 과정을 의미한다.

[0067] 또한, 상기 변형된 [수학식 3]의 송신 전력 변환식은, 다음의 [수학식 4]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0068] [수학식 4]

$$\begin{aligned}&\max_{\Phi} Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\Phi\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\Phi^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)\\&=\sum_{k=1}^{K}\left(\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}\Phi\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\Phi^{-1}\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}^H\right)\\&=\sum_{k=1}^{K}\left(\boldsymbol{\varphi}^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H\boldsymbol{\varphi}\right)\\&=\boldsymbol{\varphi}^H\sum_{k=1}^{K}\left(\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H\right)\boldsymbol{\varphi}\\&=\boldsymbol{\varphi}^H\mathbf{Z}\boldsymbol{\varphi},\end{aligned}$$

[0069]

[0070] 여기서, $\boldsymbol{\varphi}=[e^{j\phi_1},e^{j\phi_2},\ldots,e^{j\phi_N}]^H\in\mathbb{C}^{N\times 1}$ 는 지능형 반사 표면의 위상 변환 값들로 구성된 벡터를 의미하며, $\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}=\mathrm{diag}(\tilde{\mathbf{h}}_{2,k})\in\mathbb{C}^{N\times N}$ 는 k 번째 사용자 단말의 채널 벡터를 대각 성분으로 갖는 행렬을 의미한다. 또한, $\mathbf{Z}$ 는 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국(송신단)과 사용자 단말들(수신단) 사이의 채널 행렬들의 합을 나타내는 $\sum_{k=1}^{K}\left(\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H\right)$ 을 치환한 것이다.

[0071] 한편, 상기 제1 기법은, 상기 [수학식 4]에 따르는 변형된 송신 전력 변환식을 기반으로 특이 값 분해를 통해 다음의 [수학식 5]에 따라 산출되는 위상 변환 벡터 $\boldsymbol{\varphi}$ 로 구성되는 위상 변환 행렬을 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것을 특징으로 한다.

[0072] [수학식 5]

[0073] $$\boldsymbol{\varphi}=e^{j\arg(\mathbf{v}_{\mathbf{Z},1})}$$

[0074] 한편, 상기 제2 기법은, 상기 [수학식 4]와 같이 변형된 송신 전력 변확식을 기반으로 다음의 [수학식 6]에 따르는 위상 변환 벡터 $\boldsymbol{\varphi}_{(i+1)}$ 로 구성되는 위상 변환 행렬을 생성하는 것을 특징으로 한다.

[0075] [수학식 6]

[0076] $$\boldsymbol{\varphi}_{(i+1)}=e^{j\arg(\mathbf{Z}^H\boldsymbol{\varphi}_{(i)})}$$
$$\boldsymbol{\Phi}=\mathrm{diag}(\boldsymbol{\varphi}^H{}_{(i+1)})$$

[0077] 여기서, i는 반복 횟수를 의미하고, $\mathbf{Z}$ 는 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국과 사용자 단말들 사이의 채널 행렬들의 합을 나타낸다. 또한, ^{H}는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0078] 한편, 상기 제2 기법에서, 초기 비교 위상 변환 행렬은 각 위상 변환 값이 1로 구성된 행렬로 설정되며, 그 이후에는 상기 소정의 수렴조건을 충족하지 않는 것으로 생성된 위상 변환 행렬로 갱신되는 것을 특징으로 한다.

[0079] 한편, 상기 제3 기법은, 다음의 [수학식 8]와 같이 설정된 목적함수를 [수학식 9]와 같이 변형하는 것을 특징으로 한다.

[0080] [수학식 8]

$$\min_{\Phi} Tr\left\{(\mathbf{V}_{opt}-\Phi^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)(\mathbf{V}_{opt}-\Phi^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^H\right\}$$
$$\text{s.t. } |\Phi(n,n)|=1,\ n=1,\ldots,N.$$

[0081]

[0082] 여기서, $\mathbf{H}_2$는 지능형 반사 표면과 K명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬이고, Φ은 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬이며, N은 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수를 의미한다. 또한, ^{H}는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0083] [수학식 9]

$$\sum_{n=1}^{N}\max_{\phi_n}\left(\alpha_n e^{-j(\beta_n+\phi_n)}+\alpha_n e^{j(\beta_n+\phi_n)}\right)$$

[0084]

[0085] 한편, 상기 제3 기법은, 상기 [수학식 9]에 따르는 변형된 목적함수를 최대화하는 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값을 다음의 [수학식 10]에 따라 산출하여 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것을 특징으로 한다.

[0086] [수학식 10]

$$\phi_n=-\beta_n=-\arg(\mathbf{v}_n\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}).$$

[0087]

[0088] 여기서, n = 1, 2, …, N (N은 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수)이고, $\mathbf{v}_n$과 $\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}$는 $\mathbf{V}_{opt}$과 $\tilde{\mathbf{H}}_2$의 n번째 행 벡터를 의미한다. 또한, $\tilde{\mathbf{H}}_2$는 [수학식 5]에 따르는 송신 전력 변환식에서 지능형 반사 표면과 K명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬을 의미한다.

발명의 효과

[0089] 본 발명에 따른 위상 설계 기법으로 지능형 반사 표면(IRS)의 각 반사 소자의 위상을 설계하여 사용함으로써, 극심한 경로 손실과 장애물로 인한 신호 감쇠로 송수신기 사이의 직접적인 전파 경로가 존재하지 않는 환경에서도 효과적인 통신이 가능하다.

[0090] 또한, 통신 시스템의 주파수 스펙트럼 및 전력 효율을 향상시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0091] 도 1은 본 발명에 따른 지능형 반사 표면(IRS)이 적용된 다중 사용자 MISO 시스템의 전체적인 구성을 나타내는 도면이다.

도 2는 본 발명에 따른 지능형 반사 표면(IRS)의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법을 도시한 도면이다.

도 3은 본 발명의 제1 기법 수행 단계의 세부 단계를 도시한 도면이다.

도 4는 본 발명의 제2 기법 수행 단계의 세부 단계를 도시한 도면이다.

도 5는 제2 기법 설계 알고리즘을 보여주는 도면이다.

도 6은 본 발명의 제3 기법 수행 단계의 세부 단계를 도시한 도면이다.

도 7은 제3 기법 설계 알고리즘을 보여주는 도면이다.

도 8 내지 11은 본 발명에 따른 3가지 기법과 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 랜덤 값으로 구성한 랜덤 기법을 적용하여 나타나는 시뮬레이션 결과를 보여주는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0092] 아래에서는 첨부한 도면을 참조하여 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 본 발명의 실시 예를 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시 예에 한정되지 않는다. 그리고 도면에서 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면부호를 붙였다.

[0093] 이하, 도면을 참조하여 본 발명에 대하여 상세하게 설명한다.

[0094] 1. 본 발명이 적용되는 환경

[0095] 도 1은 지능형 반사 표면이 적용된 다중 사용자 MISO 시스템의 전체적인 구성을 나타내는 도면이다.

[0096] 본 발명에서는, 도 1에 보이는 것과 같이 단일 안테나를 장착한 다수의 사용자 단말이 존재하는 환경에서 지능형 반사 표면을 활용하는 다중 사용자 MISO 통신 시스템을 고려한다. 이 때, 기지국과 사용자 단말 사이에 직접적인 전파 경로(L)는 장애물에 의해 차단되어 있고, 오직 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 경로만 존재하는 것으로 가정한다.

[0097] 2. 본 발명에 따른 무선 통신 시스템

[0098] 본 발명의 무선 통신 시스템은, 앞서 설명한 도 1을 참조하면 기지국(100), 지능형 반사 표면(200), 사용자 단말(300)을 포함하여 구성될 수 있다.

