



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년07월12일

(11) 등록번호 10-2684567

(24) 등록일자 2024년07월09일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H04B 7/0413 (2017.01) H04B 7/0456 (2017.01)

H04B 7/06 (2017.01) H04B 7/08 (2017.01)

(52) CPC특허분류

H04B 7/0413 (2013.01)

H04B 7/0456 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2021-0094417

(22) 출원일자 2021년07월19일

심사청구일자 2021년07월19일

(65) 공개번호 10-2023-0013542

(43) 공개일자 2023년01월26일

(56) 선행기술조사문헌

KR1020070100101 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

세종대학교산학협력단

서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)

(72) 발명자

송형규

경기도 성남시 분당구 중앙공원로 17, 320-303(서현동, 한양아파트)

박찬엽

서울특별시 노원구 덕릉로 459-18, 103-1209(상계동, 미도아파트)

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

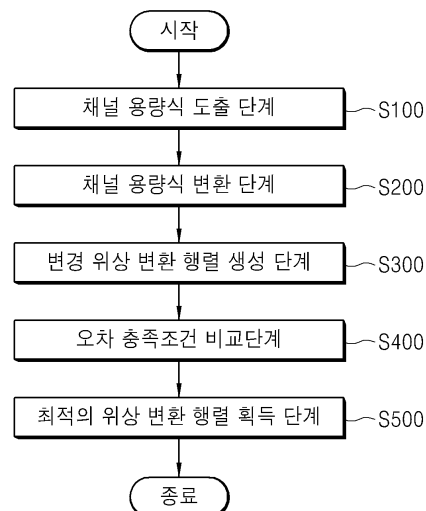
이강민, 안준형, 남승희

전체 청구항 수 : 총 13 항

심사관 : 이근형

(54) 발명의 명칭 **지능형 반사 표면을 포함하는 MIMO 시스템 및 이에 적용되는 채널의 합 용량 향상을 위한 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 획득 방법****(57) 요약**

본 발명은 지능형 반사 표면을 포함하는 MIMO 시스템에서 채널의 합용량(Sum rate) 향상을 위한 지능형 반사 표면의 위상 변환 값을 도출하여 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 방법에 관한 것이다.

대표도 - 도2

(52) CPC특허분류

H04B 7/0634 (2013.01)

H04B 7/0857 (2013.01)

(72) 발명자

정지성

서울특별시 노원구 공릉로27길 110, 101-607(공릉동, 현대 성우아파트)

신범식

서울특별시 도봉구 도봉로169가길 30, B-401(도봉동, 도봉하이츠)

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 연구
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	이공학학술연구기반(R&D)
연구과제명	자율지능무인비행체연구소
기 여 율	1/2
과제수행기관명	세종대학교
연구기간	2020.06.01 ~ 2021.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

2차원으로 배열된 N개의 반사 소자를 포함하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 획득하는 방법에 있어서, 소정의 초기 위상 변환 값들로 구성된 초기 위상 변환 행렬이 위상 변화율로 적용되어 있는 지능형 반사 표면을 거쳐 송신단으로부터 수신단이 수신하는 수신신호가 겪는 채널에 기반하여, 상기 송신단과 수신단 사이의 채널 용량을 나타내는 채널 용량식을 도출하는 채널 용량식 도출 단계;

상기 도출된 채널 용량식으로부터 상기 초기 위상 변환 행렬을 포함하는 채널 합용량식을 도출하여 채널의 합용량(sum rate)을 최대화 하도록 변형하고, 이를 상기 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 상기 초기 위상 변환 값들과 곱해지는 채널 성분들을 포함하는 형태로 변환하는 채널 용량식 변환 단계;

상기 변환된 채널 용량식을 기반으로 지능형 반사 표면의 $n(n = 1, 2, \dots, N)$ 번째 반사 소자의 위상 변환 값을 산출하여 변경 위상 변환 행렬을 생성하는 변경 위상 변환 행렬 생성 단계;

상기 생성된 변경 위상 변환 행렬과 현재 주기(N)에서 상기 지능형 반사 표면의 위상 변화율로 적용되어 있는 소정의 초기 위상 변환 행렬 간 오차를 산출하고, 산출된 오차가 소정의 기준 오차 값 이하인지를 비교하는 오차 충족조건 비교 단계;

상기 오차 충족조건 비교 단계에서 산출된 오차가 소정의 기준 오차 값 이하가 될 때까지, 상기 초기 위상 변환 행렬을, 상기 변경 위상 변환 행렬로 갱신하여, 다음 주기(N+1)에서, 상기 채널 용량식 도출 단계, 채널 용량식 변환 단계, 변경 위상 변환 행렬 생성 단계, 오차 충족조건 비교 단계를 반복하는 반복수행단계;

상기 오차 충족조건 비교 단계의 비교 결과, 상기 산출된 오차가 소정의 기준 오차 값 이하이면, 상기 생성된 변경 위상 변환 행렬을 채널 합용량(sum rate)을 최대화 하는 위상 변환 행렬로 획득하는 위상 변환 행렬 획득 단계;

를 포함하여 구성되는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬 획득 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 위상 변환 행렬 획득 단계는,

상기 오차 충족조건 비교 단계의 비교 결과, 상기 산출된 오차가 소정의 기준 값 이하가 아닌 경우가 소정의 반복 횟수 이상이면, 해당 주기에서 생성된 변경 위상 변환 행렬을 채널 합용량(sum rate)을 최대화하는 위상 변환 행렬로 획득하는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬 획득 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 채널 용량식 도출 단계에서 도출되는 채널 용량식은, 아래의 [수학식 1]에 따르는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬 획득 방법.

[수학식 1]

$$R = \log_2 \det(\mathbf{I} + \frac{P_i}{\sigma^2} \mathbf{W}_i \mathbf{T} \mathbf{W}_i^H (\mathbf{W}_i \mathbf{T} \mathbf{W}_i^H)^H)$$

$$= \sum_{i=1}^K \log_2 (1 + \frac{P_i \lambda_i^2}{\sigma^2})$$

여기서, P_i 는 i 번째 수신 안테나에 할당된 전력, σ^2 는 채널의 잡음 전력을, $\det(\cdot)$ 는 행렬식을 의미한다. 또한, \mathbf{W}_i 은 수신단에서 진행하는 컴바이닝(combining) 행렬, \mathbf{H} 는 송신단과 수신단 사이의 채널, \mathbf{F} 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, Φ 는 대각행렬로 이루어진 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬, \mathbf{G} 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, \mathbf{W}_i 는 송신단에서 진행하는 프리코딩(precoding) 행렬, \mathbf{H} 는 행렬의 허미션을 나타낸다.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 채널 용량식 변환 단계에서,

상기 [수학식 1]의 채널 용량식으로부터 도출되는 채널 합용량식은, 아래의 [수학식 2]에 따르는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬 획득 방법.

[수학식 2]

$$\max_{\Phi} [\text{tr}\{(\mathbf{H} + \mathbf{F}\Phi\mathbf{G})^H(\mathbf{H} + \mathbf{F}\Phi\mathbf{G})\}]$$

$$\text{s.t. } \Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N})$$

$$|e^{j\theta_i}| = 1$$

여기서, $\text{tr}(\cdot)$ 는 행렬 대각 성분의 총 합을 나타낸다. 또한, \mathbf{H} 는 송신단과 수신단 사이의 채널, \mathbf{F} 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, \mathbf{G} 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, \mathbf{W}_i 는 송신단에서 진행하는 프리코딩(precoding) 행렬, \mathbf{H} 는 행렬의 허미션을 나타낸다.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 채널 용량식 변환 단계에서,

상기 [수학식 2]의 채널 합용량식을 채널의 합용량(sum rate)을 최대화 하도록 변형하고 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값과 곱해지는 채널 성분들을 포함하는 형태로 변환된 채널 합용량식은, 아래의 [수학식 3]을 따르는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬 획득 방법.

[수학식 3]

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_n &= \text{tr}[\phi_n^H (\mathbf{H}^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H + \sum_{k=1, k \neq n}^N \phi_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H) + \\ &\quad \phi_n^H (\mathbf{g}_n \mathbf{f}_n^H \mathbf{H} + \sum_{k=1, k \neq n}^M \phi_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H)] \\ &= \text{tr}[\phi_n^H \mathbf{Y}_n + \phi_n^H \mathbf{Y}_n^H] \end{aligned}$$

여기서, ϕ_n 은 지능형 반사 표면의 n번째 반사 소자의 위상 변환 값이고, \mathbf{Y}_n 은 $\mathbf{H}^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H + \sum_{k=1, k \neq n}^N \phi_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H$ 을 치환한 것으로, 지능형 반사 표면의 n번째 반사 소자와 곱해지는 채널 성분들을 의미한다. 또한, \mathbf{f}_n 와 \mathbf{f}_k 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널 행렬 \mathbf{F} 의 n, k번째 열 성분으로 각각 이루어진 벡터, \mathbf{g}_n^H 와 \mathbf{g}_k^H 은 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널 행렬 \mathbf{G} 의 n, k번째 행 성분으로 각각 이루어진 벡터를 의미한다.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 변경 위상 변환 행렬 생성 단계에서,

상기 생성되는 변경 위상 변환 행렬은, 아래의 [수학식 4]에 따르는 위상 변환 값들로 구성되는 것을 특징으로 하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬 획득 방법.

[수학식 4]

$$\Phi_s(n, n) = e^{-j(\alpha \sum_{i=1}^N \frac{j_1 + j_2 + \dots + j_N}{N_s})}$$

여기서, Φ_s 는 상기 채널 용량식 도출 단계(S100) 내지 변경 위상 변환 행렬 생성 단계(S300)를 s번 반복했을 때 얻어지는 지능형 반사 표면의 위상 변환 값이고, j_n 는 \mathbf{Y}_n 의 n(n = 1, 2, ..., N)번째 대각성분을 의미한다.

