



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0003984
(43) 공개일자 2024년01월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04W 24/02 (2009.01) H04B 7/155 (2006.01)
H04B 7/26 (2006.01) H04W 4/40 (2018.01)
(52) CPC특허분류
H04W 24/02 (2013.01)
H04B 7/15507 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2022-0081952
(22) 출원일자 2022년07월04일
심사청구일자 2022년07월04일

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)
(72) 발명자
김덕경
서울특별시 서초구 바우피로7길 51, 101동 503호
(우면동, 대림아파트)
김광해
인천광역시 미추홀구 용정공원로 33, 118동 703호
(용현동, 인천 SK Sky VIEW)
(74) 대리인
양성보

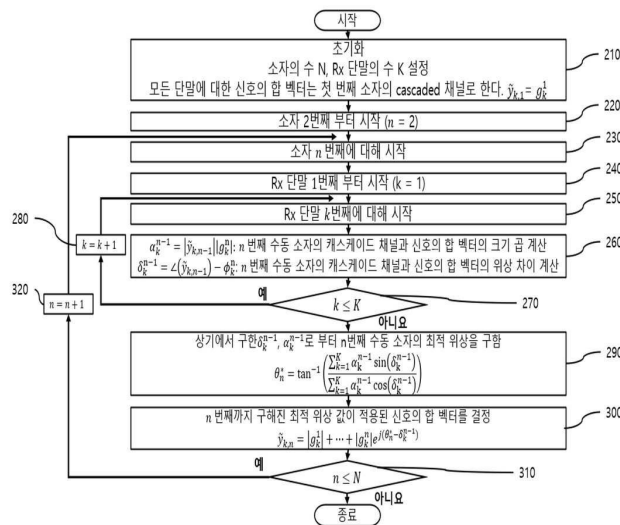
전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 발명의 명칭 계산 복잡도가 저감된 지능형 반사 표면 위상 제어 방법 및 그를 위한 통신 시스템

(57) 요약

본 개시는 계산 복잡도가 저감된 지능형 반사 표면 위상 제어 방법 및 그를 위한 통신 시스템에 관한 것으로, 지능형 반사 표면의 복수의 수동 소자들 중 하나인 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널을 결정하고, 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널에 의해 형성되는 신호를 기준으로 복수의 수동 소자들 중 나머지에 대해 순차적으로 위상 제어를 실행하도록 구성된다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

H04B 7/2621 (2013.01)

H04W 4/40 (2020.05)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711160490

과제번호 2022-0-00521-001

부처명 과학기술정보통신부

과제관리(전문)기관명 정보통신기획평가원

연구사업명 방송통신산업기술개발사업

연구과제명 [Ezbaro] 레벨4 이상 자율주행 서비스 지원을 위한 5G-NR-V2X 통신 기술개발(1차년도)

기 여 율 1/1

과제수행기관명 대보정보통신(주)

연구기간 2022.04.01 ~ 2022.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

통신 시스템이 계산 복잡도가 저감된 지능형 반사 표면의 위상 제어를 실행하는 방법에 있어서,
상기 지능형 반사 표면의 복수의 수동 소자들 중 하나인 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널을 결정하는 단계;
및
상기 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널에 의해 형성되는 신호를 기준으로 상기 복수의 수동 소자들 중 나머
지에 대해 순차적으로 위상 제어를 실행하는 단계
를 포함하는,
방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,
상기 복수의 수동 소자들 중 나머지의 상기 위상 제어를 순차적으로 실행하는 단계는,
상기 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널에 의해 형성되는 신호를 기준으로 2 번째 수동 소자의 위상 제어를
실행하는 단계; 및
상기 1 번째 수동 소자와 상기 2 번째 수동 소자를 포함하는 복수의 이전 수동 소자들의 위상 제어에 의해 형성
되는 합성 신호를 기준으로 현재 수동 소자에 대해 위상 제어를 실행하는 단계
를 포함하는,
방법.

청구항 3

제 2 항에 있어서,
상기 현재 수동 소자에 대해 위상 제어를 실행하는 단계는,
상기 복수의 수동 소자들 모두에 대해 위상 제어가 실행될 때까지 반복되는,
방법.

청구항 4

제 1 항에 있어서,
상기 방법은,
FDMA 방식으로 복수의 수신 단말들에 서비스하도록 구현되는 환경에서, 상기 복수의 수신 단말들의 각각을 위해
수행되는,
방법.

청구항 5

제 4 항에 있어서,
상기 복수의 수동 소자들은,
상기 복수의 수신 단말들의 각각에 대한 신호 전력의 합을 최대로 하는 위상 값으로 제어되는,
방법.

청구항 6

제 2 항에 있어서,
상기 현재 수동 소자의 위상 값은,
하기 수식과 같이 정의되고,

$$\theta_n^* = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) > 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) + \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1}) \geq 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) - \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \end{cases}$$

여기서, 상기 θ_n^* 는 상기 현재 수동 소자, 즉 n 번째 수동 소자의 위상 값을 나타내고, 상기 α_k^{n-1} 는 K 개의 수신 단말들 중 k 번째 수신 단말에 대한 상기 합성 신호의 벡터와 상기 현재 수동 소자의 캐스케이드 채널의 벡터로부터 결정되는 크기(amplitude) 값 나타내며, 상기 δ_k^{n-1} 는 상기 합성 신호의 벡터와 상기 현재 수동 소자의 캐스케이드 채널의 벡터의 위상 차이를 나타내는,
방법.

청구항 7

계산 복잡도가 저감된 지능형 반사 표면의 위상 제어를 실행하는 통신 시스템에 있어서,
상기 지능형 반사 표면의 위상 제어를 위한 적어도 하나의 프로세서
를 포함하고,
상기 적어도 하나의 프로세서는,
상기 지능형 반사 표면의 복수의 수동 소자들 중 하나인 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널을 결정하고,
상기 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널에 의해 형성되는 신호를 기준으로 상기 복수의 수동 소자들 중 나머
지에 대해 순차적으로 위상 제어를 실행하도록 구성되는,
통신 시스템.

청구항 8

제 7 항에 있어서,
상기 복수의 수동 소자들 중 나머지에 대해 순차적으로 위상 제어를 실행하는 것은,
상기 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널에 의해 형성되는 신호를 기준으로 2 번째 수동 소자의 위상 제어를
실행하는 것, 및

상기 1 번째 수동 소자와 상기 2 번째 수동 소자를 포함하는 복수의 이전 수동 소자들의 위상 제어에 의해 형성되는 합성 신호를 기준으로 현재 수동 소자에 대해 위상 제어를 실행하는 것을 포함하는,
통신 시스템.

청구항 9

제 8 항에 있어서,
상기 현재 수동 소자에 대해 위상 제어를 실행하는 것은,
상기 복수의 수동 소자들 모두에 대해 위상 제어가 실행될 때까지 반복되는,
통신 시스템.

청구항 10

제 7 항에 있어서,
상기 통신 시스템은,
FDMA 방식으로 복수의 수신 단말들에 서비스하도록 구현되는 환경에서, 상기 복수의 수신 단말들의 각각을 위해 상기 복수의 수동 소자들에 대해 위상 제어를 실행하도록 구현되는,
통신 시스템.

청구항 11

제 10 항에 있어서,
상기 복수의 수동 소자들은,
상기 복수의 수신 단말들의 각각에 대한 신호 전력의 합을 최대로 하는 위상 값으로 제어되는,
통신 시스템.

청구항 12

제 8 항에 있어서,
상기 현재 수동 소자의 위상 값은,
하기 수학적식과 같이 정의되고,

$$\theta_n^* = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) > 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) + \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1}) \geq 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) - \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \end{cases}$$

여기서, 상기 θ_n^* 는 상기 현재 수동 소자, 즉 n 번째 수동 소자의 위상 값을 나타내고, 상기 α_k^{n-1} 는 K 개의 수신 단말들 중 k 번째 수신 단말에 대한 상기 합성 신호의 벡터와 상기 현재 수동 소자의 캐스케이드 채널의

벡터로부터 결정되는 크기(amplitude) 값 나타내며, 상기 δ_k^{n-1} 는 상기 합성 신호의 벡터와 상기 현재 수동 소자의 캐스케이드 채널의 벡터의 위상 차이를 나타내는, 통신 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 개시는 계산 복잡도가 저감된 지능형 반사 표면(intelligent reflection surface; IRS) 위상 제어 방법 및 그를 위한 통신 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] IRS는 처리량, 통신 범위, 에너지 효율성을 개선할 수 있는 B5G(Beyond fifth-generation) 통신 시스템을 위한 혁신적인 기술로 최근에 주목받고 있다. IRS는 많은 수의 재구성이 가능한 수동 소자들로 구성되어 스마트 제어와 연결하여 간섭을 억제하는 것뿐만 아니라 신호 전력을 향상시킬 수 있다.