[0099] 2.1. 기지국(100)

[0100] 기지국(100)은, 도면에는 도시되지 않았지만 M 개의 균일한 선형 배열 안테나를 구비하고 있다.

[0101] 상기 기지국(100)은, 지능형 반사 표면(200)의 위상 변화율을 제어하는 제어부(미도시)를 포함하여 구성될 수 있다.

[0102] 본 발명에 따른 제어부(미도시)는, 기지국(100)과 사용자 단말(300) 사이의 주파수 스펙트럼 효율을 최대화 할 수 있도록, 후술하는 알고리즘을 통해 획득되는 최적의 위상 변환 행렬을 지능형 반사 표면(200)에 적용하여 위상 변화율을 제어하는 형태로 구현될 수 있다.

[0103] 2.2. 지능형 반사 표면(200)

[0104] 지능형 반사 표면(200)은, 2차원으로 배열된 N 개의 수동 반사 소자(210)를 포함하고 있다. 상기 지능형 반사 표면(200)은, 상기 기지국(100)의 제어에 따라 적용되는 위상 변화율로 기지국(100)으로부터 입력되는 신호에 대한 위상을 조절하여 사용자 단말(300)로 반사하도록 구성된다.

[0105] 이러한 지능형 반사 표면(200)은, 예를 들어 건물의 외벽에 배치되어 활용될 수 있다.

[0106] 2.3. 사용자 단말(300, UE 1 ~ UE K)

[0107] 앞서 설명한 것과 같이 본 발명은 다중 사용자 MISO 통신 시스템 환경을 고려하는 것으로서, K 개의 사용자 단말(300, UE 1 ~ UE K)은 단일 안테나를 구비하며, 상기 지능형 반사 표면(200)을 통해 위상이 조절된 신호를 전달 받아 수신한다.

[0108] 이하에서는, 본 발명에 따른 무선 통신 시스템에 적용되는 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 지능형 반사 표면(200)의 최적의 위상 변환 행렬을 설계하는 방법에 대하여 설명한다. 후술하는 방법은, 앞서 설명한 것과 같이 기지국(100)의 제어부(미도시)에서 수행하도록 구성될 수 있으며, 이를 통해 최적의 위상 변환 행렬의 위상 변환 값들을 지능형 반사 표면(200)에 적용하여 위상 변화율을 제어하는 형태로 구현될 수 있다.

[0109] 3. 본 발명에 따른 지능형 반사 표면(IRS)의 최적의 위상 변환 행렬 획득 방법

[0110] 도 2는 본 발명에 따른 지능형 반사 표면(IRS)의 최적의 위상 변환 행렬 설계 방법을 도시한 도면이다. 도 2를 참조하면, 본 발명의 방법은, 크게 송신 전력 변환식 도출 단계(S100) 및 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계

(S200)를 포함하여 구성될 수 있다.

[0111] 본 발명에 따른 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 지능형 반사 표면(IRS)의 최적의 위상 변환 행렬을 설계하는 방법은, 앞서 설명한 것과 같이 기지국은 M 개의 균일한 선형 배열 안테나를 장착하고 있으며, K명의 단일 안테나 사용자 단말 존재하는 환경에서 2차원의 균일한 평면에 N 개의 수동 반사 소자들로 구성되어 있는 지능형 반사 표면(IRS)을 활용하는 시스템을 고려하는 것이다.

[0112] 먼저, 이 때, k번째 사용자 단말이 수신하는 신호는 아래의 [수학식 1]과 같이 표현된다.

[0113] [수학식 1]

[0114] $$y_k = \mathbf{h}_{2,k}\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{x} + n_k$$

[0115] 여기서, $\mathbf{H}_2 = \left[\mathbf{h}_{2,1}^T, \mathbf{h}_{2,2}^T, \ldots, \mathbf{h}_{2,K}^T\right]^T \in \mathbb{C}^{K\times N}$ 는 지능형 반사 표면과 K개의 사용자 단말 사이의 채널을 의미하며, $\mathbf{H}_1 \in \mathbb{C}^{N\times M}$ 는 기지국과 지능형 반사 표면 사이의 채널을 의미한다. 또한, $\mathbf{\Phi} = \mathrm{diag}(e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, \ldots, e^{j\phi_N})$ 는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 의미하며 대각 성분들로 구성된다. $\mathrm{diag}(\cdot)$ 는 괄호 안의 값들을 대각 성분으로 갖는 대각 행렬을 의미하고, 위상 값들은 $\phi_n \in [0, 2\pi]$의 범위를 만족한다. $\mathbf{x} = \sum_{k=1}^{K} \mathbf{w}_k s_k$ 는 프리코딩 된 송신 신호이고, $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \ldots, \mathbf{w}_K] \in \mathbb{C}^{M\times K}$ 는 K개의 열벡터로 구성되어 있는 프리코딩 행렬을 의미한다. 그리고, $s_k \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 는 k번째 사용자 단말의 송신 심볼이고, $n_k \sim \mathcal{CN}(0,\sigma^2)$ 은 가우시안 잡음을 나타낸다.

[0116] 3.1. 송신 전력 변환식 도출 단계(S100)

[0117] 위 [수학식 1]에 따르는 사용자 단말의 수신 신호를 이용하여 본 발명에서 최대화하고자 하는 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 나타내면, 아래의 [수학식 2]와 같이 표현된다.

[0118] [수학식 2]

[0119] $$R = \sum_{k=1}^{K} \log\left(1 + \frac{\left|\mathbf{h}_{2,k}\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{w}_k\right|^2}{\sum_{i\neq k}\left|\mathbf{h}_{2,i}\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{w}_i\right|^2 + \sigma^2}\right)$$

[0120] 여기서, 분모의 $\sum_{i\neq k}\left|\mathbf{h}_{2,i}\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{w}_i\right|^2$ 의 부분은 사용자 단말 간 간섭에 해당하며 이를 제거하기 위하여 기지국(100)에서는 제로 포싱(zero-forcing) 프리코딩을 수행한다. 지능형 반사 표면을 거치는 기지국과 사용자 단말 사이의 실효 채널을 $\mathbf{H}_{\mathrm{eff}} = \mathbf{H}_2\mathbf{\Phi}\mathbf{H}_1$ 이라 할 때, 프리코딩 행렬 $\mathbf{W}$ 은 아래의 [수학식 3]과 같이 나타낸다.

[0121] [수학식 3]

[0122] $$\mathbf{W} = \bar{\mathbf{W}}\sqrt{\mathbf{P}}$$

[0123] 여기서, $\bar{\mathbf{W}} = \mathbf{H}_{\text{eff}}^{H}(\mathbf{H}_{\text{eff}}\mathbf{H}_{\text{eff}}^{H})^{-1}$ 는 제로 포싱(zero-forcing) 프리코딩 행렬이고, $\mathbf{P} = \text{diag}(p_1, p_2, \ldots, p_K)$ 는 대각 성분들로 구성되는 모든 사용자 단말들에 대한 전력 할당 행렬을 나타낸다.

[0124] 상기 [수학식 3]의 프리코딩 행렬을 이용하는 프리코딩을 통해 사용자 단말 간 간섭을 제거하고 나면, 상기 [수학식 2]에 따르는 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율은 아래의 [수학식 4]로 변환된다.

[0125] [수학식 4]

[0126]
$$R = \sum_{k=1}^{K} \log\left(1 + \frac{p_k}{\sigma^2}\right)$$
$$\text{제약 1)} \ \|\mathbf{W}\|_F^2 \le P_{\max}$$
$$\text{제약 2)} \ |\mathbf{\Phi}(n,n)| = 1, \ n = 1, \ldots, N$$

[0127] 여기서, 제약 1은 기지국의 송신 전력 제약을 의미하며, 제약 2는 지능형 반사 표면이 위상만을 조절할 수 있기 때문에 발생하는 단위 진폭의 제약을 의미한다. 또한, p_k 는 k 번째 사용자 단말에 할당되는 송신 전력이고, $P_{\max}$ 는 기지국의 최대 송신 전력이며, σ^2 은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)의 분산을 의미한다.

