



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년03월08일  
(11) 등록번호 10-2224641  
(24) 등록일자 2021년03월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
H04B 7/0413 (2017.01) H04B 7/0456 (2017.01)  
H04L 25/03 (2006.01)  
(52) CPC특허분류  
H04B 7/0413 (2013.01)  
H04B 7/0456 (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2020-0168353  
(22) 출원일자 2020년12월04일  
심사청구일자 2020년12월04일  
(56) 선행기술조사문헌  
비특허문헌 2(IEEE Access, 2020.11.05)  
(뒷면에 계속)

(73) 특허권자  
세종대학교 산학협력단  
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)  
(72) 발명자  
송형규  
경기도 성남시 분당구 중앙공원로 17, 320동 303호(서현동, 시범단지한양아파트)  
유영환  
서울특별시 강남구 선릉로72길 26-16, 401호(대치동)  
(뒷면에 계속)  
(74) 대리인  
특허법인태백

전체 청구항 수 : 총 10 항

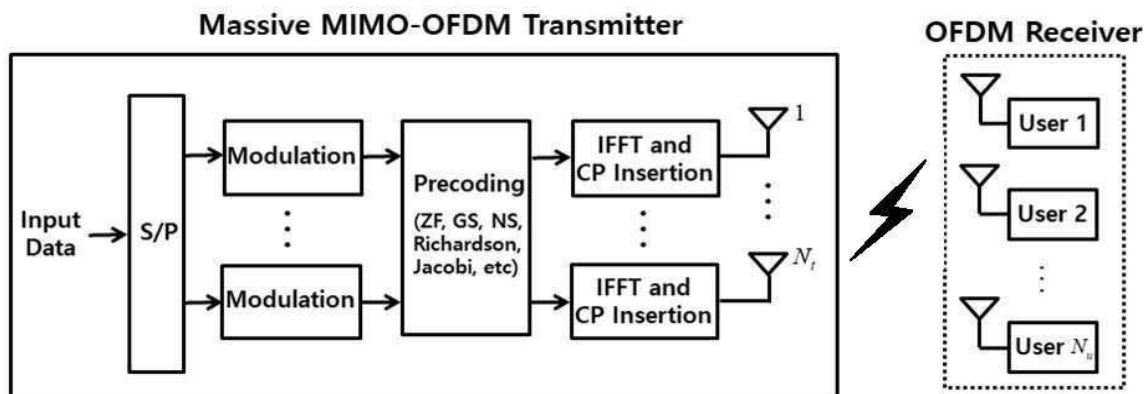
심사관 : 이미현

(54) 발명의 명칭 하향링크 대용량 MIMO 시스템 기반의 GS 프리코딩의 최적 반복횟수 추정 장치 및 그 방법

(57) 요약

본 발명은 하향링크 대용량 MIMO 시스템 기반의 GS 프리코딩의 최적 반복횟수 추정 장치 및 그 방법에 관한 것이다. 본 발명에 따르면, GS 프리코딩의 최적 반복횟수 추정 장치를 이용한 최적 반복횟수 추정 방법에 있어서, 송신하고자 하는 심볼을 반복하여 업데이트하는 GS 프리코딩 기법을 기반으로 상기 심볼에 대한 GS 심볼을 연산하  
(뒷면에 계속)

대표도 - 도1



되,  $i$ 를 1부터 하나씩 증가시키면서 현재의  $i$ 번째 단계에서 GS 심볼을 구하는 단계와, 상기  $i$ 번째 단계에서 구한 GS 심볼과 이전의  $i-1$ 번째 단계에서 구한 GS 심볼 간의 유클리디안 거리를 연산하는 단계와, 상기 유클리디안 거리를 현재까지 축적된 유클리디안 거리를 기반으로 정규화하는 단계와, 상기 정규화된 유클리디안 거리를 기 설정된 임계값과 비교하는 단계, 및 상기  $i$ 번째 단계에서 구한 상기 정규화된 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만으로 수렴할 때까지 GS 프리코딩을 반복하는 단계를 포함하는 최적 반복횟수 추정 방법을 제공한다.