청구항 8

N_t 개의 송신 안테나를 가진 송신단에서 2차원으로 배열된 N_r 개의 반사 소자를 가지는 지능형 반사 표면(IRS)을 통해 N_r 개의 수신 안테나를 가진 수신단으로 데이터를 송신하는 단일 사용자 MIMO 기반의 무선 통신 시스템에 있어서,

소정의 위상 변환 행렬 획득 방식으로 수신단과의 사이의 채널의 합용량(sum rate)을 최대화 하는 위상 변환 행렬을 획득하여, 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값으로 제어하는 제어부를 포함하는 송신단;

상기 송신단의 제어부의 제어에 의한 위상 변화율에 따라 상기 송신단으로부터 입력되는 신호에 대한 위상을 조절하여 수신단으로 반사하는 지능형 반사 표면(IRS); 및

상기 수신 안테나를 통해, 상기 지능형 반사 표면의 각 반사 소자에 의해 위상이 조절된 신호를 수신하는 수신

단;

을 포함하여 구성되며,

상기 제어부는 위상 변환 행렬을 획득하기 위하여,

송신단과 수신단 사이의 채널 용량을 나타내는 채널 용량식을 도출하고, 상기 채널 용량식으로부터 지능형 반사 표면의 소정의 초기 위상 변환 행렬을 포함하는 채널 합용량식을 도출하여 채널의 합용량(sum rate)을 최대화하도록 변형하고, 이를 상기 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값과 곱해지는 채널 성분들을 포함하는 형태로 변환하여, 변환된 채널 용량식을 기반으로 생성되는 변경 위상 변환 행렬을 획득하는 과정을 수행하고,

상기 생성된 변경 위상 변환 행렬과 현재 주기(N)에서 상기 지능형 반사 표면의 위상 변화율로 적용되어 있는 소정의 초기 위상 변환 행렬 간 오차를 산출하고, 산출된 오차가 소정의 기준 오차 값 이하인지를 비교하여,

상기 산출된 오차가 상기 소정의 기준 오차 값 이하가 될 때까지, 상기 초기 위상 변환 행렬을, 상기 변경 위상 변환 행렬로 갱신하여, 다음주기(N+1)에서, 상기 과정을 반복하는 무선 통신 시스템.

청구항 9

삭제

청구항 10

제8항에 있어서,

상기 위상 변환 행렬은,

상기 생성된 변경 위상 변환 행렬과 소정의 초기 위상 변환 행렬 간 오차가 소정의 오차 충족조건을 충족하지 않는 경우, 상기 초기 위상 변환 행렬을 상기 생성된 변경 위상 변환 행렬로 변경 적용하여 상기 채널 합용량식을 도출 내지 오차 충족조건을 비교하는 과정의 반복적인 수행을 통해 결정되는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 위상 변환 행렬은,

상기 반복적인 수행의 횟수가 소정의 기준 횟수 이상이 되면, 해당 주기에서 생성된 변경 위상 변환 행렬로 결정되는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

청구항 12

제8항에 있어서,

상기 송신단과 수신단 사이의 채널 용량을 나타내는 채널 용량식은, 아래의 [수학식 1]에 따르는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 1]

$$R = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{P_t}{\sigma^2} \mathbf{W}_r \mathbf{T} \mathbf{W}_t (\mathbf{W}_r \mathbf{T} \mathbf{W}_t)^H \right) \\ = \sum_{i=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_t \lambda_i^2}{\sigma^2} \right)$$

여기서, P_t 는 i번째 수신 안테나에 할당된 전력, σ^2 는 채널의 잡음 전력을, $\det(\cdot)$ 는 행렬식을 의미한다.

또한, \mathbf{W}_r 은 수신단에서 진행하는 컴바이닝(combining) 행렬, \mathbf{H} 는 송신단과 수신단 사이의 채널, \mathbf{F} 는

송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, Φ 는 대각행렬로 이루어진 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬, G 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, W 는 송신단에서 진행하는 프리코딩(precoding) 행렬, H 는 행렬의 허미션을 나타낸다.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 [수학식 1]의 채널 용량식으로부터 도출되는 채널 합용량식은, 아래의 [수학식 2]에 따르는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 2]

$$\begin{aligned} \max_{\Phi} [tr\{(\mathbf{H} + \mathbf{F}\Phi\mathbf{G})^H(\mathbf{H} + \mathbf{F}\Phi\mathbf{G})\}] \\ \text{s.t. } \Phi = \text{diag}(e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, \dots, e^{j\phi_N}) \\ |e^{j\phi_i}| = 1 \end{aligned}$$

여기서, $tr(\cdot)$ 는 행렬 대각 성분의 총 합을 나타낸다. 또한, H 는 송신단과 수신단 사이의 채널, F 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, G 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, W 는 송신단에서 진행하는 프리코딩(precoding) 행렬, H 는 행렬의 허미션을 나타낸다.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 [수학식 2]의 채널 용량식을 채널의 합용량(sum rate)을 최대화하도록 변형하고 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값과 곱해지는 채널 성분들을 포함하는 형태로 변환된 채널 합용량식은, 아래의 [수학식 3]에 따르는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 3]

$$\begin{aligned} X_n &= tr[\phi_n \{H^H f_n g_n^H + \sum_{k=1}^N \phi_k^H g_k f_k^H f_n g_n^H\} + \\ &\phi_n^H \{g_n f_n^H H + \sum_{k=1}^N \phi_k^H g_k f_k^H f_n g_n^H\}] \\ &= tr[\phi_n Y_n + \phi_n^H Y_n^H] \end{aligned}$$

여기서, ϕ_n 은 지능형 반사 표면의 n번째 반사 소자의 위상 변환 값이고, Y_n 은 $H^H f_n g_n^H + \sum_{k=1}^N \phi_k^H g_k f_k^H f_n g_n^H$ 을 치환한 것으로, 지능형 반사 표면의 n번째 반사 소자와 곱해지는 채널 성분들을 의미한다. 또한, f_n 와 f_k 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널 행렬 F 의 n, k번째 열 성분으로 각각 이루어진 벡터, g_n^H 와 g_k^H 은 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널 행렬 G 의 n, k번째 행 성분으로 각각 이루어진 벡터를 의미한다.

청구항 15

제8항에 있어서,

상기 생성되는 변경 위상 변환 행렬은, 아래의 [수학식 4]에 따르는 위상 변환 값들로 구성되는 것을 특징으로 하는 것을 특징으로 하는 무선 통신 시스템.

[수학식 4]

$$\Phi_s(n, n) = e^{-j2\pi \left(\frac{y_1 + y_2 + \dots + y_N}{N} \right)}$$

여기서, Φ_s 는 상기 채널 용량식을 도출하는 과정 내지 변경 위상 변환 행렬 생성 단계(S300)를 s번 반복했을

때 얻어지는 지능형 반사 표면의 위상 변환 값이고, y_n 의 $n(n = 1, 2, \dots, N)$ 번째 대각성분을 의미한다.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 지능형 반사 표면을 포함하는 MIMO 시스템에서 채널의 합용량(Sum rate) 향상을 위한 지능형 반사 표면의 위상 변환 값을 도출하여 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[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.

[0003] 이러한 문제를 해결하기 위하여, MIMO(Multiple Input Multiple Output)와 결합시켜 신뢰성 및 채널 용량을 증가시키는 기술인 지능형 반사 표면(Intelligent reflecting surface, IRS)이 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. 이와 같은 지능형 반사 표면(IRS)의 반사 소자들은 가격이 저렴하며 별도의 RF 체인을 필요로 하지 않고 단순히 들어오는 입력 신호에 대한 반사를 수행하기 때문에, 낮은 하드웨어 및 에너지 비용으로 구현 또는 운용할 수 있다는 장점이 있다.

[0004] 하지만, 지능형 반사 표면(IRS)은 크기가 1이고 위상만을 가지고 있는 반사 소자로 이루어져 있기 때문에, 시스템의 신뢰성 향상 및 채널 용량을 높이기 위한 지능형 반사 표면(IRS)의 위상 변환 값을 최적화 하는 문제는 일반적으로 해결이 불가능한 논-컨벡스(non-convex) 문제여서 시스템의 높은 성능을 구현하는 데에 어려움이 있다.

[0005] (특허문헌) 한국등록특허공보 제10-2192234호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 지능형 반사 표면(IRS)을 이용한 MIMO 시스템에서 채널의 합용량 향상을 위한 지능형 반사 표면(IRS)의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 방법을 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0007] 본 발명에 따른 2차원으로 배열된 개의 반사 소자를 포함하는 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 획득하는 방법은, 소정의 초기 위상 변환 값들로 구성된 초기 위상 변환 행렬이 적용되어 있는 지능형 반사 표면을 거쳐

송신단으로부터 수신단이 수신하는 수신신호가 겪는 채널에 기반하여, 상기 송신단과 수신단 사이의 채널 용량을 나타내는 채널 용량식을 도출하는 채널 용량식 도출 단계; 상기 도출된 채널 용량식으로부터 위상 변환 행렬을 포함하는 채널 합용량식을 도출하여 채널의 합용량(sum rate)을 최대화 하도록 변형하고, 이를 상기 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값과 곱해지는 채널 성분들을 포함하는 형태로 변환하는 채널 용량식 변환 단계; 상기 변환된 채널 용량식을 기반으로 지능형 반사 표면의 $n(n = 1, 2, \dots, N)$ 번째 반사 소자의 위상 변환 값을 산출하여 변경 위상 변환 행렬을 생성하는 변경 위상 변환 행렬 생성 단계; 상기 생성된 변경 위상 변환 행렬과 소정의 초기 위상 변환 행렬 간 오차를 산출하고, 산출된 오차가 소정의 기준 오차 값 이하인지를 비교하는 오차 충족조건 비교 단계;

[0008] 상기 오차 충족조건 비교 단계의 비교 결과, 상기 산출된 오차가 소정의 기준 오차 값 이하이면, 상기 생성된 변경 위상 변환 행렬을 채널 합용량(sum rate)을 최대화 하는 최적의 위상 변환 행렬로 획득하는 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계; 를 포함하여 구성된다.