[0128] 따라서, 본 발명은 위 [수학식 4]의 R, 즉 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 최대화되도록 하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 설계하는 것을 목적으로 하는 것이며, 이는 기지국(100)의 송신 전력에 대한 제약 1을 최소화하는 것으로 변환될 수 있다.

[0129] 이에 따라, 송신 전력은 다음의 [수학식 5]와 같은 형태의 송신 전력 변환식으로 변환될 수 있다.

[0130] 즉, 송신 전력 변환식 도출 단계(S100)는, 상기 [수학식 4]에 따르는 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 기지국(송신단)의 송신 전력에 대한 제약을 최소화 하는 것으로 변환하여 위 [수학식 5]에 따르는 송신 전력 변환식을 도출하는 것이다.

[0131] 이 때, 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬 $\mathbf{\Phi}$ 는 역행렬 내부에 존재하므로 비 볼록(Non-convex) 최적화 문제가 발생한다. 따라서, 상기 비 볼록 함수(non-convex function)의 문제를 볼록 함수(convex founction) 형태로 변환하여 해결하여야 한다.

[0132] 후술하는 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계(S200)에서는 상기 문제를 해결하여 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 최적의 위상 변환 행렬을 구하는 3가지 기법을 제시한다.

[0133] 3.2. 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계(S200)

[0134] 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계(S200)는, 상술한 최적화 문제를 해결하여 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 최적의 위상 변환 행렬을 얻을 수 있는 여러 가지의 기법으로 구성된다.

[0135] 보다 구체적으로, 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계(S200)는 상기 [수학식 5]에 따르는 송신 전력 변환식에 포함된 지능형 반사 표면(IRS)의 위상 변환 행렬을 볼록 함수(convex function)로 변환하는 과정을 기반으로 최적화를 수행하여, 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 지능형 반사 표면(IRS)의 위상 변환 행렬을 획득하도록 구성될 수 있다.

[0136] 3.2.1. 제1 기법 수행 단계(S210)

[0137] 도 3은 제1 기법 수행 단계의 세부 단계를 도시한 도면이다. 도 3을 참조하면, 제1 기법 수행 단계(S210)는, 상기 도출된 [수학식 5]의 송신 전력 변환식을 변형하여 근사화하고, 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국(송신단)의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하여, 이를 기반으로 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국(송신단)과 사용자 단말들(수신단) 사이의 채널 행렬들의 합에 대한 특이 값 분해를 통해 획득되는 가장 큰 특이 값에 해당하는 특이 벡터를 이용하여, 현재 주기의 지능형 반사 표면(IRS)의 위상 변환 행렬을 획득하는 것으로 구성될 수 있다. 세부적인 과정은 아래와 같이 이루어진다.

[0138] 가. 근사화 단계(S212)

[0139] 먼저, 상기 [수학식 5]에 따르는 송신 전력 변환식을 근사화 하는 근사화 단계(S212)를 수행하며, 이는 다음의 [수학식 6]에 따른다.

[0140] [수학식 6]

$$\|\mathbf{W}\|_F^2 = Tr\left((\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^{-1}\right) \overset{(a)}{\geq} \frac{K^2}{Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)},$$

[0141]

[0142] 여기서, (a)는 정부호 행렬의 부등식 성질을 활용하여 하한의 수식으로 근사화 하는 과정을 의미한다.

[0143] 나. 변형 단계(S214)

[0144] 다음, 상기 [수학식 6]에 따라 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국(송신단)의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하는 단계(S214)를 수행한다. 이는 다음의 [수학식 7]에 따른다.

[0145] [수학식 7]

$$\begin{aligned}
&\max_{\boldsymbol{\Phi}} Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)\\
&= \sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}^H)\\
&= \sum_{k=1}^{K}(\boldsymbol{\varphi}^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H\boldsymbol{\varphi})\\
&= \boldsymbol{\varphi}^H\sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H)\boldsymbol{\varphi}\\
&= \boldsymbol{\varphi}^H\mathbf{Z}\boldsymbol{\varphi},
\end{aligned}$$

[0146]

[0147] 여기서, $\boldsymbol{\varphi} = [e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, ..., e^{j\phi_N}]^H \in \mathbb{C}^{N\times 1}$ 는 지능형 반사 표면의 위상 변환 값들로 구성된 벡터를 의미하며, $\tilde{\mathbf{H}}_{2,k} = \mathrm{diag}(\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}) \in \mathbb{C}^{N\times N}$ 는 k 번째 사용자 단말의 채널 벡터를 대각 성분으로 갖는 행렬을 의미한다. 또한, $\mathbf{Z}$ 는 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국(송신단)과 사용자 단말들(수신단) 사이의 채널 행렬들의 합을 나타내는 $\sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H)$ 을 치환한 것이다.

[0148] 다. 최적의 위상 변환 행렬 생성 단계(S216)

[0149] 최적의 위상 변환 행렬 생성 단계(S216)는, 상기 [수학식 7]에서 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국(송신단)과 사용자 단말들(수신단) 사이의 채널 행렬들의 합에 대한 특이 값 분해를 통해 획득되는 가장 큰 특이 값에 해당하는 특이 벡터를 이용하여, 현재 주기의 지능형 반사 표면(IRS)의 위상 변환 행렬을 생성할 수 있다.

[0150] 구체적으로, 상기 [수학식 7]에서 지능형 반사 표면을 경유하는 기지국(송신단)과 사용자 단말들(수신단) 사이의 채널 행렬들의 합 $\mathbf{Z}$ 의 특이 값 분해가 $\mathbf{Z} = \mathbf{V}_Z\boldsymbol{\Sigma}_Z\mathbf{V}_Z^H$ 로 표현된다고 하였을 때, 가장 큰 특이 값에 해당하는 특이 벡터 $\mathbf{v}_{Z,1}$ 를 활용하여 위상 변환 벡터 $\boldsymbol{\varphi}$ 를 구성하며, 이는 다음의 [수학식 8]과 같이 표현된다.

[0151] [수학식 8]

$$\boldsymbol{\varphi} = e^{j\arg(\mathbf{v}_{Z,1})}$$

[0152]

[0153] 위 [수학식 8]에 따라 산출되는 위상 변환 벡터 $\boldsymbol{\varphi}$ 를 이용하여 주파수 스펙트럼 효율을 최대화 하는 최적의 위상 변환 행렬 $\boldsymbol{\Phi}$ 를 생성/획득할 수 있다.

[0154] 3.2.2. 제2 기법 수행 단계(S220)

[0155] 도 4는 제2 기법 수행 단계의 세부 단계를 도시한 도면이고, 도 5는 제2 기법 설계 알고리즘을 보여주는 도면이다. 도 4 및 5를 참조하면, 제2 기법 수행 단계(S220)는, 상기 도출된 [수학식 5]의 송신 전력 변환식을 변형하여 근사화하고, 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국(송신단)의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하여, 이를 기반으로 후술하는 [수학식 9]에 따라 지능형 반사 표면(IRS)의 위상 변환 행렬을 생성하고, 상기 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간 오차가 소정의 수렴 조건을 충족하도록 생성된 위상 변환 행렬을 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 지능형 반사 표면(IRS)의 최적의 위상 변환 행렬로 획득하는 것으로 구성될 수 있다. 세부적인 과정은 아래와 같이 이루어진다.

[0156] 가. 근사화 단계(S221)

[0157] 먼저, 상기 [수학식 5]에 따르는 송신 전력 변환식을 근사화하는 근사화 단계(S221)를 수행하며, 이는 다음의 [수학식 6]에 따른다.