[0003] IRS 시스템에서 TDMA(time division multiple access)와 FDMA(frequency division multiple access)를 사용하여 여러 단말들에게 서비스할 수 있다. 먼저, TDMA인 경우, 각 시간대마다 하나의 단말에 대해서 IRS의 위상 편이를 제어하여 하나의 단말에 대한 신호 전력을 최대화하는 최적 해를 구한다. 이는 하나의 단말에 대해 최적 해를 구하기 때문에 닫힌 형태로 최적화 문제를 풀 수 있다. 반면, FDMA인 경우, 모든 단말들이 같은 시간대에서 IRS의 위상을 동시에 제어하여 모든 단말의 신호 전력 합을 최대화하는 최적 해를 찾아야 하므로 단말들의 수가 증가할수록 TDMA 방식보다 최적 해를 구하는 방식의 복잡도는 증가한다. 또한, 기존의 연구에서 FDMA 방식의 위상 편이 제어에 있어 반복적으로 최적 위상을 탐색한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 본 개시는 계산 복잡도가 저감된 지능형 반사 표면 위상 제어 방법 및 그를 위한 통신 시스템을 제공한다.

[0005] 본 개시는, IRS 시스템에서 FDMA 방식을 사용하여 IRS의 최적 해를 구하는 방식에 비해 더 낮은 복잡성을 갖는 차선 해를 구하는 방식을 제안한다.

과제의 해결 수단

[0006] 본 개시에 따른 통신 시스템의 방법은, 지능형 반사 표면의 복수의 수동 소자들 중 하나인 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널을 결정하는 단계, 및 상기 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널에 의해 형성되는 신호를 기준으로 상기 복수의 수동 소자들 중 나머지에 대해 순차적으로 위상 제어를 실행하는 단계를 포함한다.

[0007] 본 개시에 따른 통신 시스템은, 지능형 반사 표면의 위상 제어를 위한 적어도 하나의 프로세서를 포함하고, 상기 적어도 하나의 프로세서는, 상기 지능형 반사 표면의 상기 복수의 수동 소자들 중 하나인 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널을 결정하고, 상기 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널에 의해 형성되는 신호를 기준으로 상기 복수의 수동 소자들 중 나머지에 대해 순차적으로 위상 제어를 실행하도록 구성된다.

발명의 효과

[0008] 본 개시는 모든 Rx 단말들의 신호 전력 합을 최대화하기 위한 IRS의 부 최적 해, 즉 차선 해 구하는 방식으로 IRS 위상을 제어한다. 이 때, 차선 해를 구하는 방식은 최적 해를 구하는 방식의 복잡성을 낮추므로, 본 개시는 더 낮은 계산 복잡도로 IRS 위상을 제어할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0009] 도 1은 다양한 실시예들에 따른 IRS 시스템을 개략적으로 도시하는 도면이다.

도 2는 다양한 실시예들에 따른 IRS 시스템의 IRS 위상 제어 방법을 개략적으로 도시하는 도면이다.

도 3은 다양한 실시예들에 따른 IRS 시스템의 동작 알고리즘을 나타내는 도면이다.

도 4는 다양한 실시예들에 따른 IRS 시스템의 IRS 위상 제어 방법의 성능을 설명하기 위한 도면들이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

이하, 본 개시의 다양한 실시예들이 첨부된 도면을 참조하여 설명된다.

도 1은 다양한 실시예들에 따른 IRS 시스템(100)을 개략적으로 도시하는 도면이다.

도 1을 참조하면, 다양한 실시예들의 통신 시스템, 즉 IRS 시스템(100)은 Tx 단말(110), IRS(120), 및 적어도 하나의 Rx 단말(130)을 포함한다. 여기서, Tx 단말(110) 및 Rx 단말(130)은 SISO(single input single output)으로 구현될 수 있다.

이 때, Tx 단말(110)과 IRS(120) 사이의 채널($h_{T,I}$) 및 IRS(120)와 Rx 단말(130) 사이의 채널($h_{I,k}$)이 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} h_{T,I} &\in \mathbb{C}^{N \times 1} \\ h_{T,I} &= [h_{T,1}, \dots, h_{T,N}]^T \\ h_{I,k} &\in \mathbb{C}^{1 \times N} \\ h_{I,k} &= [h_{1,k}, \dots, h_{N,k}] \end{aligned}$$

Tx 단말(110)로부터 IRS(120)를 거쳐 k 번째 Rx 단말(130)이 수신한 신호는 하기 [수학식 1]과 같다.

수학식 1

$$y_k = (h_{I,k} \Theta h_{T,I}) \sqrt{P_t} x + z_k, \quad k \in \{1, \dots, K\}$$

여기서, $\Theta = \text{diag}(\boldsymbol{\vartheta}) = \text{diag}(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_n}, \dots, e^{j\theta_N}) \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 이고, vector $\boldsymbol{\vartheta} \in \mathbb{C}^{N \times 1} = [\beta_1 e^{j\theta_1}, \dots, \beta_N e^{j\theta_N}]^T$ 이며, 여기서, $\beta_n = (0, 1]$, $\theta_n = (0, 2\pi]$ 이나, 크기

(amplitude) 제어는 하지 않으므로, $\beta = 1$ 로 고정된다. 한편, z_k 는 평균 0이며, 분산 σ^2 인 CSCG(circularly symmetric complex gaussian)로 모델링된 k 번째 Rx 단말(130)의 AWGN(additive white Gaussian noise)을 나타낸다.

IRS 위상 시프트 조정 전에, Tx 단말(110), IRS(120) 및 Rx 단말(130) 사이에 캐스케이드 채널을 도입하며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} g_k &= h_{I,k} \text{diag}(h_{T,I}) \in \mathbb{C}^{1 \times N} \\ [g_k^1, \dots, g_k^N] &= [h_{1,k}, \dots, h_{N,k}] \begin{bmatrix} h_{T,1} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & h_{T,N} \end{bmatrix} = [h_{1,k} h_{T,1}, \dots, h_{N,k} h_{T,N}] \in \mathbb{C}^{1 \times N} \end{aligned}$$

여기서, g_k^n 는 복소수이며, 그 위상은 $\angle(g_k^n) = \phi_k^n$ 로 표현된다.

이로부터, Tx 단말(110)로부터 IRS(120)를 거쳐 k 번째 Rx 단말(130)이 수신한 신호는 하기 [수학식 2]와 같이

표현된다. 그리고, 하기 [수학식 2]의 수신 신호 전력의 평균을 취하면, 하기 [수학식 3]과 같이 정리된다.

수학식 2

$$y_k = (g_k \vartheta) \sqrt{P_t} x + z_k, \quad k \in \{1, \dots, K\}$$

수학식 3

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[|y_k|^2] &= \mathbb{E}\left[|(g_k \vartheta) \sqrt{P_t} x + z_k|^2\right] = \mathbb{E}\left[|(g_k \vartheta) \sqrt{P_t} x|^2 + 2z_k (g_k \vartheta) \sqrt{P_t} x + |z_k|^2\right] \\ &= \mathbb{E}\left[|(g_k \vartheta) \sqrt{P_t} x|^2 + |z_k|^2\right] = \mathbb{E}[|g_k \vartheta|^2 + |z_k|^2] \end{aligned}$$

이때, 심볼 길이 동안 평균을 취하면 다음과 같이 정리된다.

$$|g_k \vartheta|^2 + \sigma^2$$

$$\begin{aligned} P_t &= 1 \\ \mathbb{E}[|x|^2] &= 1 \end{aligned}$$

이 때, 신호 전력과 잡음이 분리되므로, k 번째 Rx 단말(130)에 대한 신호 전력은 다음과 같이 정의된다:

$|g_k \vartheta|^2$. 이로부터, K 개의 Rx 단말(130)들에 대한 신호 전력 합계는 다음과 같이 정의된다:

$\sum_{k=1}^K |g_k \vartheta|^2$. IRS(120)의 수동 소자들의 수가 N 개이고, Rx 단말(130)들의 수가 K 개일 때, 신호 전력 합계를 벡터로 변환하면, 다음과 같이 정리된다:

$$\sum_{k=1}^K \left| \sum_{n=1}^N g_k^n e^{j\theta_n} \right|^2 = \sum_{k=1}^K \left| g_k^1 e^{j\theta_1} + g_k^2 e^{j\theta_2} + \dots + g_k^N e^{j\theta_N} \right|^2$$

이러한

$$\max_{\Theta} \sum_{k=1}^K |h_{I,k} \Theta h_{T,I}|^2$$

경우, 모든 Rx 단말(130)들에 대한 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다:

(여기

서, 최적화하고자 하는 변수는 $N \times N$ 대각 행렬 Θ 임). 이러한 최적화 문제는, ϑ , g_k 를 도입하면, 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\max_{\vartheta} \sum_{k=1}^K |g_k \vartheta|^2$$

$$s. t. |\vartheta_n| = 1, \forall n = 1, \dots, N$$

이 때, 연속(continuous) 위상을 갖는 경우, 최적 위상을 구하는 것은 어렵다. 따라서, IRS(120)의 각 수동 소자의 위상이 다음과 같이 불연속(discrete)한 값을 갖는 경우를 가정한다: $\mathcal{F}_{\vartheta} = \{0, \Delta\theta, \dots, (2^{b_{\beta}} - 1)\Delta\theta\}$.

여기서, b_{β} 는 위상 편이를 제어하기 위한 비트 수를 나타내고, $\Delta\theta = \frac{2\pi}{2^{b_{\beta}}}$ 이다. 이 경우에도, 최적 위상 제어는 모든 이산 위상 편이 값들의 조합을 풀 서치(full search)하여 구한다. 풀 서치는 지수적인 복잡도를

가지며, IRS(120)의 수동 소자들의 수, 즉 N과 Rx 단말(130)들의 수, 즉 K에 따라서 기하급수적으로 늘어난다. 복잡도는 다음과 같이 나타낼 수 있다: $O(K \cdot 2^{b\beta \cdot N})$.

[0028] $\max_{\boldsymbol{\theta}} |g_1 \boldsymbol{\theta}|^2$
K=1이고 N>1인 경우, 최적화 문제는 다음과 같다: . 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\max_{\theta_1, \dots, \theta_N} \{|g_1^1 e^{j\theta_1} + \dots + g_1^N e^{j\theta_N}|^2\}$$

$$\max_{\theta_1, \dots, \theta_N} \{| |g_1^1| e^{j(\theta_1 + \phi_1^1)} + \dots + |g_1^N| e^{j(\theta_N + \phi_1^N)} |^2\}$$

[0029]

[0030] 이 때, K=1이고 N>1인 경우, 신호 전력을 최대화하는 최적 해는 각 항의 위상을 $2\pi n$ 이 되도록 하는 것이다. 따라서, 신호 전력을 최대화 하는 최적 위상은 다음과 같이 구해진다: $\theta_n^* = \text{mod}[-\phi_1^n, 2\pi]$. 이로써, K=1이고 N>1인 경우, 최적화 문제는 다음과 같이 구해진다.

$$\max_{\boldsymbol{\theta}} |g_1 \boldsymbol{\theta}|^2 = \left| |g_1^1| + \dots + |g_1^N| \right|^2$$

[0031]

[0032] 한편, K>1이고 N=1인 경우, 최적화 문제는 다음과 같다:

$$\max_{\theta_1} \sum_{k=1}^K |g_k^1 e^{j\theta_1}|^2 = \max_{\theta_1} \sum_{k=1}^K |g_k^1|^2$$

. 이 경우, 최적 해는 위상이 들어가지도 $|g_k^1|^2$ 과 동일하기 때문에, 위상 시프트할 필요가 없다.

[0033] 한편, N=2, K>1인 경우, K 개의 Rx 단말(130)들의 수신 신호 전력 합을 최대화하는 최적화 문제는 다음과 같다:

$$\max_{\boldsymbol{\theta}} \sum_{k=1}^K |g_k \boldsymbol{\theta}|^2$$

. 이는 크기가 1 X 2인 벡터 $\mathbf{g}_k$ 와 벡터 $\boldsymbol{\theta}$ 의 곱을 기반으로 한다. 이러한 최적화

$$\max_{\theta_1, \theta_2} \sum_{k=1}^K |g_k^1 e^{j\theta_1} + g_k^2 e^{j\theta_2}|^2$$

문제를 전개하면, 다음과 같다: . 이를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$g_k^1 e^{j\theta_1} + g_k^2 e^{j\theta_2} = |g_k^1| e^{j(\theta_1 + \phi_k^1)} + |g_k^2| e^{j(\theta_2 + \phi_k^2)}$$

$$= e^{j(\theta_1 + \phi_k^1)} \{ |g_k^1| + |g_k^2| e^{j(\theta_2 - \theta_1 + \phi_k^2 - \phi_k^1)} \}$$

[0034]

[0035] 이는, 일반성을 잃지 않고, $\theta_1 = 0$ 이라고 하면, 다음과 같이 표현된다.

$$|g_k^1 e^{j\theta_1} + g_k^2 e^{j\theta_2}| = \left| |g_k^1| + |g_k^2| e^{j(\theta_2 - \delta_k^1)} \right|$$

[0036]

[0037] 여기서, δ_k^1 는 k 번째 Rx 단말(130)에 대해 1 번째 수동 소자와 2 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널 위상 차이($\phi_k^1 - \phi_k^2$)를 나타낸다.

[0038] 이로써, N=2, K>1인 경우, 최적화 문제는 하기 [수학식 4]와 같이 정리된다.

수학식 4

$$\max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K \left| |g_k^1| + |g_k^2| e^{j(\theta_2 - \delta_k^1)} \right|^2$$

[0039]

[0040] 상기 [수학식 4]에 대해 오일러 방정식을 활용하여 다시 정리하면, 하기 [수학식 5]와 같다.

수학식 5

$$\begin{aligned} \max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K \left| |g_k^1| + |g_k^2| e^{j(\theta_2 - \delta_k^1)} \right|^2 \\ = \max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K (|g_k^1| + |g_k^2| \cos(\theta_2 - \delta_k^1))^2 + |g_k^2|^2 \sin^2(\theta_2 - \delta_k^1) \\ = \max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K 2|g_k^1||g_k^2| \cos(\theta_2 - \delta_k^1) + |g_k^2|^2 + |g_k^1|^2 \end{aligned}$$

[0041]

[0042] 상기 [수학식 5]에서 θ_2 가 있는 항에 대해 최대 값을 찾기 때문에, 상수 항을 제외하여 다시 정리하면, 하기 [수학식 6]과 같다.

수학식 6

$$\max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K |g_k^1||g_k^2| \cos(\theta_2 - \delta_k^1) = \max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\theta_2 - \delta_k^1)$$

[0043]

[0044] 여기서, 수식의 간단화를 위해, $\alpha_k^1 = |g_k^1||g_k^2|$ 로 기재된다.

[0045] 상기 [수학식 6]을 삼각 함수의 합 공식 $\cos(\theta - \delta) = \cos(\theta) \cos(\delta) + \sin(\theta) \sin(\delta)$ 으로 다시 정리하면, 하기 [수학식 7]과 같다.

수학식 7

$$\begin{aligned}\sum_{k=1}^K \alpha_k \cos(\theta_2 - \delta_k^1) &= \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \{ \cos(\delta_k^1) \cos(\theta_2) + \sin(\delta_k^1) \sin(\theta_2) \} \\ &= \cos(\theta_2) \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) + \sin(\theta_2) \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1)\end{aligned}$$

[0046]

[0047] 오일러 공식을 사용하여, 상기 [수학식 7]을 정리하면, 하기 [수학식 8]과 같다.