[0009] 여기서, 상기 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계는, 상기 오차 충족조건 비교 단계의 비교 결과, 상기 산출된 오차가 소정의 기준 값 이하가 아닌 경우, 상기 소정의 초기 위상 변환 행렬을 상기 생성된 변경 위상 변환 행렬로 갱신한 후, 상기 채널 용량식 도출 단계 내지 상기 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계를 반복 수행하는 것을 특징으로 한다.

[0010] 한편, 상기 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계는, 상기 오차 충족조건 비교 단계의 비교 결과, 상기 산출된 오차가 소정의 기준 값 이하가 아닌 경우가 소정의 반복 횟수 이상이면, 해당 주기에서 생성된 변경 위상 변환 행렬을 채널 합용량(sum rate)을 최대화하는 최적의 위상 변환 행렬로 획득하는 것을 특징으로 한다.

[0011] 한편, 상기 채널 용량식 도출 단계에서 도출되는 채널 용량식은, 아래의 [수학식 1]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0012] [수학식 1]

$$R = \log_2 \det(\mathbf{I} + \frac{P_i}{\sigma^2} \mathbf{W}_i \mathbf{T} \mathbf{W}_i^H (\mathbf{W}_i \mathbf{T} \mathbf{W}_i^H)^H) \\ = \sum_{i=1}^K \log_2 (1 + \frac{P_i \lambda_i^2}{\sigma^2})$$

[0013]

[0014] 여기서, P_i 는 i 번째 수신 안테나에 할당된 전력, σ^2 는 채널의 잡음 전력을, $\det(\cdot)$ 는 행렬식을 의미한다. 또한, \mathbf{W}_i 은 수신단에서 진행하는 컴바이닝(combining) 행렬, \mathbf{H} 는 송신단과 수신단 사이의 채널, \mathbf{F} 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, Φ 는 대각행렬로 이루어진 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬, \mathbf{G} 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, \mathbf{W} 는 송신단에서 진행하는 프리코딩 precoding 행렬, \mathbf{H} 는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0015] 한편, 상기 채널 용량식 변환 단계에서, 상기 [수학식 1]의 채널 용량식으로부터 도출되는 채널 합용량식은, 아래의 [수학식 2]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0016] 한편, 상기 채널 용량식 변환 단계에서, 상기 [수학식 1]의 채널 용량식으로부터 도출되는 채널 합용량식은, 아래의 [수학식 2]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0017] [수학식 2]

$$\max_{\Phi} [\text{tr}\{(\mathbf{H} + \mathbf{F}\Phi\mathbf{G})^H(\mathbf{H} + \mathbf{F}\Phi\mathbf{G})\}] \\ \text{s.t. } \Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N}) \\ |e^{j\theta_i}| = 1$$

[0018]

[0019] 여기서, $\mathbf{D}(\mathbf{Q})$ 는 행렬 대각 성분의 총 합을 나타낸다. 또한, \mathbf{H} 는 송신단과 수신단 사이의 채널, \mathbf{F} 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, \mathbf{G} 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, \mathbf{W} 는 송신단에서 진행하는 프리코딩(precoding) 행렬, \mathbf{H} 는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0020] 또한, 상기 채널 용량식 변환 단계에서, 상기 [수학식 2]의 채널 합용량식을 채널의 합용량(sum rate)을 최대화 하도록 변형하고 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값과 곱해지는 채널 성분들을 포함하는 형태로 변환된 채널 합용량식은, 아래의 [수학식 3]을 따르는 것을 특징으로 한다.

[0021] [수학식 3]

$$\begin{aligned} X_s &= \text{tr}[\phi_s^H \{ \mathbf{H}^H \mathbf{f}_s \mathbf{g}_s^H + \sum_{k=1, k \neq s}^N \phi_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{f}_s^H \mathbf{f}_k \mathbf{g}_s^H \} + \\ &\quad \phi_s^H \{ \mathbf{g}_s \mathbf{f}_s^H \mathbf{H} + \sum_{k=1, k \neq s}^N \phi_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{f}_s^H \mathbf{f}_k \mathbf{g}_s^H \}] \\ &= \text{tr}[\phi_s^H \mathbf{Y}_s + \phi_s^H \mathbf{Y}_s^H] \end{aligned}$$

[0022]

[0023] 여기서, ϕ_s 은 지능형 반사 표면의 n번째 반사 소자의 위상 변환 값이고, \mathbf{Y}_s 은 $\mathbf{H}^H \mathbf{f}_s \mathbf{g}_s^H + \sum_{k=1, k \neq s}^N \phi_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{f}_s^H \mathbf{f}_k \mathbf{g}_s^H$ 을 치환한 것으로, 지능형 반사 표면의 n번째 반사 소자와 곱해지는 채널 성분들을 의미한다. 또한, \mathbf{f}_n 와 \mathbf{f}_k 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널 행렬 \mathbf{F} 의 n, k번째 열 성분으로 각각 이루어진 벡터, \mathbf{g}_n^H 와 \mathbf{g}_k^H 은 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널 행렬 \mathbf{G} 의 n, k번째 행 성분으로 각각 이루어진 벡터를 의미한다.

[0024] 한편, 상기 변경 위상 변환 행렬 생성 단계에서, 상기 생성되는 변경 위상 변환 행렬은, 아래의 [수학식 4]에 따르는 위상 변환 값들로 구성되는 것을 특징으로 한다.

[0025] [수학식 4]

$$\Phi_s(n, n) = e^{-j(\alpha \pi \left(\frac{y_1 + y_2 + \dots + y_N}{N_s} \right))}$$

[0026]

[0027] 여기서, Φ_s 는 상기 채널 용량식 도출 단계(S100) 내지 변경 위상 변환 행렬 생성 단계(S300)를 s번 반복했을 때 얻어지는 지능형 반사 표면의 위상 변환 값이고, y_s 는 \mathbf{Y}_s 의 $n(n = 1, 2, \dots, N)$ 번째 대각성분을 의미한다.

[0028] 본 발명에 따른 N_t 개의 송신 안테나를 가진 송신단에서 2차원으로 배열된 N 개의 반사 소자를 가지는 지능형 반사 표면(IRS)을 통해 N_r 개의 수신 안테나를 가진 수신단으로 데이터를 송신하는 단일 사용자 MIMO 기반의 무선 통신 시스템은, 소정의 위상 변환 행렬 획득 방식으로 수신단과의 사이의 채널의 합용량(sum rate)을 최대화 하는 최적의 위상 변환 행렬을 획득하여, 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값으로 제어하는 제어부를 포함하는 송신단; 상기 송신단의 제어부의 제어에 의한 위상 변화율에 따라 상기 송신단으로부터 입력되는 신호에 대한 위상을 조절하여 수신단으로 반사하는 지능형 반사 표면(IRS); 및 상기 수신 안테나를 통

해, 상기 지능형 반사 표면의 각 반사 소자에 의해 위상이 조절된 신호를 수신하는 수신단; 을 포함하여 구성되며, 상기 제어부에서 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 것은, 송신단과 수신단 사이의 채널 용량을 나타내는 채널 용량식으로부터 지능형 반사 표면의 소정의 초기 위상 변환 행렬을 포함하는 채널 합용량식을 도출하여 채널의 합용량(sum rate)을 최대화하도록 변형하고, 이를 상기 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값과 곱해지는 채널 성분들을 포함하는 형태로 변환하여, 변환된 채널 용량식을 기반으로 생성되는 변경 위상 변환 행렬로부터 획득하는 것을 특징으로 한다.

[0029] 여기서, 상기 최적의 위상 변환 행렬은, 상기 채널 용량식을 기반으로 생성된 변경 위상 변환 행렬과 소정의 초기 위상 변환 행렬 간 오차가 소정의 오차 충족조건을 충족하는지를 비교하여, 상기 오차 충족조건을 충족하는 생성된 변경 위상 변환 행렬로 결정되는 것; 을 특징으로 한다.

[0030] 한편, 상기 최적의 위상 변환 행렬은, 상기 생성된 변경 위상 변환 행렬과 소정의 초기 위상 변환 행렬 간 오차가 소정의 오차 충족조건을 충족하지 않는 경우, 상기 초기 위상 변환 행렬을 상기 생성된 변경 위상 변환 행렬로 변경 적용하여 상기 채널 합용량식을 도출 내지 오차 충족조건을 비교하는 과정의 반복적인 수행을 통해 결정되는 것을 특징으로 한다.

[0031] 이 때, 상기 최적의 위상 변환 행렬은, 상기 반복적인 수행의 횟수가 소정의 기준 횟수 이상이 되면, 해당 주기에서 생성된 변경 위상 변환 행렬로 결정되는 것을 특징으로 한다.

[0032] 한편, 상기 송신단과 수신단 사이의 채널 용량을 나타내는 채널 용량식은, 아래의 [수학식 1]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0033] [수학식 1]

$$R = \log_2 \det(\mathbf{I} + \frac{P_i}{\sigma^2} \mathbf{W}_i \mathbf{T} \mathbf{W}_i^H (\mathbf{W}_i \mathbf{T} \mathbf{W}_i^H)^H) \\ = \sum_{i=1}^K \log_2 (1 + \frac{P_i \lambda_i^2}{\sigma^2})$$

[0034]

[0035] 여기서, P_i 는 i번째 수신 안테나에 할당된 전력, σ^2 는 채널의 잡음 전력을, $\det(\square)$ 는 행렬식을 의미한다. 또한, \mathbf{W}_i 은 수신단에서 진행하는 컴바이닝(combining) 행렬, \mathbf{H} 는 송신단과 수신단 사이의 채널, \mathbf{F} 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, Φ 는 대각행렬로 이루어진 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬, \mathbf{G} 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, \mathbf{W}_t 는 송신단에서 진행하는 프리코딩 precoding) 행렬, \mathbf{H} 는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0036] 한편, 상기 [수학식 1]의 채널 용량식으로부터 도출되는 채널 합용량식은, 아래의 [수학식 2]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0037] [수학식 2]

$$\max_{\Phi} [\text{tr}\{(\mathbf{H} + \mathbf{F}\Phi\mathbf{G})^H(\mathbf{H} + \mathbf{F}\Phi\mathbf{G})\}] \\ \text{s.t. } \Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N}) \\ |e^{j\theta_i}| = 1$$

[0038]

[0039] 여기서, $\text{tr}(\square)$ 는 행렬 대각 성분의 총 합을 나타낸다. 또한, \mathbf{H} 는 송신단과 수신단 사이의 채널, \mathbf{F} 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, \mathbf{G} 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, \mathbf{W}_t 는 송신단에서 진행하는 프리코딩 precoding) 행렬, \mathbf{H} 는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0040] 한편, 상기 [수학식 2]의 채널 용량식을 채널의 합용량(sum rate)을 최대화하도록 변형하고 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값과 곱해지는 채널 성분들을 포함하는 형태로 변환된 채널 합용량식은, 아래의 [수학식 3]에 따르는 것을 특징으로 한다.