[0158] [수학식 6]

$$\begin{aligned}\|\mathbf{W}\|_F^2 &= Tr\left((\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^{-1}\right)\\ &\overset{(a)}{\geq}\frac{K^2}{Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)},\end{aligned}$$

[0159]

[0160] 여기서, (a)는 정부호 행렬의 부등식 성질을 활용하여 하한의 수식으로 근사화 하는 과정을 의미한다.

[0161] 나. 변형 단계(S222)

[0162] 다음, 상기 [수학식 6]에 따라 근사화 된 송신 전력 변환식을 기지국(송신단)의 송신 전력을 최대화하는 것으로 변형하는 단계(S222)를 수행한다. 이는 다음의 [수학식 7]에 따른다.

[0163] [수학식 7]

$$\begin{aligned}&\max_{\boldsymbol{\Phi}} Tr\left(\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H\right)\\ &=\sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{h}}_{2,k}^H)\\ &=\sum_{k=1}^{K}(\boldsymbol{\varphi}^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H\boldsymbol{\varphi})\\ &=\boldsymbol{\varphi}^H\sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H)\boldsymbol{\varphi}\\ &=\boldsymbol{\varphi}^H\mathbf{Z}\boldsymbol{\varphi},\end{aligned}$$

[0164]

[0165] 여기서, $\boldsymbol{\varphi}=[e^{j\phi_1},e^{j\phi_2},\ldots,e^{j\phi_N}]^H\in\mathbb{C}^{N\times 1}$ 는 지능형 반사 표면의 위상 변환 값들로 구성된 벡터를 의미하며, $\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}=\mathrm{diag}(\tilde{\mathbf{h}}_{2,k})\in\mathbb{C}^{N\times N}$ 는 k 번째 사용자 단말의 채널 벡터를 대각 성분으로 갖는 행렬을 의미한다. 또한, $\mathbf{Z}$ 는 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국(송신단)과 사용자 단말들(수신단) 사이의 채널 행렬들의 합을 나타내는 $\sum_{k=1}^{K}(\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H)$ 을 치환한 것이다.

[0166] 다. 위상 변환 행렬 생성 단계(S223)

[0167] 위상 변환 행렬 생성 단계(S223)는, 상기 변형 단계(S222)에서 변형된 상기 [수학식 7]의 송신 전력 변환식을

최대화하도록 하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 생성하는 단계이다. 이는 다음의 [수학식 9]에 따르는 지능형 반사 표면의 반사 소자의 위상 변환 벡터 $\varphi_{(i+1)}$를 이용하여 위상 변환 행렬 Φ을 생성할 수 있다.

[0168] [수학식 9]

[0169]
$$\varphi_{(i+1)} = e^{j\arg(Z^H \varphi_{(i)})}$$
$$\Phi = \mathrm{diag}(\varphi^H_{(i+1)})$$

[0170] 여기서, i는 반복 횟수를 의미하고, Z는 지능형 반사 표면(IRS)을 경유하는 기지국과 사용자 단말들 사이의 채널 행렬들의 합을 나타낸다. 또한, ^{H}는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0171] 라. 수렴조건 충족여부 판단 단계(S224)

[0172] 수렴조건 충족여부 판단 단계(S224)는, 상기 위상 변환 행렬 생성 단계(S223)에서 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간의 오차를 산출하여, 상기 산출된 오차가 소정의 오차 범위 내에 포함되는지에 따라 상기 생성된 위상 변환 행렬이 수렴조건을 충족하는지의 여부를 판단한다.

[0173] 1) 오차 산출 단계(S2242)

[0174] 오차 산출 단계(S2242)는, 상기 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간에 대응하는 각 반사 소자의 위상 변환 값 차이를 계산하여, 상기 두 행렬 간의 오차를 산출한다.

[0175] 2) 비교 판단 단계(S2244)

[0176] 비교 판단 단계(S2244)는, 상기 오차 산출 단계(S2242)에서 산출된 상기 생성된 위상 변환 행렬과 비교 위상 변환 행렬 간의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속하는지를 비교한다.

[0177] 비교 결과, 상기 산출된 두 행렬 간의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속하는 경우, 상기 생성된 위상 변환 행렬이 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 위상 변환 행렬을 얻기 위한 수렴조건을 충족하는 것으로 판단할 수 있다.

[0178] 반면, 비교 결과, 상기 산출된 두 행렬 간의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속하지 않는 경우, 상기 생성된 위상 변환 행렬이 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 위상 변환 행렬을 얻기 위한 수렴조건을 충족하지 않는 것으로 판단할 수 있다.

[0179] 3) 비교 위상 변환 행렬 갱신 단계(S2246)

[0180] 비교 위상 변환 행렬 갱신 단계(S2246)는, 상기 비교 단계(S2244)의 비교 결과, 상기 산출된 두 행렬 간의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속하지 않으면, 상기 비교 위상 변환 행렬을 상기 생성된 위상 변환 행렬로 갱신한다.

[0181] 최초 주기인 경우, 비교 위상 변환 행렬은 모든 위상 변환 값이 1로 구성된 초기 위상 변환 행렬로 설정된다.

[0182] 그 다음 주기에서는, 상기 비교 단계(S2244)의 비교 결과 비교 위상 변환 행렬과의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속하지 않는 상기 생성된 위상 변환 행렬을 상기 비교 위상 변환 행렬로 갱신한다.

[0183] 즉, 쉽게 말해, 최초 주기에서는 소정의 초기 위상 변환 행렬을 비교 위상 변환 행렬로 하되, 다음 주기에서는 이전 주기에 생성된 위상 변환 행렬을 비교 위상 변환 행렬로 하는 것이다.

[0184] 4) 회귀 단계(S2248)

[0185] 회귀 단계(S2248)는, 상기 비교 위상 변환 행렬 갱신 단계(S2246)를 통해 비교 위상 변환 행렬을 수렴조건을 충족하지 않는 상기 생성된 위상 변환 행렬로 갱신한 후, 수렴조건을 충족하는 위상 변환 행렬을 얻기 위하여 위상 변환 행렬 생성 단계(S223)로 회귀하여 위상 변환 행렬 생성 단계(S223) 내지 수렴조건 충족여부 판단 단계(S224)를 반복 수행한다.

[0186] 이와 같은 단계는, 생성된 위상 변환 행렬이 수렴조건을 충족할 때까지 반복적으로 수행된다.

[0187] 마. 최적의 위상 변환 행렬 결정 단계(S225)

[0188] 최적의 위상 변환 행렬 결정 단계(S225)는, 상기 수렴조건 충족여부 판단 단계(S224)를 통해 비교 위상 변환 행렬과의 오차가 소정의 오차 범위 내에 속할 때의 생성된 위상 변환 행렬을 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 최적의 위상 변환 행렬로 결정한다.

[0189] 다시 말해, 생성된 위상 변환 행렬과 이전 주기에 생성된 위상 변환 행렬과의 손실함수(MSE: Mean Squared Error)를 비교하여, 두 행렬 간 오차 최소화 기법을 이용한 반복적인 최적화 과정을 통해 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 얻는 것이다.

[0190] 3.2.3. 제3 기법 수행 단계(S230)

[0191] 도 6은 제3 기법 수행 단계의 세부 단계를 도시한 도면이고, 도 7은 제3 기법 설계 알고리즘을 보여주는 도면이다. 도 6 및 7을 참조하면, 상기 제3 기법 수행 단계(S230)는, 지능형 반사 표면과 K개의 사용자 단말들 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_2$과 지능형 반사 표면의 반사 소자들의 소정의 초기 위상 값을 대각 성분으로 갖는 초기 위상 변환 행렬 $\mathbf{\Phi}$의 결합 행렬과 상기 도출된 송신 전력 변환식을 이용하여 얻어지는 최적의 행렬과의 오차를 최소화하기 위한 목적함수를 설정하고, 설정된 목적함수를 변형하여, 변형된 목적함수를 기반으로 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것으로 구성될 수 있다. 세부적인 과정은 아래와 같이 이루어진다.