수학식 8

$$\begin{aligned}& \cos(\theta_2) \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) + \sin(\theta_2) \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1) \\ &= \cos(\theta_2) \left\{ \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_k^1 e^{j\delta_k^1} + \alpha_k^1 e^{-j\delta_k^1}}{2} \right\} + \sin(\theta_2) \left\{ \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_k^1 e^{j\delta_k^1} - \alpha_k^1 e^{-j\delta_k^1}}{2j} \right\} \\ &= \cos(\theta_2) \left\{ \frac{\alpha_1^1 e^{j\delta_1^1} + \alpha_1^1 e^{-j\delta_1^1}}{2} + \dots + \frac{\alpha_K^1 e^{j\delta_K^1} + \alpha_K^1 e^{-j\delta_K^1}}{2} \right\} + \sin(\theta_2) \left\{ \frac{\alpha_1^1 e^{j\delta_1^1} - \alpha_1^1 e^{-j\delta_1^1}}{2j} + \dots + \frac{\alpha_K^1 e^{j\delta_K^1} - \alpha_K^1 e^{-j\delta_K^1}}{2j} \right\} \\ &= \cos(\theta_2) \left\{ \frac{(\alpha_1^1 e^{j\delta_1^1} + \dots + \alpha_K^1 e^{j\delta_K^1}) + (\alpha_1^1 e^{-j\delta_1^1} + \dots + \alpha_K^1 e^{-j\delta_K^1})}{2} \right\} + \sin(\theta_2) \left\{ \frac{(\alpha_1^1 e^{j\delta_1^1} + \dots + \alpha_K^1 e^{j\delta_K^1}) - (\alpha_1^1 e^{-j\delta_1^1} + \dots + \alpha_K^1 e^{-j\delta_K^1})}{2j} \right\}\end{aligned}$$

[0048]

[0049] 이 때, K 개의 복소수의 합은 하나의 복소수로 나타낼 수 있으며, 다음과 같이 표현된다:
 $\alpha_1^1 e^{j\delta_1^1} + \dots + \alpha_K^1 e^{j\delta_K^1} = \alpha e^{j\delta}$ 및 $\alpha_1^1 e^{-j\delta_1^1} + \dots + \alpha_K^1 e^{-j\delta_K^1} = \alpha e^{-j\delta}$. 이를 상기 [수학식 8]에 적용하고, 오일러 공식과 삼각 함수의 합 공식을 사용하여 정리하면, 다음과 같다.

[0050]

$$\cos(\theta_2) \left\{ \frac{\alpha e^{j\delta} + \alpha e^{-j\delta}}{2} \right\} + \sin(\theta_2) \left\{ \frac{\alpha e^{j\delta} - \alpha e^{-j\delta}}{2j} \right\} = \cos(\theta_2) \{ \alpha \cos(\delta) \} + \sin(\theta_2) \{ \alpha \sin(\delta) \} = \alpha \cos(\theta_2 - \delta)$$

[0051]

이로써, 상기 [수학식 7]은 하기 [수학식 9]와 같은 관계식으로 정리된다.

수학식 9

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\theta_2 - \delta_k^1) = \alpha \cos(\theta - \delta)$$

[0052]

[0053] 상기 [수학식 7] 및 [수학식 9]로부터, 하기 [수학식 10] 및 [수학식 11]이 구해진다.

수학식 10

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) = \{ \alpha \cos(\delta) \}$$

[0054]

수학식 11

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1) = \{ \alpha \sin(\delta) \}$$

[0055]

[0056] 상기 [수학식 9]의 최대 값은 $\theta_2 - \delta = 0$ 을 만족하는 경우이다. 따라서, 이 경우는, 하기 [수학식 12]와 같이 정리된다.

수학식 12

$$\begin{aligned}\theta_2 &= \delta = \tan^{-1}(\tan(\delta)) = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\delta)}{\cos(\delta)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha \sin(\delta)}{\alpha \cos(\delta)}\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1)}\right)\end{aligned}$$

[0057]

[0058] 최적 위상의 최적화 값의 범위는 $(0, 2\pi]$ 이지만, 아크 탄젠트의 범위는 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 로 한정적이므로, 서브-최적 위상의 최적화 값의 범위를 커버하기 위해 상기 [수학식 12]를 사용해 4사분면 역 탄젠트(four-quadrant inverse tangent)로 나타내면 다음과 같다.

$$\theta_2^* = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1)}\right) & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) > 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1)}\right) + \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1) \geq 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1)}\right) - \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1) \leq 0 \end{cases}$$

[0059]

[0060] 이러한 방식을 $N > 1$ 이고 $K > 1$ 인 경우로 확장함으로써, 최적 해를 찾는 것의 어려움을 완화하기 위한 저 복잡도를 갖는 부 최적화 해, 즉 차선 해를 찾는 방안을 제시한다. 이 때, IRS 시스템(100)에 대해, 네 가지의 가정들이 이루어진다. 첫 번째는, 복수의 Rx 단말(130)들에 대해 FDMA 방식으로 전송이 이루어진다는 것이다. 두 번째는, 각각의 사용자에 대한 최적 IRS 위상 제어는 불가능하다는 것이다. 세 번째는, FDMA 방식이므로, Rx 단말(130)들 간 간섭은 없다는 것이다. 네 번째는, IRS(120)는 각 Rx 단말(130)의 SNR의 합을 최대로 하는 단일 위상 값으로 제어된다는 것이다. 이러한 가정들 하에, 저 복잡도를 갖는 부 최적화 해, 즉 차선 해가 구해진다. 이를 위해, IRS 시스템(100)은 IRS(120)를 제어하기 위한 적어도 하나의 프로세서(도시되지 않음)를 더 포함할 수 있다. 이 때, 프로세서는 IRS(120)에 결합되어 구현될 수 있으며, IRS(120)와 별도로 구현되어, IRS(120)에 통신 가능하게 연결될 수 있다.

[0061] 도 2는 다양한 실시예들에 따른 IRS 시스템(100)의 IRS 위상 제어 방법을 개략적으로 도시하는 도면이다. 도 3은 다양한 실시예들에 따른 IRS 시스템(100)의 동작 알고리즘을 나타내는 도면이다.

[0062] 도 2를 참조하면, IRS 시스템(100)은 210 단계에서, 수동 소자의 수 N , Rx 단말(130)의 수 K , 및 모든 단말에 대한 수신 신호 합 벡터는 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널로 초기화한다. 그리고, IRS 시스템(100)은 220 단계에서, $n = 2$ 을 결정한다. 즉, 프로세서가 N 개의 수동 소자들 중에서 2 번째 수동 소자를 결정한다. IRS 시스템(100)은 230 단계에서, IRS(120)의 n 번째 수동 소자의 위상 제어를 실행한다. 즉, $n = 2$ 이므로, 프로세서는 2 번째 수동 소자의 위상 제어를 실행한다.

[0063] 다음으로, IRS 시스템(100)은 240 단계에서, $k = 1$ 을 결정한다. 즉, 프로세서가 K 개의 Rx 단말(130)들 중에서 1 번째 Rx 단말(130)의 1부터 $n-1$ 번째까지 수동 소자의 수신 신호 합 벡터와 n 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널의 크기 곱과 위상 차이 계산을 한다. IRS 시스템(100)은 250 단계에서 IRS(120)의 k 번째 Rx 단말(130)에 대해 크기, 위상을 계산한다. 즉, $k = 1$ 이므로, 프로세서는 1 번째 Rx 단말(130)에 대해 크기, 위상을 계산한다. 이 후, IRS 시스템(100)은 260 단계에서 1부터 $n-1$ 번째까지 수동 소자의 수신 신호 합 벡터와 n 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널의 크기 곱과 위상 차이 계산을 한다.

[0064] 다음으로, IRS 시스템(100)은 270 단계에서, k 이 K 에 도달했는 지의 여부를 판단한다. 즉, 프로세서는 1 번째

Rx 단말(130)부터 K 번째 Rx 단말(130)까지 모든 Rx 단말(130)들에 대한 크기와 위상이 계산이 이루어졌는 지의 여부를 판단한다. 이 때, k가 K에 도달하지 않고, K보다 작은 것으로 판단되면, IRS 시스템(100)은 280 단계에서 k를 1만큼 증가시킨다. 즉, 프로세서는 $k = k+1$ 로 변경한다. 이 후, IRS 시스템(100)은 250 단계로 복귀한다. 이러한 방식으로, IRS 시스템(100)은 k가 K에 도달할 때까지 250단계 내지 260단계를 반복한다.