[0041] [수학식 3]

$$\begin{aligned} X_n &= \text{tr}[\phi_n^H \{H^H f_n g_n^H + \sum_{k=n+1, k=N}^N \phi_k^H g_k f_k^H f_n g_n^H\} + \\ &\quad \phi_n^H \{g_n f_n^H H + \sum_{k=n+1, k=N}^N \phi_k^H g_k f_k^H f_n g_n^H\}] \\ &= \text{tr}[\phi_n^H Y_n + \phi_n^H Y_n^H] \end{aligned}$$

[0042]

[0043] 여기서, ϕ_n 은 지능형 반사 표면의 n번째 반사 소자의 위상 변환 값이고, Y_n 은 $H^H f_n g_n^H + \sum_{k=n+1, k=N}^N \phi_k^H g_k f_k^H f_n g_n^H$ 을 치환한 것으로, 지능형 반사 표면의 n번째 반사 소자와 곱해지는 채널 성분들을 의미한다. 또한, f_n 와 f_k 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널 행렬 F 의 n, k번째 열 성분으로 각각 이루어진 벡터, g_n^H 와 g_k^H 은 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널 행렬 G 의 n, k번째 행 성분으로 각각 이루어진 벡터를 의미한다.

[0044] 한편, 상기 생성되는 변경 위상 변환 행렬은, 아래의 [수학식 4]에 따르는 위상 변환 값들로 구성되는 것을 특징으로 하는 것을 특징으로 한다.

[0045] [수학식 4]

$$\Phi_s(n, n) = e^{-j(\alpha \sum_{i=1}^N \frac{y_i + y_2 + \dots + y_N}{N})}$$

[0046]

[0047] 여기서, Φ_s 는 상기 채널 용량식 도출 단계(S100) 내지 변경 위상 변환 행렬 생성 단계(S300)를 s번 반복했을 때 얻어지는 지능형 반사 표면의 위상 변환 값이고, y_n 은 Y_n 의 n(n = 1, 2, ..., N)번째 대각성분을 의미한다.

발명의 효과

[0048] 본 발명에 따르면, 지능형 반사 표면(IRS)의 일반적으로 해결할 수 없는 논-컨벡스(non-convex)를 해결하여 채널 용량을 최대화하는 최적의 지능형 반사 표면의 위상 변환 값을 획득함으로써, 기존 시스템 대비 높은 성능을 달성할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0049] 도 1은 본 발명에 따른 지능형 반사 표면을 포함하는 단일 사용자 MIMO 기반의 무선 통신 시스템의 전체적인 구성을 도시한 도면이다.

도 2는 본 발명에 따른 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 방법을 도시한 도면이다.

도 3은 본 발명에 따른 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 과정의 실제 알고리즘을 보여주는 도면이다.

도 4 내지 9는 다양한 환경 조건에서 본 발명에 따른 방법을 이용하여 획득된 위상 변환 행렬로 시뮬레이션 하

여 나타나는 결과를 보여주는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0050] 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.
- [0051] 이하, 도면을 참조하여 본 발명에 대하여 상세하게 설명하도록 한다.
- [0052] 1. 본 발명의 시스템 환경
- [0053] 도 1은 지능형 반사 표면(IRS)을 포함하는 단일 사용자(Single User) - MIMO 시스템의 송수신 모델을 나타내는 도면이다.
- [0054] 본 발명에서는, 도 1에 보이는 것과 같이 N_t 개의 송신 안테나를 가진 기지국(100)에서 N_r 개의 수신 안테나를 가진 수신기(300)와 2차원으로 배열된 N 개의 반사 소자(요소, 210)를 가지고 있는 지능형 반사 표면(IRS: Intelligent reflecting surface, 200)을 포함하는 하향링크 단일 사용자(Single User) - MIMO 기반의 통신 시스템을 고려한다.
- [0055] 이하에서는, 기지국을 송신단으로, 수신기를 수신단으로 혼용하여 설명할 수 있다.
- [0056] 2. 본 발명에 따른 무선 통신 시스템
- [0057] 본 발명에 따른 무선 통신 시스템은, 앞서 설명한 도 1을 참조하면 송신단(100), 지능형 반사 표면(200), 수신단(300)을 포함하여 구성될 수 있다.
- [0058] 2.1. 송신단(100)
- [0059] 송신단(100)은, 앞서 설명한 것과 같이 N_t 개의 송신 안테나를 구비하고 있다.
- [0060] 상기 송신단(100)은, 도면에는 도시되지 않았지만 지능형 반사 표면(200)의 위상 변화율을 제어하는 제어부(미도시)를 포함하여 구성될 수 있다.
- [0061] 본 발명에 따른 제어부(미도시)는, 송신단(100)과 수신단(300) 사이의 채널 합용량(sum rate), 즉 시스템 성능을 최대화 할 수 있도록 하기 위하여, 후술하는 알고리즘을 통해 획득되는 최적의 위상 변환 행렬을 지능형 반사 표면(200)에 적용하여 제어하는 형태로 구현될 수 있다.
- [0062] 2.2. 지능형 반사 표면(200)
- [0063] 지능형 반사 표면(200)은, 2차원으로 배열된 N 개의 반사 소자(요소, 210)를 포함하고 있다. 상기 지능형 반사 표면(200)은, 상기 송신단(100)의 제어에 따라 적용되는 위상 변화율로 송신단(100)으로부터 입력되는 신호에 대한 위상을 조절하여 수신단(300)으로 반사하도록 구성된다.
- [0064] 2.3. 수신단(300)
- [0065] 수신단(300)은, N_r 개의 수신 안테나를 포함하여 구성되어, 상기 지능형 반사 표면(200)을 통해 위상이 조절된 신호를 전달 받아 수신하는 구성이다.
- [0066] 이하에서는, 본 발명에 따른 무선 통신 시스템에 적용되는 지능형 반사 표면(200)의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 방법에 대하여 설명한다. 후술하는 방법은, 앞서 설명한 것과 같이 송신단(100)의 제어부(미도시)에서 수행하도록 구성될 수 있으며, 이를 통해 획득되는 최적의 위상 변환 행렬의 위상 변환 값들을 지능형 반사 표면(200)에 적용하여 위상 변화율을 제어하는 형태로 구현될 수 있다.

[0067] 3. 본 발명에 따른 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬 방법

[0068] 도 2는 본 발명에 따른 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 방법을 도시한 도면이고, 도 3은 도 2에 따른 방법의 실제 알고리즘을 보여주는 도면이다.

[0069] 도 2 및 3을 참조하면, 본 발명에 따른 채널 합 용량(Sum rate) 향상을 위한 지능형 반사 표면의 최적의 위상 변환 행렬을 획득하는 방법은, 아래와 같이 구성될 수 있다.

[0070] 3.1. 채널 용량식 도출 단계(S100)

[0071] 채널 용량식 도출 단계는, 소정의 초기 위상 변환 값들로 구성된 초기 위상 변환 행렬로 위상 변화율로 설정되어 있는 지능형 반사 표면(IRS, 200)을 거쳐 송신단(100)으로부터 수신단(300)이 수신하는 최종 수신신호가 겪는 채널에 기반하여, 상기 송신단(100)과 수신단(300) 사이의 채널의 채널 용량을 나타내는 채널 용량식을 도출하는 단계이다. 이러한 단계는, 아래와 같은 세부 과정을 통해 이루어진다.

[0072] 여기서, 소정의 초기 위상 변환 값들은 임의의 수로 랜덤하게 설정될 수 있다.

[0073] 먼저, 본 발명은 앞서 설명한 시스템 환경에서 송신단(100)과 수신단(300) 간의 송수신 시 특이값 분해(singular value decomposition, SVD) 전송 방식을 고려한다. 특이 값 분해란, 고유값 분해(eigendecomposition)처럼 행렬을 대각화하는 잘 알려진 기술이다. 이러한 특이값 분해(SVD) 전송은, 송신단(100)에서 프리코딩(precoding) 과정을 진행하고, 수신단(300)에서 컴바이닝(combining) 과정을 진행한다.

[0074] 따라서, 수신단(300)의 수신신호 벡터 y 는 다음의 [수학식 1]과 같이 표현된다.

[0075] [수학식 1]

$$y = W_r(H + F\Phi G)W_t x + W_r n$$

[0076]

[0077] 여기서, W_r 은 수신단에서 진행하는 컴바이닝(combining) 행렬, H 는 송신단과 수신단 사이의 채널, F 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, Φ 는 대각행렬로 이루어진 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬, G 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, W_t 는 송신단에서 진행하는 프리코딩(precoding) 행렬, n 은 평균이 0이고 분산이 1인 크기의 $K \times 1$ 가산 백색 가우스 잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN)을 의미한다.