[0192] 가. 목적함수 설정 단계(S232)

[0193] 먼저, 상기 [수학식 5]에 따르는 송신 전력 변환식에서 지능형 반사 표면과 K명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_2$과 지능형 반사 표면의 반사 소자들의 초기 위상 값을 대각 성분으로 갖는 행렬(초기 위상 변환 행렬) $\mathbf{\Phi}$의 결합 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}$의 최적의 해를 구한다. 이는 다음의 [수학식 10]에 따른다.

[0194] [수학식 10]

[0195] $$(\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi})_{\text{opt}} = \mathbf{V}_{(1:K)}^{H} = \mathbf{V}_{\text{opt}}^{H} \in \mathbb{C}^{N\times K}$$

[0196] 여기서, $\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}$의 최적의 해는, 지능형 반사 표면의 반사 소자의 위상에 대한 제약이 존재하지 않는 경우 얻어진다. 또한, $\mathbf{V}_{(1:K)}$는 $\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^{H} = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^{H}$의 가장 큰 K개의 특이 값에 해당하는 특이 행렬을 의미한다.

[0197] 이 때, 위 [수학식 10]에 따르는 $\tilde{\mathbf{H}}_2\mathbf{\Phi}$의 최적의 해는, 지능형 반사 표면의 반사 소자의 위상에 대한 제약이 존재하지 않는 경우, 즉 반사 소자의 위상뿐만 아니라 진폭도 함께 조절할 수 있는 경우인 것을 가정할 때 얻어질 수 있다.

[0198] 여기서, $\mathbf{V}_{(1:K)}$는 $\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^{H} = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^{H}$의 가장 큰 K개의 특이 값에 해당하는 특이 행렬을 의미한다.

[0199] 다음, 상기 [수학식 5]에 따르는 송신 전력 변환식으로부터 최적의 행렬을 구한다.

[0200] 상기 최적의 행렬은, 상기 [수학식 5]의 송신 전력 변환식에서 기지국(100)과 지능형 반사 표면(200) 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_1$에 대하여 상기 [수학식 5]의 송신 전력 변환식을 최대화할 수 있는 행렬을 특이 값 분해를 통해 얻어질 수 있다.

[0201] 상기 [수학식 5]의 송신 전력 변환식에서 송신 전력을 최소화하는 문제를 해결하기 위하여, 상기 획득된

$\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}$ 의 최적의 해와 상기 최적의 행렬과의 평균제곱오차(Mean Square Error, MSE)를 최소화하기 위한 목적함수를 설정하고, 지능형 반사 표면의 단위 진폭 제약을 만족시키는 동시에 상기 설정된 목적함수를 최소화하는 지능형 반사 표면의 반사 소자의 위상 변환 값을 획득하는 것으로 최적화 할 수 있다.

[0202] 상기 획득된 $\tilde{\mathbf{H}}_2\boldsymbol{\Phi}$ 의 최적의 해와 상기 최적의 행렬과의 평균제곱오차(Mean Square Error, MSE)를 최소화하기 위한 목적함수는, 다음의 [수학식 11]과 같이 설정된다.

[0203] [수학식 11]

[0204] $$\min_{\boldsymbol{\Phi}} Tr\left\{(\mathbf{V}_{opt}-\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)(\mathbf{V}_{opt}-\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^H\right\}$$
$$\text{s.t. } |\boldsymbol{\Phi}(n,n)|=1,\ n=1,\ldots,N.$$

[0205] 여기서, $\mathbf{H}_2$ 는 지능형 반사 표면과 K 명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬이고, $\boldsymbol{\Phi}$ 은 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬이며, N 은 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수를 의미한다. 또한, ^{H} 는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0206] 나. 목적함수 변형 단계(S234)

[0207] 목적함수 변형 단계(S234)는, 상기 목적함수 설정 단계(S232)에서 설정된 [수학식 11]에 따르는 목적함수를 변형하는 단계이다.

[0208] 먼저, 위 [수학식 11]의 목적함수는 다음의 [수학식 12]와 같이 단순화하여 표현할 수 있다.

[0209] [수학식 12]

[0210] $$Tr\left\{(\mathbf{V}_{opt}-\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)(\mathbf{V}_{opt}-\boldsymbol{\Phi}^{-1}\tilde{\mathbf{H}}_2^H)^H\right\}$$
$$=Tr\left\{\begin{bmatrix}\mathbf{v}_1-e^{-j\phi_1}\tilde{\mathbf{h}}_{2,1}^H\\ \mathbf{v}_2-e^{-j\phi_2}\tilde{\mathbf{h}}_{2,2}^H\\ \vdots\\ \mathbf{v}_N-e^{-j\phi_N}\tilde{\mathbf{h}}_{2,N}^H\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{v}_1-e^{-j\phi_1}\tilde{\mathbf{h}}_{2,1}^H\\ \mathbf{v}_2-e^{-j\phi_2}\tilde{\mathbf{h}}_{2,2}^H\\ \vdots\\ \mathbf{v}_N-e^{-j\phi_N}\tilde{\mathbf{h}}_{2,N}^H\end{bmatrix}^H\right\}$$
$$=\sum_{n=1}^{N}\left\{(\mathbf{v}_n-e^{-j\phi_n}\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}^H)(\mathbf{v}_n-e^{-j\phi_n}\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}^H)^H\right\}$$
$$=\sum_{n=1}^{N}\left\{\mathbf{v}_n\mathbf{v}_n^H+\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}^H\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}-e^{-j\phi_n}\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}^H\mathbf{v}_n^H-e^{j\phi_n}\mathbf{v}_n\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}\right\}$$

[0211] 여기서, $\mathbf{v}_n$ 과 $\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}^H$ 은 $\mathbf{V}_{opt}$ 와 $\tilde{\mathbf{H}}_2^H$ 의 n번째 행 벡터를 의미한다.

[0212] 위 [수학식 12]에서 $\mathbf{v}_n\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}$ 를 $\alpha_n e^{j\beta_n}$ 이라 치환하면, 상기 [수학식 12]를 최소화하는 지능형 반사 표면의 반사 소자의 위상 변환 값을 찾는 문제는, 다음의 [수학식 13]을 최대화하는 지능형 반사 표면의 반사 소자의 위상 변환 값을 찾는 문제로써 표현된다.

[0213] [수학식 13]

[0214] $$\sum_{n=1}^{N}\max_{\phi_n}\left(\alpha_n e^{-j(\beta_n+\phi_n)}+\alpha_n e^{j(\beta_n+\phi_n)}\right)$$

[0215] 다. 최적의 위상 변환 행렬 생성 단계(S236)

[0216] 따라서, 최종적으로 위 [수학식 13]을 최대화하는 지능형 반사 표면의 반사 소자의 위상 변환 값은, 다음의 [수학식 14]에 따라 산출할 수 있다.

[0217] [수학식 14]

[0218] $$\phi_n = -\beta_n = -\arg(\mathbf{v}_n \tilde{\mathbf{h}}_{2,n}).$$

[0219] 여기서, n = 1, 2, …, N (N 은 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수)이고, $\mathbf{v}_n$ 과 $\tilde{\mathbf{h}}_{2,n}$는 $\mathbf{V}_{opt}$ 과 $\tilde{\mathbf{H}}_{2'}$의 n번째 행 벡터를 의미한다. 또한, $\tilde{\mathbf{H}}_{2'}$는 [수학식 5]에 따르는 송신 전력 변환식에서 지능형 반사 표면과 K 명의 사용자 단말 사이의 채널 행렬 $\mathbf{H}_2$ 과 사용자 단말 별 전력 할당 행렬 $\mathbf{P}$ 의 역이 곱의 형태로 결합된 행렬을 의미한다.