[0065] 다음으로, IRS 시스템(100)은 290 단계에서, 상기 단계에서 구한 1부터 n-1 번째까지 수동 소자의 수신 신호 합 벡터와 n 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널의 크기 곱과 위상 차이로부터 1 번째 내지 (n-1) 번째 수동 소자들의 위상 제어에 의해 형성되는 합성 신호를 기준으로, n 번째 수동 소자의 위상 제어를 실행한다. 즉, 프로세서는 복수의 이전 수동 소자들의 위상 제어에 의해 형성되는 합성 신호를 기준으로, 현재 수동 소자의 위상 제어를 실행한다. 이 후, IRS 시스템(100)은 300 단계에서 n 번째 수동 소자까지 구해진 위상 값이 적용된 수신 신호의 합 벡터를 결정한다.

[0066] 다음으로, IRS 시스템(100)은 310 단계에서 n이 N에 도달했는 지의 여부를 판단한다. 즉, 프로세서는 1 번째 수동 소자부터 N 번째 수동 소자까지 모든 수동 소자들에 대해 위상 제어가 이루어졌는 지의 여부를 판단한다. 이 때, n이 N에 도달하지 않고, N보다 작은 것으로 판단되면, IRS 시스템(100)은 320 단계에서 n를 1만큼 증가시킨다. 즉, 프로세서는 $n = n+1$ 로 변경한다. 이 후, IRS 시스템(100)은 230 단계로 복귀한다. 이러한 방식으로, IRS 시스템(100)은 n이 N에 도달할 때까지 230 단계 내지 300 단계를 반복한다.

[0067] 구체적으로, $n = 2$ 인 경우, IRS 시스템(100)은 1 번째 수동 소자의 위상 제어에 의해 형성되는 신호를 기준으로, 2 번째 수동 소자의 위상 제어를 실행한다. 이를 통해, 1 번째 수동 소자와 2 번째 수동 소자에 대한

$$\max_{\theta_1, \theta_2} \sum_{k=1}^K |g_k^1 e^{j\theta_1} + g_k^2 e^{j\theta_2}|^2$$

최적화 문제가 다음과 같이 정리된다:
다음과 같다.

. 이를 다시 정리하면,

$$\begin{aligned} g_k^1 e^{j\theta_1} + g_k^2 e^{j\theta_2} &= |g_k^1| e^{j(\theta_1 + \phi_k^1)} + |g_k^2| e^{j(\theta_2 + \phi_k^2)} \\ &= |g_k^1| e^{j(\theta_1 + \phi_k^1)} \left\{ |g_k^1| + |g_k^2| e^{j(\theta_2 - \theta_1 + \phi_k^2 - \phi_k^1)} \right\} \end{aligned}$$

[0068]
[0069] 이는, 일반성을 잃지 않고, $\theta_1 = 0$ 이라고 하면, 다음과 같이 표현된다.

$$|g_k^1 e^{j\theta_1} + g_k^2 e^{j\theta_2}| = \left| |g_k^1| + |g_k^2| e^{j(\theta_2 - \delta_k^1)} \right|$$

[0070]
[0071] 여기서, δ_k 는 k 번째 Rx 단말(130)에 대해 1 번째 수동 소자와 2 번째 수동 소자의 채널 위상 차이 ($\phi_k^1 - \phi_k^2$)를 나타낸다.

[0072] 따라서, 1 번째 수동 소자를 기준으로 2 번째 수동 소자에 대한 최적화 문제를 벡터의 합으로 정리하면, 하기 [수학식 13]과 같다.

수학식 13

$$\max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K \left| |g_k^1| + |g_k^2| e^{j(\theta_2 - \delta_k^1)} \right|^2$$

[0073]
[0074] 상기 [수학식 13]에 대해 오일러 방정식을 활용하여 다시 정리하면, 하기 [수학식 14]와 같다.

수학식 14

$$\begin{aligned} & \max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K \left| |g_k^1| + |g_k^2| e^{j(\theta_2 - \delta_k^1)} \right|^2 \\ &= \max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K \left(|g_k^1| + |g_k^2| \cos(\theta_2 - \delta_k^1) \right)^2 + |g_k^2|^2 \sin^2(\theta_2 - \delta_k^1) \\ &= \max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K 2 |g_k^1| |g_k^2| \cos(\theta_2 - \delta_k^1) + |g_k^2|^2 + |g_k^1|^2 \end{aligned}$$

[0075]

[0076] 상기 [수학식 14]에서 θ_2 가 있는 항에 대해 최대 값을 찾기 때문에, 상수 항을 제외하여 다시 정리하면, 하기 [수학식 15]와 같다.

수학식 15

$$\max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K |g_k^1| |g_k^2| \cos(\theta_2 - \delta_k^1) = \max_{\theta_2} \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\theta_2 - \delta_k^1)$$

[0077]

[0078] 여기서, 수식의 간단화를 위해, $\alpha_k^1 = |g_k^1| |g_k^2|$ 로 기재되며, 이는 k 번째 단말에 1 번째 수동 소자와 2 번째 수동 소자의 채널 크기들의 곱을 나타낸다.

[0079] 상기 [수학식 15]를 삼각 함수의 합 공식 $\cos(\theta - \delta) = \cos(\theta) \cos(\delta) + \sin(\theta) \sin(\delta)$ 으로 다시 정리하면, 하기 [수학식 16]과 같다.

수학식 16

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \alpha_k \cos(\theta_2 - \delta_k^1) &= \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \{ \cos(\delta_k^1) \cos(\theta_2) + \sin(\delta_k^1) \sin(\theta_2) \} \\ &= \cos(\theta_2) \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) + \sin(\theta_2) \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1) \end{aligned}$$

[0080]

[0081] 오일러 공식을 사용하여, 상기 [수학식 16]을 정리하면, 하기 [수학식 17]과 같다.

수학식 17

$$\begin{aligned} \cos(\theta_2) \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) + \sin(\theta_2) \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1) \\ = \cos(\theta_2) \{ \alpha \cos(\delta) \} + \sin(\theta_2) \{ \alpha \sin(\delta) \} = \alpha \cos(\theta - \delta) \end{aligned}$$

[0082]

[0083] 이로써, 상기 [수학식 16]은 하기 [수학식 18]과 같은 관계식으로 정리된다.

수학식 18

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\theta_2 - \delta_k^1) = \alpha \cos(\theta - \delta)$$

상기 [수학식 16] 및 [수학식 18]로부터, 하기 [수학식 19] 및 [수학식 20]이 구해진다.

수학식 19

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) = \{\alpha \cos(\delta)\}$$

수학식 20

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1) = \{\alpha \sin(\delta)\}$$

상기 [수학식 18]의 최대 값은 $\theta_2 - \delta = 0$ 을 만족하는 경우이다. 따라서, 이 경우는, 하기 [수학식 21]과 같이 정리된다.

수학식 21

$$\begin{aligned} \theta_2 = \delta &= \tan^{-1}(\tan(\delta)) = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\delta)}{\cos(\delta)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha \sin(\delta)}{\alpha \cos(\delta)}\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1)}\right) \end{aligned}$$

따라서, 2 번째 수동 소자에 대한 최적 해는 하기 [수학식 22]와 같다.

수학식 22

$$\theta_2^* = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1)}\right) & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) > 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1)}\right) + \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1) \geq 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1)}\right) - \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \cos(\delta_k^1) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^1 \sin(\delta_k^1) \leq 0 \end{cases}$$

또한, n=3인 경우, IRS 시스템(100)은 1 번째 수동 소자와 2 번째 수동 소자의 위상 제어에 의해 형성되는 합성 신호를 기준으로, 3 번째 수동 소자의 위상 제어를 실행한다. 이를 위해, 1 번째 수동 소자와 2 번째 수동 소자의 위상 값들이 적용된 Rx 단말(130)의 수신 신호가 하기 [수학식 23]과 같이 계산된다.

수학식 23

$$\tilde{y}_{k,2} = |g_k^1| + |g_k^2|e^{j(\theta_2^* - \delta_k^1)}$$

여기서, δ_k^1 는 k 번째 Rx 단말(130)에 대해 1 번째 수동 소자와 2 번째 수동 소자의 채널 위상 차이 ($\phi_k^1 - \phi_k^2$)를 나타낸다.

상기 [수학식 23]의 1 번째 수동 소자와 2 번째 수동 소자에 따른 수신 신호를 기준으로 3 번째 수동 소자에 대한 최적화 문제를 벡터의 합으로 정리하면, 하기 [수학식 24]와 같다.