[0078] 본 발명은 송수신단(100, 300) 사이에 완벽한 채널 상태 정보(channel state information, CSI)를 알고 있다고 가정한다. 채널 상태 정보(CSI)가 완벽한 SU-MIMO 시스템에서 최적의 프리코딩(precoding) 행렬과 컴바이닝(combining) 행렬은 다음의 [수학식 2]와 같이 표현된다.

[0079] [수학식 2]

$$\begin{aligned} T &= H + F\Phi G = U\Sigma V^H \\ W_r &= U_{lk}^H \\ W_t &= V_{lk} \end{aligned}$$

[0080]

[0081] 여기서, T 는 수신단에서 수신자가 겪은 컴바이닝(combining), 프리코딩(precoding) 행렬을 제외한 최종 수신신호가 겪는 채널을 의미한다. 또한, W_r 은 수신단에서 진행하는 컴바이닝(combining) 행렬, H 는 송신단과 수신단 사이의 채널, F 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, Φ 는 대각행렬로 이루어진 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬, G 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, W_t 는 송신단에서 진행하는 프리코딩(precoding) 행렬을 나타낸다.

[0082] 이 때, 채널 \mathbf{I} 의 특이값 분해(SVD)를 통해 컴바이닝(combining) 행렬과 프리코딩 precoding) 행렬을 구할 수 있다. 여기서 \mathbf{U} 와 \mathbf{V} 는 각각 $\mathbf{U}\mathbf{U}^H = \mathbf{I}$, $\mathbf{V}\mathbf{V}^H = \mathbf{I}$ 가 성립하는 직교 행렬이고, 컴바이닝(combining) 행렬과 프리코딩 precoding) 행렬을 각각 \mathbf{U}_{1k}^H , \mathbf{V}_{1k} 로 표현한다. 또한, \mathbf{Q}_{1k} 는 행렬 \mathbf{L} 의 행과 열을 k번 까지 사용한다는 것을 의미한다.

[0083] 이를 통해 구해지는 컴바이닝(combining) 행렬과 프리코딩 precoding) 행렬을 이용하여, 송신단과 수신단 사이의 채널의 채널 용량을 나타내는 채널 용량식은 다음의 [수학식 3]과 같이 도출된다.

[0084] [수학식 3]

$$R = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{P_i}{\sigma^2} \mathbf{W}_r \mathbf{T} \mathbf{W}_t (\mathbf{W}_r \mathbf{T} \mathbf{W}_t)^H \right) \\ = \sum_{i=1}^k \log_2 \left(1 + \frac{P_i \lambda_i^2}{\sigma^2} \right)$$

[0085]

[0086] 여기서, P_i 는 i번째 수신 안테나에 할당된 전력, σ^2 는 채널의 잡음 전력을, $\det(\cdot)$ 는 행렬식을 의미한다. 또한, \mathbf{W}_r 은 수신단에서 진행하는 컴바이닝(combining) 행렬, \mathbf{H} 는 송신단과 수신단 사이의 채널, \mathbf{F} 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, Φ 는 대각행렬로 이루어진 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬, \mathbf{G} 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, \mathbf{W}_t 는 송신단에서 진행하는 프리코딩 precoding) 행렬, \mathbf{I} 는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0087] 3.2. 채널 용량식 변환 단계(S200)

[0088] 채널 용량식 변환 단계는, 상기 [수학식 3]에 따르는 채널 용량식으로부터 위상 변환 행렬을 포함하는 채널 합 용량식을 도출하여 채널의 합용량(sum rate)을 최대화 하도록 변형하고, 지능형 반사 표면의 각 반사 소자의 위상 변환 값과 곱해지는 채널 성분들을 포함하는 형태로 변환하는 단계이다. 이러한 단계는 아래와 같은 세부 과정을 통해 이루어진다.

[0089] 먼저, 채널 \mathbf{I} 의 수신신호가 유효채널은 $\mathbf{W}_r \mathbf{T} \mathbf{W}_t$ 로, \mathbf{W}_r , \mathbf{W}_t 를 위 [수학식 2]의 \mathbf{U}_{1k}^H , \mathbf{V}_{1k} 로 적용하면 직교행렬 성질에 의해 채널 \mathbf{I} 의 특이값 성분을 가지는 행렬 Σ 만 남기 때문에, 결국 최종적으로 채널의 합용량(sum rate)은 $\sum_{i=1}^k \log_2 \left(1 + \frac{P_i \lambda_i^2}{\sigma^2} \right)$ 로 표현이 된다. 그렇기 때문에 채널의 합용량(sum rate), 즉 시스템 성능을 최대화하기 위해서는, 채널 \mathbf{I} 의 특이값을 최대화해야만 한다.

[0090] 이와 같은 원리를 통해, 지능형 반사 표면(IRS)의 위상 변환 행렬 Φ 을 포함하여 채널의 합용량식을 표현하면, 다음의 [수학식 4]와 같이 표현된다.

[0091] [수학식 4]

$$\max_{\Phi} [\text{tr}\{(\mathbf{H} + \mathbf{F}\Phi\mathbf{G})^H(\mathbf{H} + \mathbf{F}\Phi\mathbf{G})\}]$$

$$\text{s.t. } \Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N})$$

$$|e^{j\theta_i}| = 1$$

[0092]

[0093] 여기서, $\text{tr}(\cdot)$ 는 행렬 대각 성분의 총 합을 나타낸다. 또한, \mathbf{H} 는 송신단과 수신단 사이의 채널, \mathbf{F} 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널, \mathbf{G} 는 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널, \mathbf{W} 는 송신단에서 진행하는 프리코딩(precoding) 행렬, \mathbf{H} 는 행렬의 허미션을 나타낸다.

[0094] 그런데, 위 [수학식 4]에서 $|e^{j\theta_i}| = 1$ 의 조건으로 인해 [수학식 4]를 최대화 하는 것은 논-컨벡스(non-convex) 문제이므로 일반적으로 해결하기에 어려움이 있다.

[0095] 이를 해결하기 위하여, 채널 \mathbf{F} 를 벡터화하고 벡터화 한 채널 \mathbf{F} 를 이용하여 Φ 를 변형하며, 변형되는 [수학식 4]는 다음의 [수학식 5]와 같이 표현된다.

[0096] [수학식 5]

$$\max_{\Phi} [\text{tr}\{(\mathbf{H} + \sum_{i=1}^N \phi_i \mathbf{f}_i \mathbf{g}_i^H)^H(\mathbf{H} + \sum_{i=1}^N \phi_i \mathbf{f}_i \mathbf{g}_i^H)\}]$$

$$\text{s.t. } \Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N})$$

$$|e^{j\theta_i}| = 1$$

[0097]

[0098] 여기서, ϕ_i 는 지능형 반사 표면의 i번째 반사 소자, \mathbf{f}_i 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널 행렬 \mathbf{F} 의 i번째 열 성분으로 이루어진 벡터, \mathbf{g}_i^H 은 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널 행렬 \mathbf{G} 의 i번째 행 성분으로 이루어진 벡터를 의미한다.

[0099] 하지만, 위 [수학식 5] 역시 여전히 논-컨벡스(non-convex) 문제이다. 이에, [수학식 5]를 전개하여 다음의 [수학식 6]의 형태로 변형한다.

[0100] [수학식 6]

$$\text{tr}\{(\mathbf{H} + \sum_{i=1}^N \phi_i \mathbf{f}_i \mathbf{g}_i^H)^H(\mathbf{H} + \sum_{i=1}^N \phi_i \mathbf{f}_i \mathbf{g}_i^H)\}$$

$$= \text{tr}\{\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sum_{i=1}^N \mathbf{g}_i^H \mathbf{f}_i^H \mathbf{f}_i \mathbf{g}_i^H +$$

$$\sum_{i=1}^N (\phi_i \mathbf{H}^H \mathbf{f}_i \mathbf{g}_i^H + \phi_i^H \mathbf{g}_i \mathbf{f}_i^H \mathbf{H} + \sum_{j \neq i, j=1}^N \phi_i^H \phi_j \mathbf{g}_j \mathbf{f}_i^H \mathbf{f}_j \mathbf{g}_i^H)\}$$

[0101]

[0102] 여기서, $\phi_i \phi_i^H = 1$ 이기 때문에, 위 [수학식 6]에서 우 항의 두번째 항은 $\phi_i \phi_i^H$ 가 없는 상태로 표현된다. 그

리고 [수학식 6]에서 우 항의 $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ 과 $\sum_{k=1}^N \mathbf{g}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{g}_k^H$ 는 ϕ_n 가 포함되어 있지 않은 항이기 때문에 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬에 따른 위상 변화율에 대해 그 값이 변하지 않는다. 따라서, 이들은 제외한 남은 항만이 송신단(100)과 수신단(300) 사이의 채널의 합용량(sum rate)을 최대화 하는 데에 필요하다.

[0103] 그렇지만, 지능형 반사 표면(IRS)에 구성된 반사 소자들의 모든 위상 변환 값을 한번에 최적화 시키는 것은 어려운 문제이므로, 상기 [수학식 6]을 n번째의 지능형 반사 표면(IRS, 200)의 반사 소자(210)의 위상 변환 값을 \mathbf{X}_n 으로 하여 다음의 [수학식 7] 같이 변환한다.

[0104] [수학식 7]

$$\mathbf{X}_n = \text{tr} \{ \phi_n^H \mathbf{H}^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H + \phi_n^H \mathbf{g}_n \mathbf{f}_n^H \mathbf{H} + \sum_{k=1, k \neq n}^N \phi_n^H \phi_k \mathbf{g}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{f}_k \mathbf{g}_k^H + \sum_{k=1, k \neq n}^N \phi_n^H \phi_k \mathbf{g}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H \}$$

[0105]

[0106] 이와 같은 [수학식 7]은 지능형 반사 표면(200)의 n번째 반사 소자(210)가 영향을 주는, 즉 곱해지는 채널 성분들로 변환하여 표현된 식을 의미한다.

[0107] 여기서, [수학식 7]의 3, 4번째 항은, [수학식 6]의 항이 i, j가 각각 n번째 일 때 파생된 식이다.