[0220] 결론적으로, 위 [수학식 14]에 따라 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값을 산출하여, 시스템 전체의 주파수 스펙트럼 효율을 최대화하는 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 생성/획득할 수 있다.

[0221] 도 8 내지 11은 본 발명에 따른 3가지 기법과 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 랜덤 값으로 구성한 랜덤 기법을 적용하여 나타나는 시뮬레이션 결과를 보여주는 도면이다.

[0222] 도 8은 16개의 송신 안테나가 배열된 기지국과 4대의 사용자 단말, 64개의 반사 소자가 장착된 지능형 반사 표면이 존재하는 환경에서, 기법 별로 나타나는 송신 전력(dB)에 따른 주파수 스펙트럼 효율(bps/Hz)을 보여준다.

[0223] 도 8을 참조하면, 본 발명에 따른 제1 기법 내지 제3 기법으로 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 설계한 경우, 3가지 기법 모두 랜덤 기법에 비하여 높은 주파수 스펙트럼 효율을 보인다. 본 발명의 3가지 기법 중에서도, 특히 MMSE 기반의 제3 기법이 나머지 기법보다 가장 큰 성능의 향상을 보인다.

[0224] 도 9는 16개의 송신 안테나가 배열된 기지국과 4대의 사용자 단말이 존재하는 환경에서, 기법 별로 나타나는 지능형 반사 표면의 반사 소자의 개수(N)에 따른 주파수 스펙트럼 효율(bps/Hx)를 보여준다.

[0225] 도 9에 보이는 것과 같이, 본 발명에 따른 제1 기법 내지 제3기법으로 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 설계한 경우, 3가지 기법 모두 랜덤 기법에 비하여 높은 주파수 스펙트럼 효율을 보인다. 특히, 본 발명의 MMSE 기반의 제3 기법의 경우, 지능형 반사 표면의 반사 소자의 수가 늘어남에 따라 더 높은 주파수 스펙트럼 효율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

[0226] 도 10은 16개의 송신 안테나가 배열된 기지국과 4대의 사용자 단말이 존재하는 환경에서, 무선 채널의 각도 분포(°)에 따른 주파수 스펙트럼 효율(bps/Hz)를 보여준다.

[0227] 도 10을 참조하면, 무선 채널 각도의 분포는 채널의 상관성에 영향을 미치며, 각도 분포가 작은 환경에서는 주파수 스펙트럼 효율, 즉 성능의 저하가 크게 발생한다. 하지만, 본 발명에 따른 MMSE 기반의 제3 기법으로 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 설계한 경우, 각도 분포가 낮아질수록 주파수 스펙트럼 효율이 감소하는 경향이 있지만, 낮은 각도 분포에서도 충분히 좋은 주파수 스펙트럼 효율을 보인다.

[0228] 도 11은 16개의 송신 안테나가 배열된 기지국과 64개의 반사 소자가 장착된 지능형 반사 표면이 존재하는 환경에서, 기법 별로 사용자 단말의 수(K)에 따른 주파수 스펙트럼 효율(bps/Hz)을 보여준다.

[0229] 도 11에 보이는 것과 같이, 사용자 단말이 4대를 초과하는 상황에서는 본 발명의 3가지 기법과 랜덤 기법 모두 주파수 스펙트럼 효율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 지능형 반사 표면을 거치는 무선 채널의 랭크가 충분히 보장되지 않기 때문에 발생하는 문제이다. 한편, 사용자 단말이 1대인 경우 본 발명에 따른 제1 내지 제3 기법 모두 동일한 주파수 스펙트럼 효율을 보이지만, 사용자 단말이 늘어날수록 근사화 기반의 제1,2 기법의 경우 랜덤 기법과 주파수 스펙트럼 효율의 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 근사화 기반의 기법들이 MMSE 기반의 기법에 비하여 채널의 상관성에 더 민감하다는 것을 보여준다.

[0230] 한편, 본 발명의 기술적 사상은 상기 실시 예에 따라 구체적으로 기술되었으나, 상기 실시 예는 그 설명을 위한 것이며, 그 제한을 위한 것이 아님을 주지해야 한다. 또한, 본 발명의 기술분야에서 당업자는 본 발명의 기술

사상의 범위 내에서 다양한 실시 예가 가능함을 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

[0231] 100: 기지국

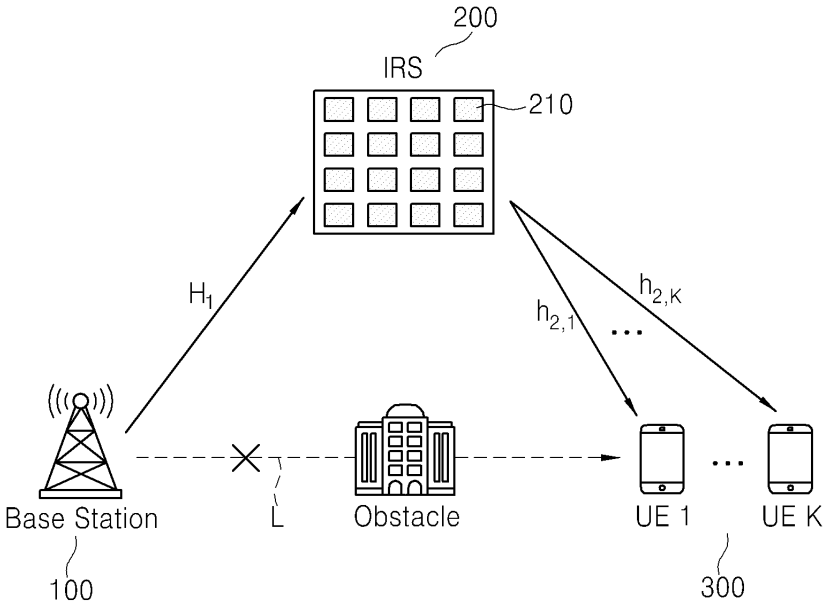
200: 지능형 반사 표면

210: 반사 소자

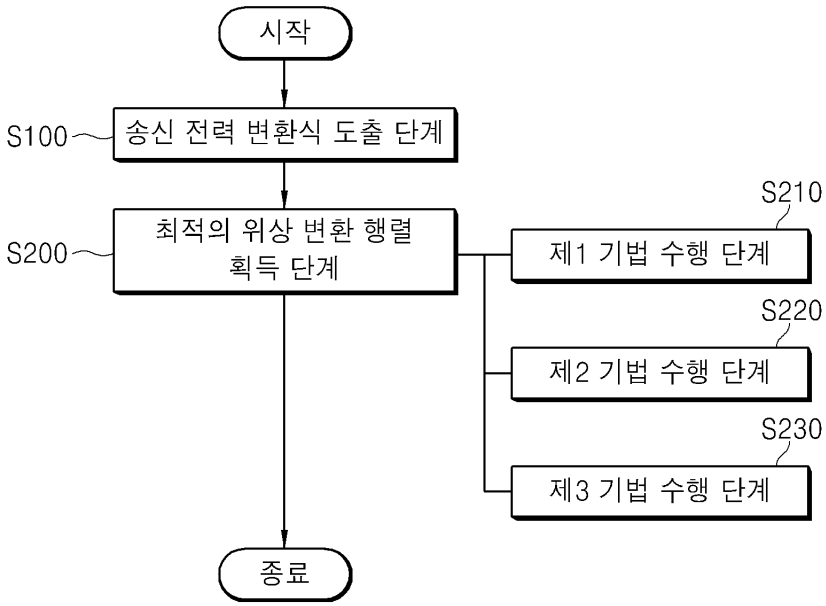
300: 사용자 단말(UE 1 ~ UE K)