수학식 24

$$\max_{\theta_3} \sum_{k=1}^K \left| |\tilde{y}_{k,2}| + |g_k^3|e^{j(\theta_3 - \delta_k^2)} \right|^2$$

여기서, $\delta_k^2 = \angle(\tilde{y}_{k,2}) - \phi_k^3$ 이다.

상기 [수학식 24]에 대해 오일러 방정식을 활용하여 다시 정리하면, 하기 [수학식 25]와 같다.

수학식 25

$$\max_{\theta_3} \sum_{k=1}^K |\tilde{y}_{k,2}| |g_k^3| \cos(\theta_3 - \delta_k^2) = \max_{\theta_3} \sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \cos(\theta_2 - \delta_k^2)$$

여기서, $\alpha_k^2 = |\tilde{y}_{k,2}| |g_k^3|$ 이다.

이 때, 상기 [수학식 25]는 상기 [수학식 15]와 동일한 형태를 가지므로, 세 번째 수동 소자에 대한 최적 해는 하기 [수학식 26]과 같다.

수학식 26

$$\theta_3^* = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \sin(\delta_k^2)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \cos(\delta_k^2)} \right) & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \cos(\delta_k^2) > 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \sin(\delta_k^2)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \cos(\delta_k^2)} \right) + \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \cos(\delta_k^2) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \sin(\delta_k^2) \geq 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \sin(\delta_k^2)}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \cos(\delta_k^2)} \right) - \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \cos(\delta_k^2) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^2 \sin(\delta_k^2) \leq 0 \end{cases}$$

이러한 방식으로, IRS 시스템(100)은 N 번째 수동 소자까지의 위상 제어를 실행한다. 이 때, α_k^{n-1} 및 δ_k^{n-1} 는 k 번째 Rx 단말에 대한 1부터 n-1 번째까지 수동 소자의 수신 신호 합 벡터와 n 번째 수동 소자의

캐스케이드 채널의 크기 곱과 위상 차이이다. 즉, n 번째 수동 소자에 대한 최적 해는 하기 [수학식 27]과 같다.

수학식 27

$$\theta_n^* = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) > 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) + \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1}) \geq 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) - \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \end{cases}$$

전술된 IRS 위상 제어 방법을 수행하는 IRS 시스템(100)은 도 3과 같은 동작 알고리즘에 따라 동작한다. 즉, IRS 시스템(100)은 1 번째 수동 소자의 신호에 대해 2 번째 수동 소자부터 N 번째 수동 소자까지 순차적으로 신호들을 정렬하면서, k 번째 Rx 단말(130)에 대한 수신 신호의 합 벡터를 계산한다.

본 개시에서 사용된 변수는 하기 [표 1]과 같이 정리된다.

표 1

variable name	objective
$h_{I,k} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$	IRS와 k 번째 Rx 단말 사이의 채널 행렬
$h_{T,I} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$	Tx 단말과 IRS사이의 채널 행렬
g_k^n	n 번째 수동 소자와 k 번째 Rx 단말 사이의 채널 벡터, 및 Tx 단말과 n 번째 수동 소자 사이의 채널 벡터의 곱
ϕ_k^n	n 번째 수동 소자와 k 번째 Rx 단말 사이의 채널 벡터, 및 Tx 단말과 n 번째 수동 소자 사이의 채널 벡터의 위상
$\tilde{y}_{k,n-1}$	k 번째 Rx 단말에 대해 1 번째 내지 (n-1) 번째 수동 소자들의 위상 값들이 적용된 수신 신호의 합 벡터
δ_k^{n-1}	1 번째 수동 소자에서 (n-1) 번째 수동 소자까지의 위상 값들이 적용된 수신 신호의 합 벡터와 n 번째 채널 벡터의 위상 차이
α_k^{n-1}	1 번째 수동 소자에서 (n-1) 번째 수동 소자까지의 위상 값들이 적용된 수신 신호의 합 벡터와 n 번째 채널 벡터의 크기 곱
Θ	IRS 위상 편이 계수 크기가 N X N인 대각 행렬
θ	Θ 의 대각원소를 원소로 갖는 크기가 N X 1인 벡터
β_n	n번째 수동 소자의 크기
θ_n	n번째 수동 소자의 위상
θ_n^*	n번째 수동 소자의 최적 위상

도 4는 다양한 실시예들에 따른 IRS 시스템(100)의 IRS 위상 제어 방법의 성능을 설명하기 위한 도면들이다. 여기서, 도 4의 (a)는 IRS(120)의 수동 소자들의 수가 최대 25 개인 경우를 나타내고, 도 4의 (b)는 IRS(120)의 수동 소자들의 수가 최대 1000 개인 경우를 나타낸다.

도 4를 참조하면, Rx 단말(130)들의 수가 2일 때, 본 개시에서 제안된 방식, 즉 부 최선 해를 구하는 방식(sub-optimal phase control), 기존의 최선 해를 구하는 방식(예: 1-bit phase control), 및 랜덤으로 선택하는 방식(random phase control)의 IRS(120)의 수동 소자들의 수에 따른 SNR가 도시되어 있다. 도 4의 (a)에 도시된 바에 따르면, 본 개시에서 제안된 방식, 최선 해를 구하는 방식, 및 랜덤으로 선택하는 방식의 수동 소자 20개에 대한 SNR는 각각 18.3 dB, 16.3 dB, 및 7.1 dB이다. 이는, 본 개시에서 제안된 방식이 랜덤으로 선택하는 방식뿐 아니라 최선해를 구하는 방식보다도 우수한 성능을 가짐을 나타낸다. 도 4의 (b)에 도시된 바에 따르면, IRS(120)의 수동 소자들의 수가 충분히 큰 경우, 본 개시에서 제안된 방식은 보다 현저하게 우수한 성능을 갖는다.

다.

- [0111] 요컨대, 본 개시는 계산 복잡도가 저감된 지능형 반사 표면 위상 제어 방법 및 그를 위한 통신 시스템, 즉 IRS 시스템(100)을 제공한다.
- [0112] 본 개시에 따른 IRS 시스템(100)의 방법은, IRS(120)의 복수의 수동 소자들 중 하나인 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널을 결정하는 단계(210 단계 및 220 단계), 및 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널에 의해 형성되는 신호를 기준으로 복수의 수동 소자들 중 나머지에 대해 순차적으로 위상 제어를 실행하는 단계(230 단계, 240 단계 및 250 단계)를 포함한다.
- [0113] 다양한 실시예들에 따르면, 복수의 수동 소자들 중 나머지의 위상 제어를 순차적으로 실행하는 단계(230 단계, 240 단계 및 250 단계)는, 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널에 의해 형성되는 신호를 기준으로 2 번째 수동 소자의 위상 제어를 실행하는 단계, 및 1 번째 수동 소자와 2 번째 수동 소자를 포함하는 복수의 이전 수동 소자들의 위상 제어에 의해 형성되는 합성 신호를 기준으로 현재 수동 소자에 대해 위상 제어를 실행하는 단계를 포함한다.
- [0114] 다양한 실시예들에 따르면, 현재 수동 소자에 대해 위상 제어를 실행하는 단계는, 복수의 수동 소자들 모두에 대해 위상 제어가 실행될 때까지 반복된다.
- [0115] 다양한 실시예들에 따르면, 방법은, FDMA 방식으로 복수의 수신 단말(130)들에 서비스하도록 구현되는 환경에서, 복수의 수신 단말(130)들의 각각을 위해 수행된다.
- [0116] 다양한 실시예들에 따르면, 복수의 수동 소자들은, 복수의 수신 단말(130)들의 각각에 대한 신호 전력의 합을 최대화 하는 위상 값으로 제어된다.
- [0117] 다양한 실시예들에 따르면, 현재 수동 소자의 위상 값은, 하기 수학적식과 같이 정의된다:
- $$\theta_n^* = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) > 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) + \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1}) \geq 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) - \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \end{cases}$$
- 여기서, θ_n^* 는 현재 수동 소자, 즉 n 번째 수동 소자의 위상 값을 나타내고, α_k^{n-1} 는 K 개의 수신 단말(130)들 중 k 번째 수신 단말(130)에 대한 합성 신호의 벡터와 현재 수동 소자의 캐스케이드 채널의 벡터로부터 결정되는 크기(amplitude) 값 나타내며, δ_k^{n-1} 는 합성 신호의 벡터와 현재 수동 소자의 캐스케이드 채널의 벡터의 위상 차이를 나타낸다.
- [0118] 본 개시에 따른 IRS 시스템(100)은 IRS(120)의 위상 제어를 위한 적어도 하나의 프로세서를 포함하고, 적어도 하나의 프로세서는, IRS(120)의 복수의 수동 소자들 중 하나인 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널을 결정고, 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널에 의해 형성되는 신호를 기준으로 복수의 수동 소자들 중 나머지에 대해 순차적으로 위상 제어를 실행하도록 구성된다.
- [0119] 다양한 실시예들에 따르면, 복수의 수동 소자들 중 나머지에 대해 순차적으로 위상 제어를 실행하는 것은, 1 번째 수동 소자의 캐스케이드 채널에 의해 형성되는 신호를 기준으로 2 번째 수동 소자의 위상 제어를 실행하는 것, 및 1 번째 수동 소자와 2 번째 수동 소자를 포함하는 복수의 이전 수동 소자들의 위상 제어에 의해 형성되는 합성 신호를 기준으로 현재 수동 소자에 대해 위상 제어를 실행하는 것을 포함한다.
- [0120] 다양한 실시예들에 따르면, 현재 수동 소자에 대해 위상 제어를 실행하는 것은, 복수의 수동 소자들 모두에 대해 위상 제어가 실행될 때까지 반복된다.
- [0121] 다양한 실시예들에 따르면, IRS 시스템(100)은, FDMA 방식으로 복수의 수신 단말(130)들에 서비스하도록 구현되는 환경에서, 복수의 수신 단말(130)들의 각각을 위해 복수의 수동 소자들에 대해 위상 제어를 실행하도록 구현된다.
- [0122] 다양한 실시예들에 따르면, 복수의 수동 소자들은, 복수의 수신 단말(130)들의 각각에 대한 신호 전력의 합을