[0108] 지능형 반사 표면(200)의 위상 변환 행렬을 구성하기 위하여, 지능형 반사 표면(200)의 n번째 반사 소자(210)의 위상 변환 값 ϕ_n 의 값을 구하기 위해, 위 [수학식 7]을 다음의 [수학식 8]와 같이 변환한다.

[0109] [수학식 8]

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_n &= \text{tr} \{ \phi_n^H \{ \mathbf{H}^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H + \sum_{k=1, k \neq n}^N \phi_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H \} + \phi_n^H \{ \mathbf{g}_n \mathbf{f}_n^H \mathbf{H} + \sum_{k=1, k \neq n}^N \phi_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H \} \} \\ &= \text{tr} [\phi_n^H \mathbf{Y}_n + \phi_n^H \mathbf{Y}_n^H] \end{aligned}$$

[0110]

[0111] 여기서, ϕ_n 은 지능형 반사 표면의 n번째 반사 소자의 위상 변환 값이고, \mathbf{Y}_n 은 $\mathbf{H}^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H + \sum_{k=1, k \neq n}^N \phi_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H$ 을 치환한 것으로, 지능형 반사 표면의 n번째 반사 소자와 곱해지는 채널 성분들을 의미한다. 또한, \mathbf{f}_n 와 \mathbf{g}_k 는 송신단과 지능형 반사 표면(IRS) 사이의 채널 행렬 \mathbf{F} 의 n, k번째 열 성분으로 각각 이루어진 벡터, \mathbf{g}_n^H 와 \mathbf{g}_k^H 은 지능형 반사 표면(IRS)과 수신단 사이의 채널 행렬 \mathbf{G} 의 n, k번째 행 성분으로 각각 이루어진 벡터를 의미한다.

[0112] 3.3. 변경 위상 변환 행렬 생성 단계(S300)

[0113] 변경 위상 변환 행렬 생성 단계는, 상기 [수학식 8]에 따르는 변환된 채널 용량식을 기반으로 지능형 반사 표면(200)의 n(n=1, 2, ..., N)번째 반사 소자(210)의 위상 변환 값을 산출하여 지능형 반사 표면(200)의 변경 위상 변환 행렬을 생성할 수 있다.

[0114] 위 [수학식 8]에서, 결국, 채널의 채널 합용량(sum rate)을 최대화 하기 위한 지능형 반사 표면의 반사 소자의 최적의 위상 변환 값을 얻는 것은, $\text{tr}[\phi_n^H \mathbf{Y}_n]$ 을 최대화 하는 ϕ_n 을 도출하는 것으로 달성 가능하다.

[0115] 따라서, 상기 [수학식 8]에 기반하여 생성되는 지능형 반사 표면(200)의 위상 변환 행렬의 n번째 반사 소자(210)의 성분은, 다음의 [수학식 9]에 따른다.

[0116] [수학식 9]

$$\Phi_s(n, n) = e^{-j(\alpha \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_N}{N})}$$

[0117]

[0118] 여기서, Φ_s 는 상기 채널 용량식 도출 단계(S100) 내지 변경 위상 변환 행렬 생성 단계(S300)를 s번 반복했을

때 얻어지는 지능형 반사 표면의 위상 변환 값이고, y_n 는 \mathbf{Y}_s 의 n(n = 1, 2, ..., N)번째 대각성분을 의미한다.

[0119] 한편, 상기 변경 위상 변환 행렬은, 상술한 과정을 통해 [수학식 8]과 [수학식 9]에 따라 생성되는 위상 변환 행렬을 지칭하는 것으로, 임의의 수로 랜덤하게 설정된 소정의 초기 위상 변환 행렬과 구분하기 위함이다.

[0120] 3.4. 오차 충족조건 비교 단계(S400)

[0121] 오차 충족조건 비교 단계는, 상기 생성된 변경 위상 변환 행렬과 소정의 초기 위상 변환 행렬 간 오차를 산출하고, 산출된 오차가 소정의 기준 오차 값 이하인지를 비교할 수 있다.

[0122] 비교 결과, 상기 산출된 오차가 소정의 기준 값 이하가 아닌 경우(즉, 초과하는 경우), 현재 주기(N)에서 지능형 반사 표면의 위상 변화율로 적용되어 있는 소정의 초기 위상 변환 행렬을 상기 생성된 변경 위상 변환 행렬로 갱신할 수 있다.

[0123] 그 후, 다음 주기(N+1)에서 상기 변경된 위상 변환 행렬의 위상 변환 값들을 적용하여 상기 채널 용량식 도출 단계(S100) 내지 변경 위상 변환 행렬 생성 단계(S300)를 반복하고, 이를 통해 생성되는 새로운 변경 위상 변환 행렬과 이전 주기(N)의 변경 위상 변환 행렬과의 오차가 소정의 기준 오차 값 이하인지를 비교하는 오차 충족조건 비교 단계(S400)를 반복하여 수행한다.

[0124] 그 비교 결과, 산출된 오차가 소정의 기준 오차 값 이하가 아닌 경우, 상기 생성된 새로운 변경 위상 변환 행렬을 지능형 반사 표면의 위상 변화율로 다시 갱신하고, 상술한 과정을 반복적으로 수행한다.

[0125] 이와 같은 과정을, 상기 오차 충족조건 비교 단계(S400)에서 현재 주기에 생성된 변경 위상 변환 행렬과 이전 주기의 변경 위상 변환 행렬 간 오차가 소정의 기준 오차 값 이하가 될 때까지 반복적으로 수행하며 채널 합용량(sum rate)을 최대화 하는 최적의 위상 변환 값들을 구하여 최적의 위상 변환 행렬로 획득하는 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계(S500)가 이루어진다.

[0126] 여기서, 상기 오차 충족조건 비교 단계(S400)의 비교 결과 산출된 오차가 소정의 기준 오차 값 이하가 아닌 경우가 소정의 반복 횟수 이상이 되는 경우, 즉 소정의 기준 오차 값 이하가 될 때까지 상기 채널 용량식 도출 단계(S100) 내지 최적의 위상 변환 행렬 획득 단계(S500)를 반복 수행하는 횟수가 소정의 반복 횟수 이상이 되면, 더 이상의 반복적인 수행은 멈추고 해당 주기에서 생성된 변경 위상 변환 행렬을 최적의 위상 변환 행렬로 획득(S500)할 수 있다.

[0127] 한편, 최초 상태에서, 상기 오차 충족조건 비교 단계(S400)에서의 비교 결과, 생성된 변경 위상 변환 행렬과 소정의 초기 위상 변환 행렬 간 오차가 소정의 기준 값 이하이면 상기 채널 용량식 도출 단계(S100) 내지 오차 충족조건 비교 단계(S400)를 반복하지 않고, 상기 생성된 변경 위상 변환 행렬을 채널 합용량(sum rate)을 최대화 하는 최적의 위상 변환 행렬로 판단/획득(S500)할 수 있다.

[0128] 이와 같이 본 발명은 한번에 최적의 위상 변환 행렬 Φ 을 구하는 것보다는, 임의의 수로 랜덤하게 설정된 소정의 초기 위상 변환 값들로부터 상술한 과정을 통해 새로운 위상 변환 값들을 구하고, 이들 값을 적용하여 다시 상술한 과정을 통해 새로운 위상 변환 값들을 구하는 반복적인 연산을 수행하여 보다 효과적으로 채널 합용량(sum rate), 즉 시스템 성능을 높이는 최적의 위상 변환 값들을 획득할 수 있다.

[0129] 도 4 내지 9는 다양한 환경 조건에서 본 발명에 따른 지능형 반사 표면(IRS)의 최적의 위상 변환 행렬 획득 방

법으로 획득된 위상 변화율을 적용하여 시뮬레이션 하였을 경우 나타나는 결과를 보여주는 실험 그래프이다.