도면

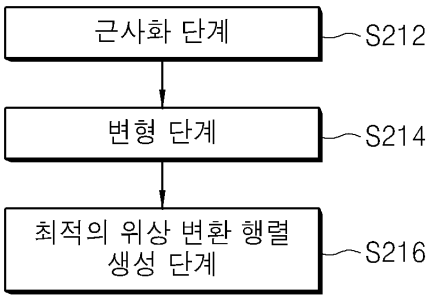
도면1



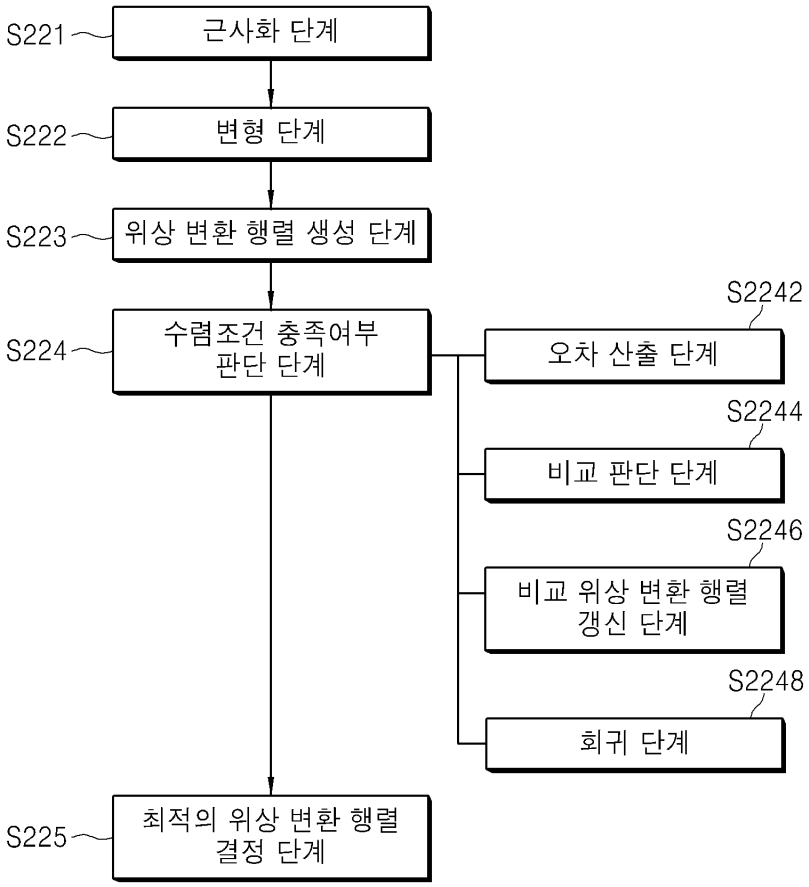
도면2



도면3


근사화 단계
S212
변형 단계
S214
최적의 위상 변환 행렬 생성 단계
S216

도면4


S221
근사화 단계
S222
변형 단계
S223
위상 변환 행렬 생성 단계
S224
수렴조건 충족여부 판단 단계
S2242
오차 산출 단계
S2244
비교 판단 단계
S2246
비교 위상 변환 행렬 갱신 단계
S2248
회귀 단계
S225
최적의 위상 변환 행렬 결정 단계

도면5

Algorithm 1 Approximation-based Iterative Optimization Scheme for the IRS Design

Input : $\mathbf{H}_1$, $\mathbf{H}_2$ and $\mathbf{P}$

Initialization : feasible $\boldsymbol{\varphi}_{(0)}$

$\tilde{\mathbf{H}}_2 = \mathbf{P}^{-1/2}\mathbf{H}_2$

$\mathbf{Z} = \sum_{k=1}^{K} (\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H\tilde{\mathbf{H}}_{2,k}^H)$

for $i = 0, 1, 2, \ldots,$ **do**

  $\boldsymbol{\xi} = \mathbf{Z}^H\boldsymbol{\varphi}_{(i)}$

  $\boldsymbol{\varphi}_{(i+1)} = e^{j\arg(\boldsymbol{\xi})}$

  if $\left\|\boldsymbol{\varphi}_{(i+1)} - \boldsymbol{\varphi}_{(i)}\right\|^2 < \varepsilon$ **then**

    break;

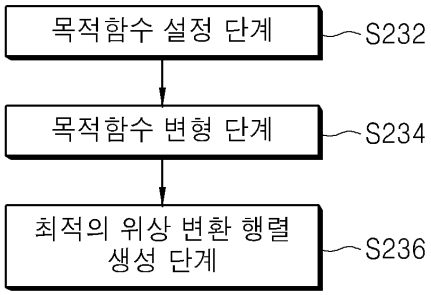
  end if

end for

Set $\boldsymbol{\Phi} = \mathrm{diag}(\boldsymbol{\varphi}_{(i+1)}^H)$

Output : $\boldsymbol{\Phi}$

도면6



도면7

Algorithm 2 MMSE-based Scheme for the IRS Design

Input : $\mathbf{H}_1$, $\mathbf{H}_2$ and $\mathbf{P}$

Initialization : $\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{I}_N$

1: $\mathbf{H}_1\mathbf{H}_1^H = \mathbf{V}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{V}^H$

2: $\mathbf{V}_{\text{opt}} = \mathbf{V}_{(1:K)}$

3: $\tilde{\mathbf{H}}_2 = \mathbf{P}^{-1/2}\mathbf{H}_2$

4: **for** $n = 1 : N$ **do**

5: $\quad \mathbf{v}_n = \mathbf{V}_{\text{opt}}(n, :)$

6: $\quad \tilde{\mathbf{h}}_{2,n} = \tilde{\mathbf{H}}_2(:, n)$

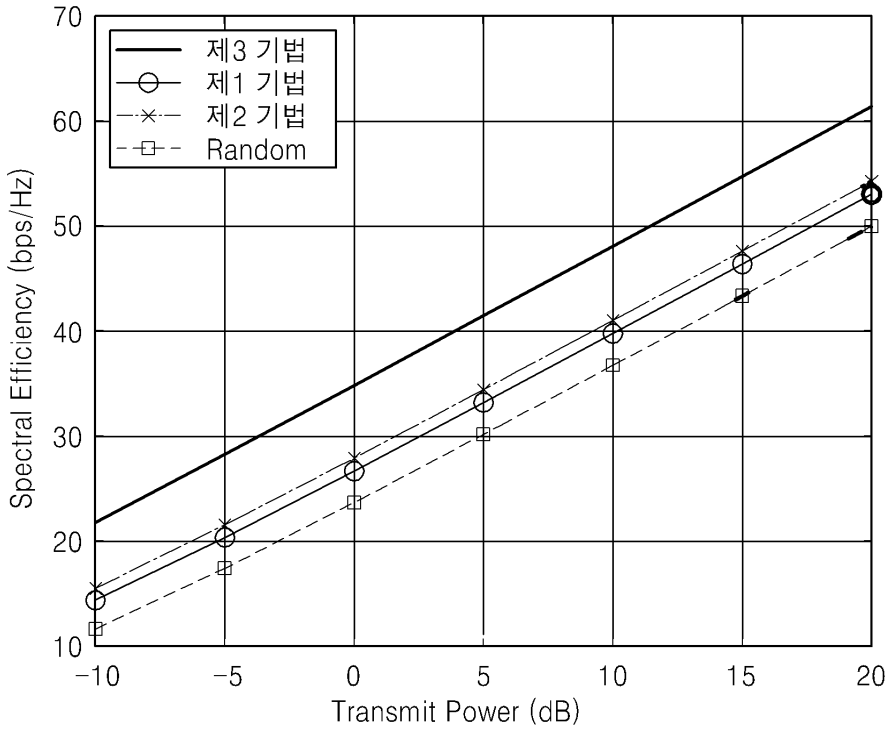
7: $\quad \phi_n = -\arg(\mathbf{v}_n\tilde{\mathbf{h}}_{2,n})$