최대로 하는 위상 값으로 제어된다.

[0123] 다양한 실시예들에 따르면, 현재 수동 소자의 위상 값은, 하기 수식과 같이 정의된다:

$$\theta_n^* = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) > 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) + \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1}) \geq 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1})}{\sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1})} \right) - \pi & \text{if } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \cos(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \text{ and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^{n-1} \sin(\delta_k^{n-1}) \leq 0 \end{cases}$$

. 여기서, θ_n^* 는 현재 수동

소자, 즉 n 번째 수동 소자의 위상 값을 나타내고, α_k^{n-1} 는 K 개의 수신 단말(130)들 중 k 번째 수신 단말(130)에 대한 합성 신호의 벡터와 현재 수동 소자의 캐스케이드 채널의 벡터로부터 결정되는 크기(amplitude) 값 나타내며, δ_k^{n-1} 는 합성 신호의 벡터와 현재 수동 소자의 캐스케이드 채널의 벡터의 위상 차이를 나타낸다.

[0124] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성 요소, 소프트웨어 구성 요소, 및/또는 하드웨어 구성 요소 및 소프트웨어 구성 요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성 요소는, 프로세서, 컨트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPGA(field programmable gate array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 어플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(processing element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 컨트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(parallel processor)와 같은, 다른 처리 구성(processing configuration)도 가능하다.

[0125] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(computer program), 코드(code), 명령(instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성 요소(component), 물리적 장치, 컴퓨터 저장 매체 또는 장치에 구체화(embodiment)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

[0126] 다양한 실시예들에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 이 때 매체는 컴퓨터로 실행 가능한 프로그램을 계속 저장하거나, 실행 또는 다운로드를 위해 임시 저장하는 것일 수도 있다. 그리고, 매체는 단일 또는 수 개의 하드웨어가 결합된 형태의 다양한 기록수단 또는 저장수단일 수 있는데, 어떤 컴퓨터 시스템에 직접 접속되는 매체에 한정되지 않고, 네트워크 상에 분산 존재하는 것일 수도 있다. 매체의 예시로는, 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체, CD-ROM 및 DVD와 같은 광기록 매체, 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical medium), 및 ROM, RAM, 플래시 메모리 등을 포함하여 프로그램 명령어가 저장되도록 구성된 것이 있을 수 있다. 또한, 다른 매체의 예시로, 어플리케이션을 유통하는 앱 스토어나 기타 다양한 소프트웨어를 공급 내지 유통하는 사이트, 서버 등에서 관리하는 기록매체 내지 저장매체도 들 수 있다.

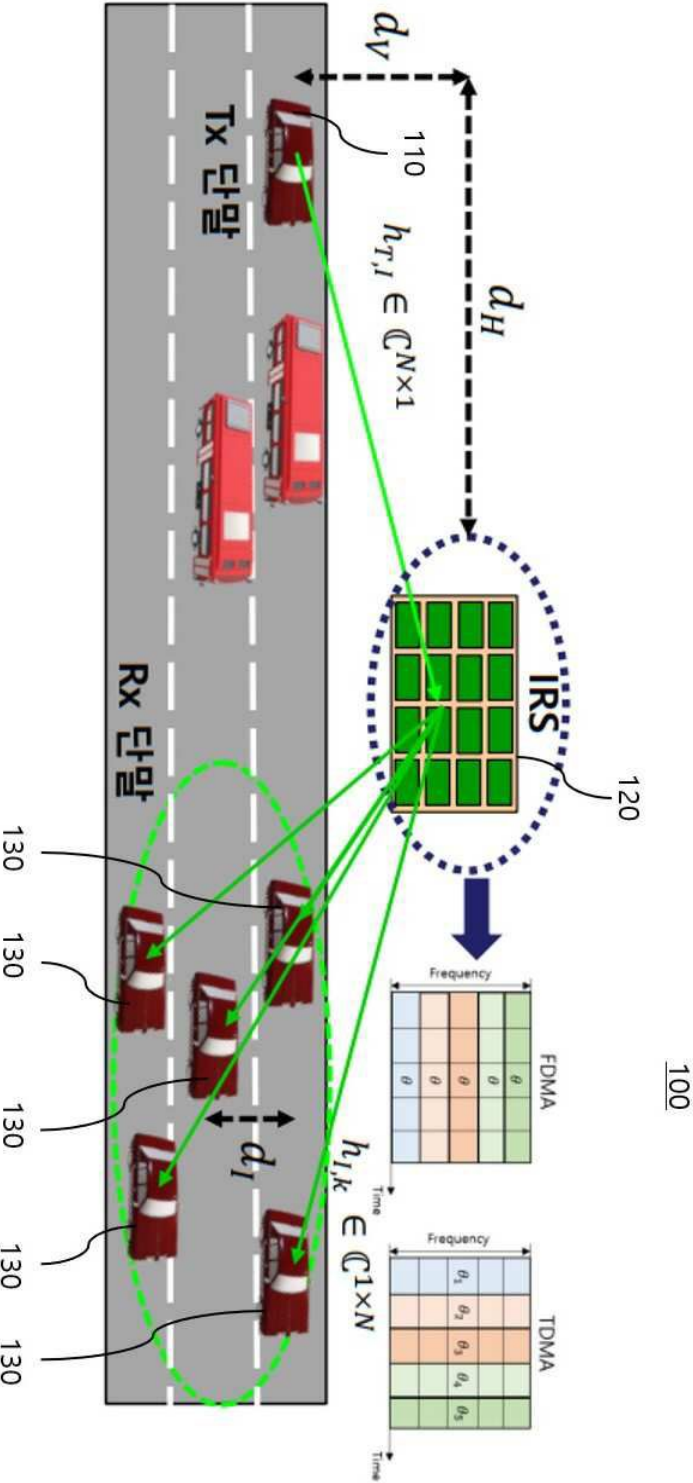
[0127] 본 문서의 다양한 실시예들 및 이에 사용된 용어들은 본 문서에 기재된 기술을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 해당 실시 예의 다양한 변경, 균등물, 및/또는 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 도면의 설명과 관련하여, 유사한 구성 요소에 대해서는 유사한 참조 부호가 사용될 수 있다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함할 수 있다. 본 문서에서, "A 또는 B", "A 및/또는 B 중 적어도 하나", "A, B 또는 C" 또는 "A, B 및/또는 C 중 적어도 하나" 등의 표현은 함께 나열된 항목들의 모든 가능한 조합을 포함할 수 있다. "제 1", "제 2", "첫째" 또는 "둘째" 등의 표현들은 해당 구성 요소들을, 순서 또는 중요도에 상관없이 수식할 수 있고, 한 구성 요소를 다른 구성 요소와 구분하기 위해 사용될 뿐 해당 구성 요소들을 한정하지 않는다. 어떤(예: 제 1) 구성 요소가 다른(예: 제 2) 구성 요소에 "(기능적으로 또는

통신적으로) 연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 상기 어떤 구성 요소가 상기 다른 구성 요소에 직접적으로 연결되거나, 다른 구성 요소(예: 제 3 구성 요소)를 통하여 연결될 수 있다.