- [0130] 도 4는 송신 안테나 개수 16개, 수신 안테나 개수 4개이고 안테나의 배열은 등간격 선형 배열(uniform linear array, ULA) 방식을 사용하며, 지능형 반사 표면의 반사 소자 개수 64개이고 반사 소자의 배열은 등간격 평면 배열(uniform planar array, UPA) 방식을 사용하여 8개의 행/열을 이루는 정사각형으로 배열한 상태에서, 지능형 반사 표면의 위상 변환 행렬을 본 발명에 따른 방법과 기존의 랜덤 방식으로 설계하여 시뮬레이션을 진행하였을 때 나타나는 성능 차이를 보여주는 그래프이다.
- [0131] LOS(Line-of-sight) 환경의 경우, 본 발명의 도 3에 따르는 알고리즘의 1번의 반복만으로 얻은 위상 변환 행렬을 최적의 위상 변환 행렬로 설계하더라도, 소정의 오차 충족조건을 충족할 때까지 알고리즘을 반복하여 얻은 위상 변환 행렬을 최적의 위상 변환 행렬로 설계하였을 경우와 동일한 시스템 성능을 달성하는 것을 확인할 수 있다.
- [0132] 한편, NLOS(Non-line-of-sight) 환경에서는 도 3에 따르는 알고리즘의 1번의 반복만으로 얻은 위상 변환 행렬을 최적의 위상 변환 행렬로 설계한 경우는 소정의 오차 충족조건을 충족할 때까지 알고리즘을 반복하여 얻은 위상 변환 행렬을 최적의 위상 변환 행렬로 설계하였을 경우의 성능과 차이가 나는 것에 비해, 2번의 반복으로 얻은 위상 변환 행렬을 최적의 위상 변환 행렬로 설계하였을 때는 소정의 오차 충족조건을 충족할 때까지 알고리즘을 반복하여 얻은 위상 변환 행렬을 최적의 위상 변환 행렬로 설계하였을 때와 유사한 시스템 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.
- [0133] 그리고, LOS/NLOS 환경과 알고리즘의 반복 횟수 조건을 고려하지 않더라도, 기존의 임의의 수로 위상 변환 값들을 설정하는 랜덤 방식으로 위상 변환 행렬을 설계하였을 경우보다 본 발명에 따른 방법으로 획득되는 위상 변환 행렬로 지능형 반사 표면을 설계하였을 경우 높은 시스템 성능을 가지는 것을 확인 가능하다.
- [0134] 도 5는 송신 안테나 개수 32개, 수신 안테나 개수 8개, 안테나의 배열은 등간격 선형 배열(uniform linear array, ULA) 방식을 사용하며, 지능형 반사 표면의 반사 소자의 배열은 등간격 평면 배열(uniform planar array, UPA) 방식으로 4개의 행, N/4의 열로 이루어져 있고, 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)는 0dB 인 상태에서 시뮬레이션을 진행하였을 때, 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수에 따른 시스템 성능을 보여주는 그래프이다.
- [0135] 이러한 경우, 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수가 증가할수록 시스템 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 기존의 랜덤 방식에 비해 본 발명의 경우 반사 소자의 개수가 증가할수록 발생하는 성능의 증가량이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.
- [0136] 그리고, LOS/NLOS 환경과 알고리즘의 반복 횟수, 지능형 반사 표면의 반사 소자의 개수 조건을 고려하지 않더라도, 기존의 임의의 수로 위상 변환 값들을 설정하는 방식으로 위상 변환 행렬을 설계하였을 경우보다 본 발명에 따른 알고리즘으로 획득되는 위상 변환 행렬로 지능형 반사 표면을 설계하였을 경우 높은 시스템 성능을 가지는 것을 확인 가능하다.
- [0137] 도 6은 NLOS 환경에서 지능형 반사 표면을 구성하는 반사 소자의 개수에 따른 본 발명의 알고리즘 반복 횟수를 보여주는 그래프이다. 이 때, 반복 횟수는 시뮬레이션마다 더한 반복횟수에서 총 시뮬레이션 수를 나눈 것이다.
- [0138] 도 6을 보면, 지능형 반사 표면의 반사 소자 개수가 증가할수록 본 발명의 최적의 위상 변환 행렬을 얻기 위한 알고리즘 반복 횟수가 증가하지만, 증가하더라도 요구되는 반복 횟수의 범위는 4~5 사이에 머무는 것을 확인할 수 있다.
- [0139] 도 7은 송신단, 지능형 반사 표면, 수신단 사이의 거리 설정을 보여주는 도면이고, 도 8, 9는 LOS와 NLOS 채널 환경에 다른 송신 안테나 개수 16개, 수신 안테나 개수 4개, 안테나의 배열은 등간격 선형 배열(uniform linear array, ULA) 방식을 사용하며, 지능형 반사 표면의 반사 소자 개수는 64개이고 등간격 평면 배열(uniform planar array, UPA) 방식을 사용하여 8개의 행/열을 이루는 정사각형으로 배열한 상태에서 시뮬레이션을 진행하였을 때 나타나는 거리에 따른 성능을 보여주는 그래프이다.
- [0140] 도 8, 9를 참조하면, 당연하게도 송신단과 지능형 반사 표면 사이의 수평 거리가 멀어질수록 성능이 감소하지만, LOS/NLOS 환경에 상관 없이 기존의 랜덤 방식으로 위상 변환 행렬을 설계하였을 경우보다 본 발명에 따른 알고리즘으로 획득되는 위상 변환 행렬로 지능형 반사 표면의 위상 변화율을 설계하였을 경우 높은 성능을 가지는 것을 알 수 있다.
- [0141] 또한, LOS 환경에서의 성능 비교를 나타내는 도 8을 보면, 1번의 알고리즘 반복만으로 얻은 위상 변환 행렬로,

NLOS 환경에서의 성능 비교를 나타내는 도 9를 보면, 2번의 알고리즘 반복으로 얻은 위상 변환 행렬로 지능형 반사 표면의 위상 변화율을 설계하였을 경우, 소정의 기준 오차 값 이하로 떨어질 때까지 반복하여 얻은 위상 변환 행렬과 유사한 성능을 내는 것을 확인할 수가 있다.

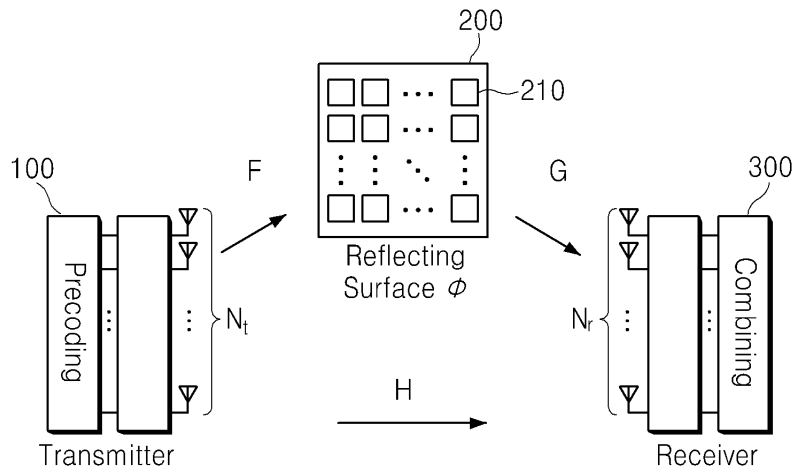
[0142] 한편, 본 발명의 기술적 사상은 상기 실시 예에 따라 구체적으로 기술되었으나, 상기 실시 예는 그 설명을 위한 것이며, 그 제한을 위한 것이 아님을 주의해야 한다. 또한, 본 발명의 기술분야에서 당업자는 본 발명의 기술 사상의 범위 내에서 다양한 실시 예가 가능함을 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

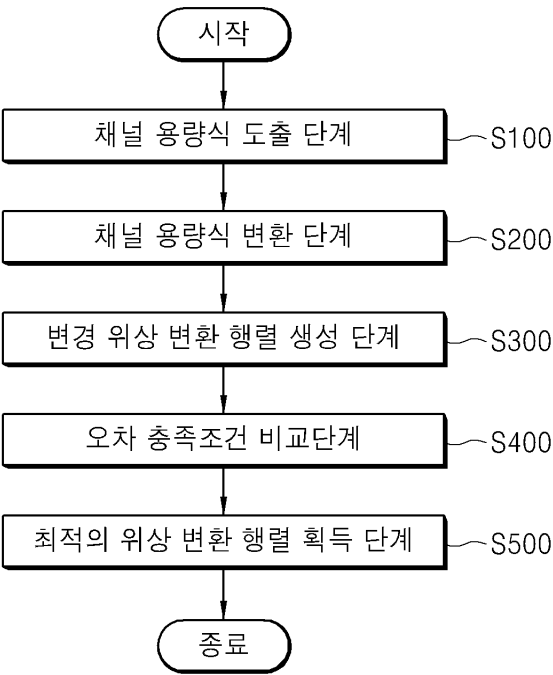
[0143] 100: 송신단
200: 지능형 반사 표면
210: 반사 소자
300: 수신단

도면

도면1



도면2



도면3

Algorithm 1 Iterative Alternative Optimizing Algorithm

Input: (1) Channel Matrix $\mathbf{H}, \mathbf{F}, \mathbf{G}$

(2) Randomized value of IRS matrix $\Phi \in \mathbb{C}^{N \times N}$

$\Phi = \text{diag}(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N), |\phi_n| = 1$

(3) Number of max iteration U

(4) Threshold ε

Output: Φ_s, \mathbf{P}

1: **for** $s = 1:1:U$ **do**

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

3: $\mathbf{Y}_n = \mathbf{H}^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H + \sum_{k \neq n, k=1}^N \phi_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{f}_n \mathbf{g}_n^H$

4: $\Phi_s(n, n) = e^{-j(\text{ang}\left(\frac{y_1 + y_2 + \dots + y_{N_t}}{N_t}\right))}$

5: **end for**

6: **if** $\text{tr}\{ |(\text{ang}(\Phi_s) - \text{ang}(\Phi_{s-1}))| \} \leq \varepsilon$

7: **break**

8: **endif**

9: **end for**

10: **Waterfilling Procedure**

11: **svd decomposition effective matrix** $\mathbf{T}, \mathbf{T} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^H$