8: **end for**

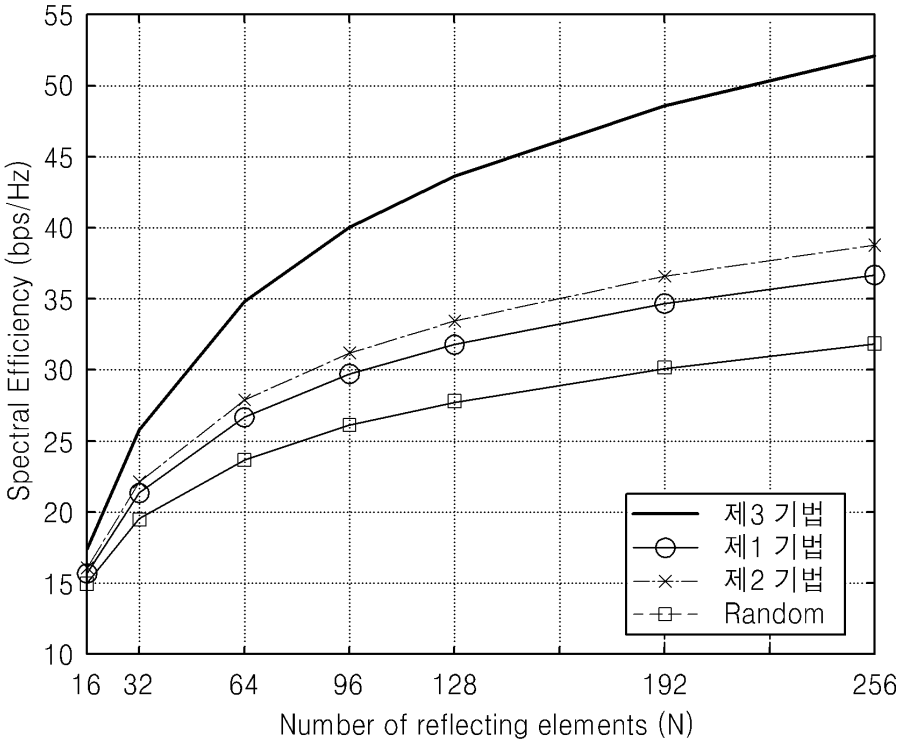
9: Set $\boldsymbol{\Phi} = \text{diag}(e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, ..., e^{j\phi_N})$

Output : $\boldsymbol{\Phi}$

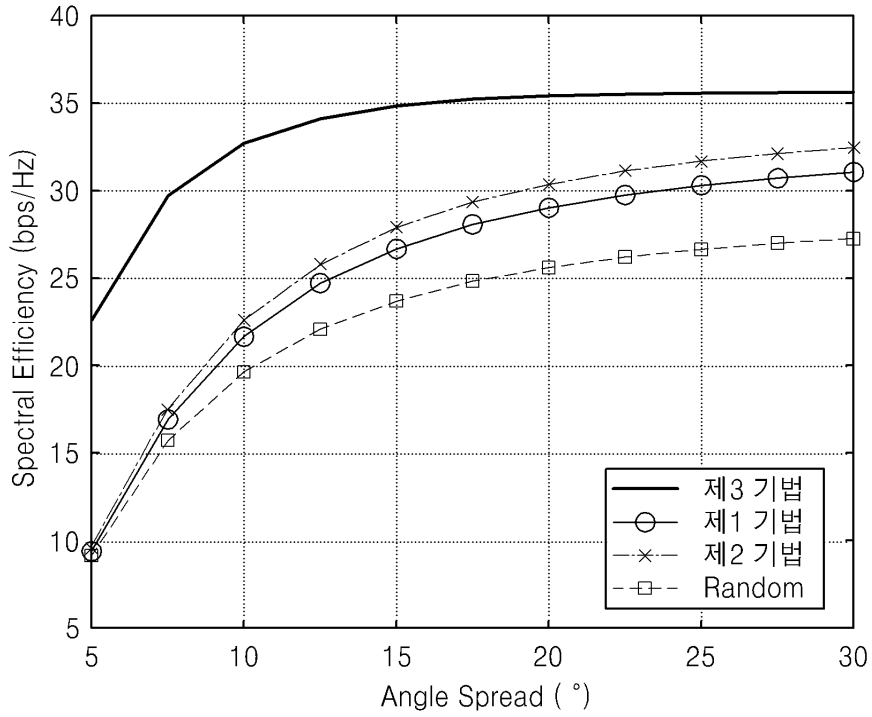
도면8



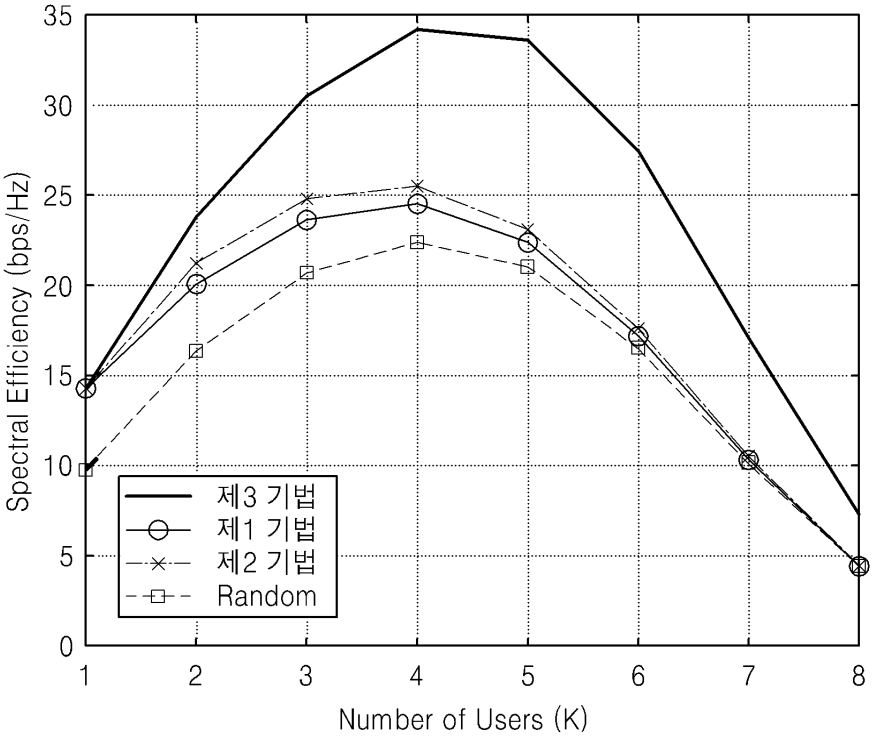
도면9


Spectral Efficiency (bps/Hz)
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
16
32
64
96
128
192
256
Number of reflecting elements (N)
제3 기법
제1 기법
제2 기법
Random

도면10


Spectral Efficiency (bps/Hz)
40
35
30
25
20
15
10
5
5
10
15
20
25
30
Angle Spread (°)
제3 기법
제1 기법
제2 기법
Random

도면11


35
30
25
20
15
10
5
0
Spectral Efficiency (bps/Hz)
1
2
3
4
5
6
7
8
Number of Users (K)
제3 기법
제1 기법
제2 기법
Random