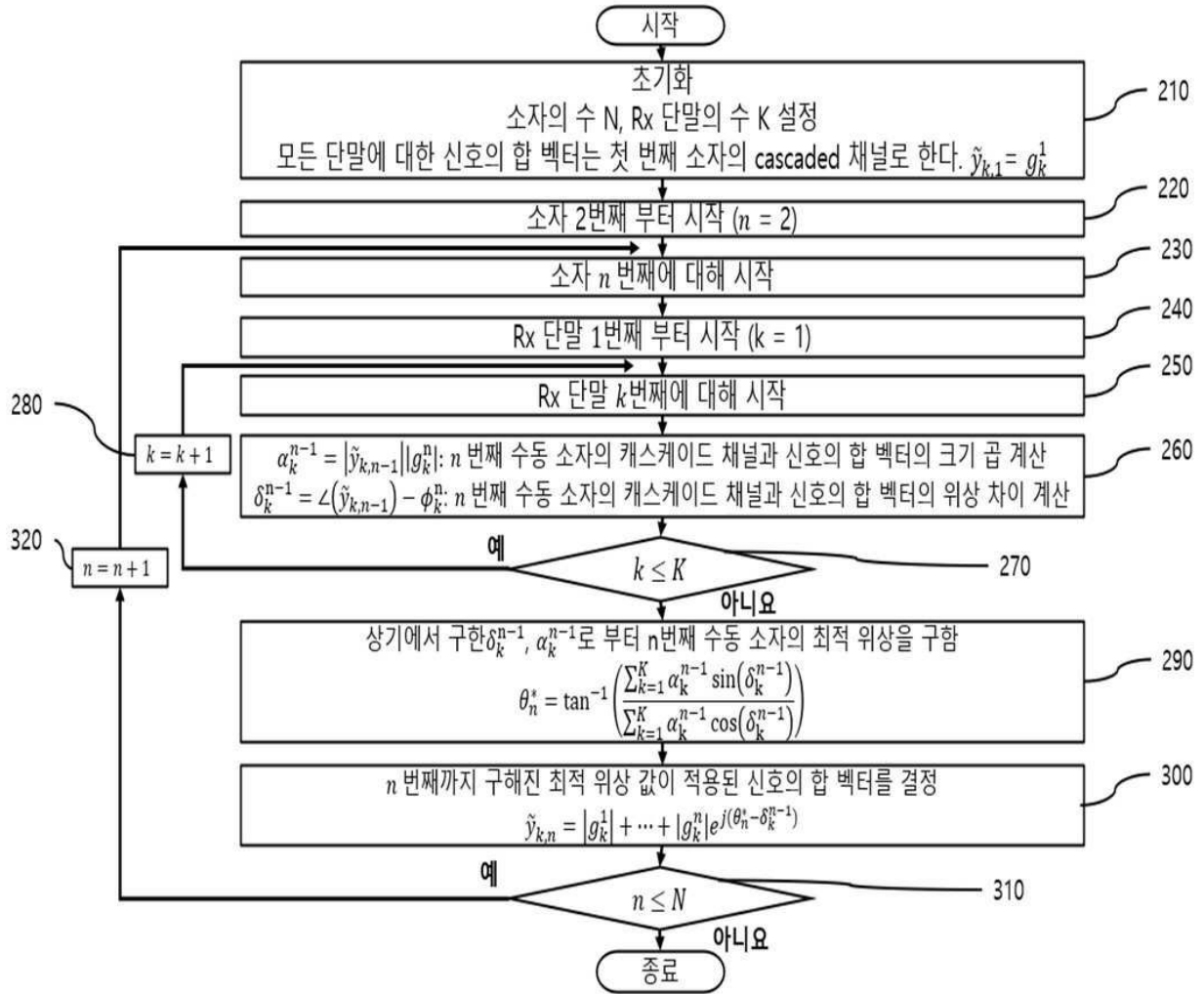
[0128] 다양한 실시예들에 따르면, 기술한 구성 요소들의 각각의 구성 요소(예: 모듈 또는 프로그램)는 단수 또는 복수의 개체를 포함할 수 있다. 다양한 실시예들에 따르면, 기술한 해당 구성 요소들 중 하나 이상의 구성 요소들 또는 단계들이 생략되거나, 또는 하나 이상의 다른 구성 요소들 또는 단계들이 추가될 수 있다. 대체적으로 또는 추가적으로, 복수의 구성 요소들(예: 모듈 또는 프로그램)은 하나의 구성 요소로 통합될 수 있다. 이런 경우, 통합된 구성 요소는 복수의 구성 요소들 각각의 구성 요소의 하나 이상의 기능들을 통합 이전에 복수의 구성 요소들 중 해당 구성 요소에 의해 수행되는 것과 동일 또는 유사하게 수행할 수 있다. 다양한 실시예들에 따르면, 모듈, 프로그램 또는 다른 구성 요소에 의해 수행되는 단계들은 순차적으로, 병렬적으로, 반복적으로, 또는 휴리스틱하게 실행되거나, 단계들 중 하나 이상이 다른 순서로 실행되거나, 생략되거나, 또는 하나 이상의 다른 단계들이 추가될 수 있다.

도면

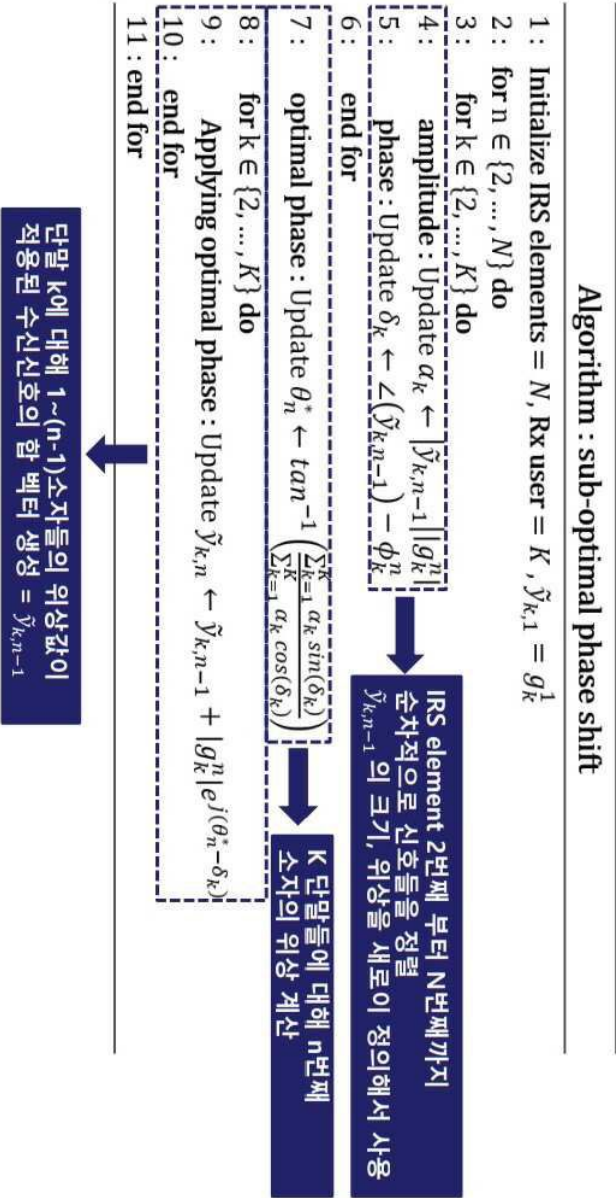
도면1



도면2



도면3



도면4