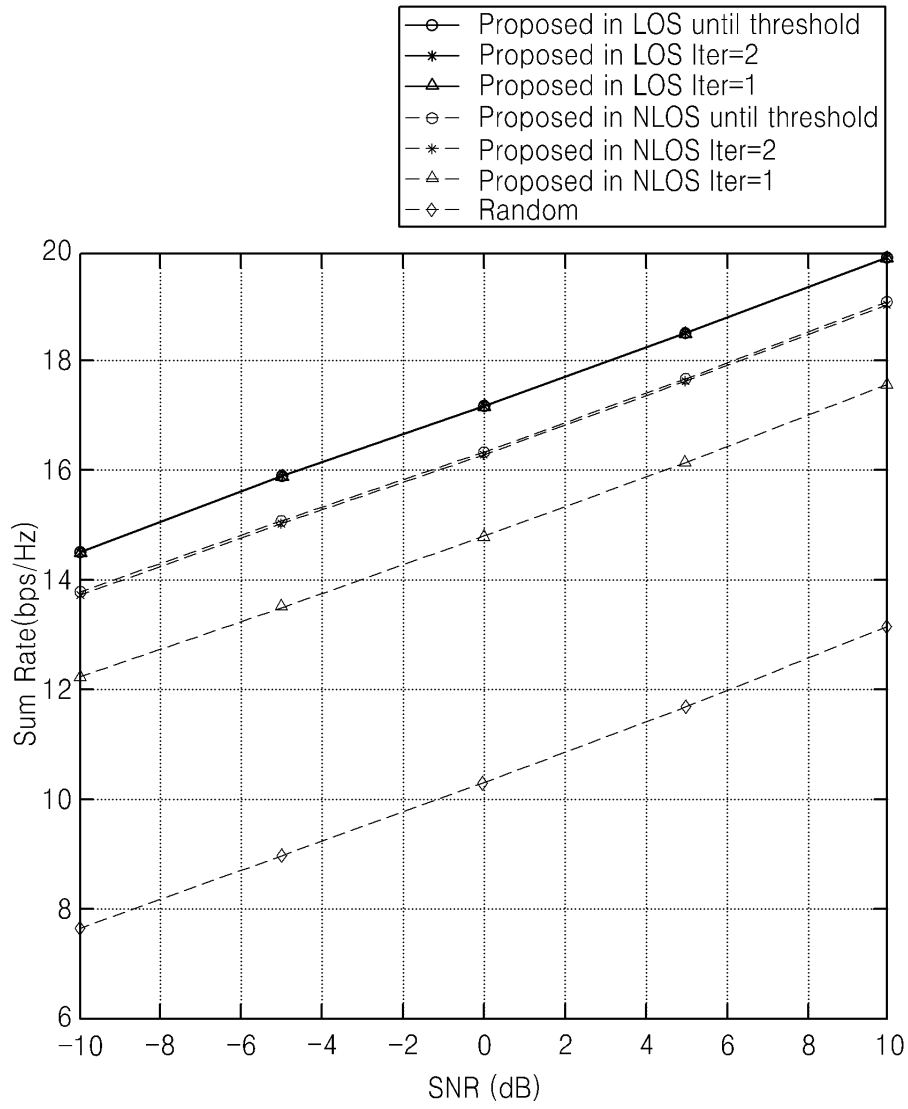
12: **for** $u = 1:1:k$ **do**

13: $\mathbf{P}(u) = \max\left(\frac{1}{p_0} - \frac{\sigma^2}{\lambda_u^2}, 0\right)$

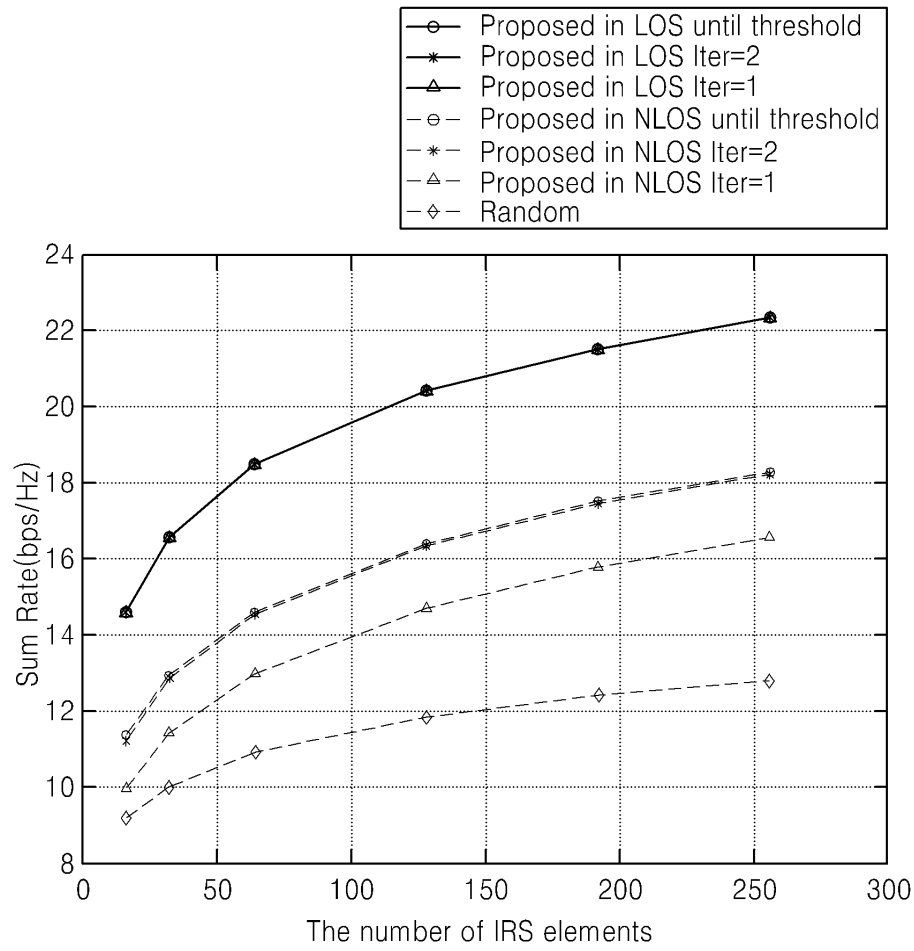
14: **end for**

15: **return** Φ_s, \mathbf{P}

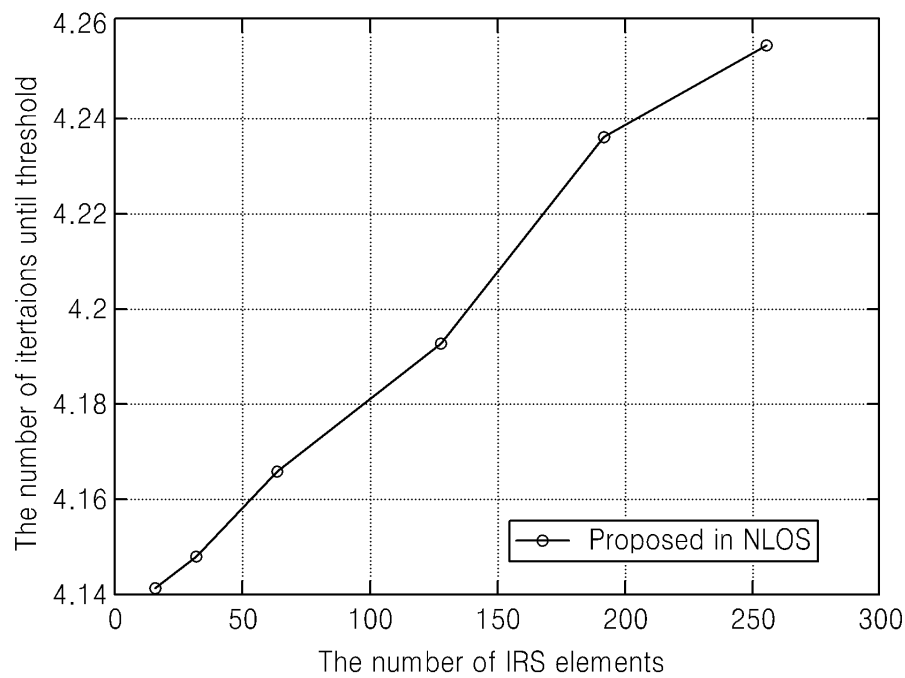
도면4



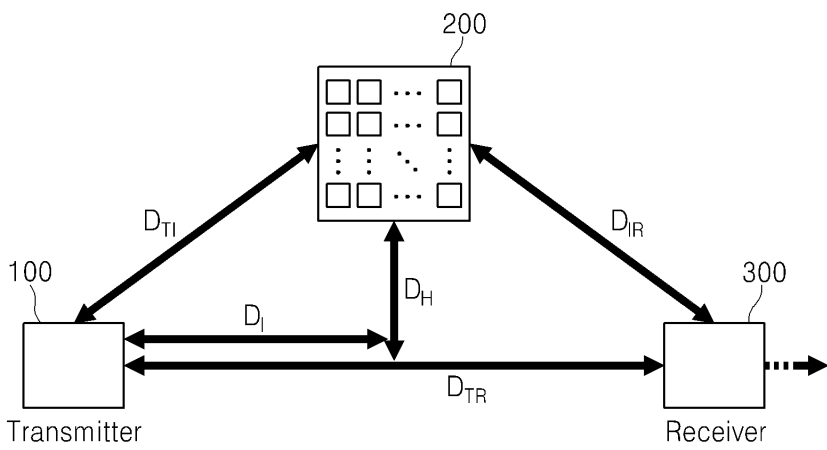
도면5



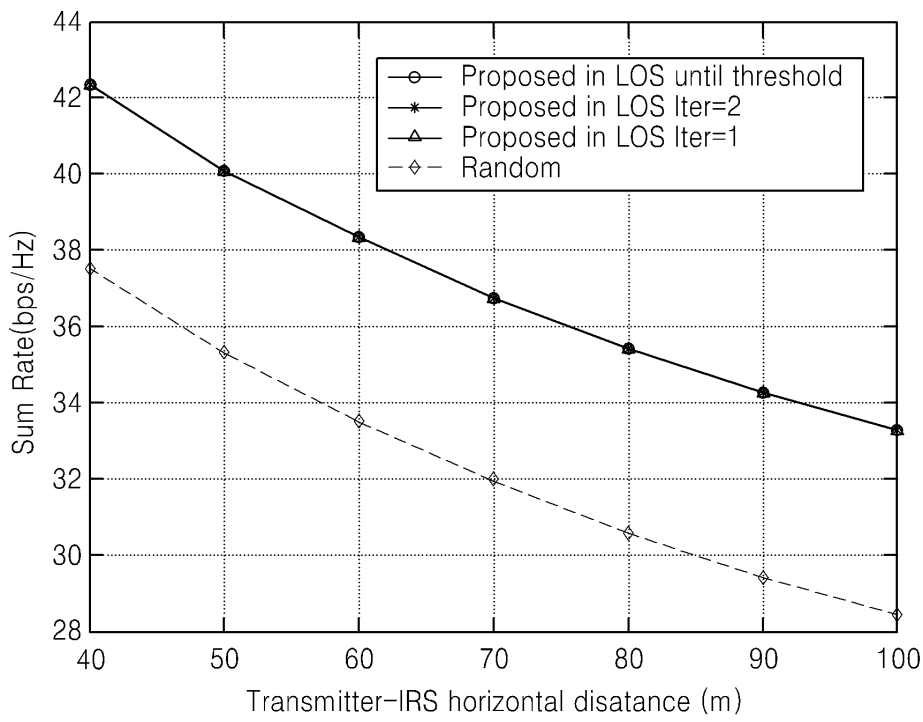
도면6



도면7



도면8



도면9