본 발명에 따르면, 하향링크 대용량 MIMO 시스템에서 데이터를 송신하기 이전에 GS 프리코딩에서 사용되는 최적의 반복횟수를 낮은 복잡도로 결정함으로써 임의의 환경에서도 사전 테스트를 진행하지 않고도 GS 프리코딩을 통한 최적의 오류 성능을 얻을 수 있다.

- |   |   |
|---|---|
| (52) CPC특허분류<br><b>H04L 25/03343</b> (2013.01)<br>(72) 발명자<br><b>노재현</b><br>서울특별시 송파구 동남로13길 44-22, 301호(가락동)<br><b>이운상</b><br>경기도 김포시 김포한강11로 287, 207동 902호(운양동, 한강신도시 e편한세상) | (56) 선행기술조사문헌<br>비특허문헌 1(2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2015.09.10)<br>JP2012524435 A<br>JP2013507027 A<br>KR1020080103161 A |
|---|---|

- 이 발명을 지원한 국가연구개발사업
- |             |                         |
|-------------|-------------------------|
| 과제고유번호      | 1345321135              |
| 과제번호        | 2020R1A6A1A03038540     |
| 부처명         | 교육부                     |
| 과제관리(전문)기관명 | 한국연구재단                  |
| 연구사업명       | 이공학학술연구기반구축(R&D)        |
| 연구과제명       | 자율지능무인비행체연구소            |
| 기여율         | 1/2                     |
| 과제수행기관명     | 세종대학교                   |
| 연구기간        | 2020.06.01 ~ 2021.02.28 |

- 이 발명을 지원한 국가연구개발사업
- |             |                         |
|-------------|-------------------------|
| 과제고유번호      | 1711116145              |
| 과제번호        | 2018-0-01423-003        |
| 부처명         | 과학기술정보통신부               |
| 과제관리(전문)기관명 | 정보통신기획평가원               |
| 연구사업명       | 정보통신방송혁신인재양성(R&D)       |
| 연구과제명       | 지능형 비행로봇 융합기술 연구        |
| 기여율         | 1/2                     |
| 과제수행기관명     | 세종대학교 산학협력단             |
| 연구기간        | 2020.01.01 ~ 2020.12.31 |

공지예외적용 : 있음

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

GS 프리코딩의 최적 반복횟수 추정 장치를 이용한 최적 반복횟수 추정 방법에 있어서,

송신하고자 하는 심볼을 반복하여 업데이트하는 GS 프리코딩 기법을 기반으로 상기 심볼에 대한 GS 심볼을 연산 하되,  $i$ 를 1부터 하나씩 증가시키면서 현재의  $i$ 번째 단계에서 GS 심볼을 구하는 단계;

상기  $i$ 번째 단계에서 구한 GS 심볼과 이전의  $i-1$ 번째 단계에서 구한 GS 심볼 간의 유클리디안 거리를 연산하는 단계;

상기 유클리디안 거리를 현재까지 축적된 유클리디안 거리를 기반으로 정규화하는 단계;

상기 정규화된 유클리디안 거리를 기 설정된 임계값과 비교하는 단계; 및

상기  $i$ 번째 단계에서 구한 상기 정규화된 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만으로 수렴할 때까지 GS 프리코딩 을 반복하는 단계를 포함하는 최적 반복횟수 추정 방법.

#### 청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 GS 프리코딩을 반복하는 단계는,

상기 정규화된 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만으로 수렴할 때의 해당  $i$ 를 상기 GS 프리코딩의 반복 횟수로 결정하고 상기 GS 프리코딩을 종료하는 최적 반복횟수 추정 방법.

#### 청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 유클리디안 거리를 정규화하는 단계는,

상기  $i$ 번째 단계에서 구한 유클리디안 거리를 1 내지  $i$ 번째 단계까지 축적된 전체  $i$ 개의 유클리디안 거리의 합 으로 나누어 정규화하는 최적 반복횟수 추정 방법.

#### 청구항 4

청구항 1에 있어서,

상기 GS 프리코딩 기법의 최대 반복 횟수를 설정하는 단계를 더 포함하며,

상기  $i$ 가 상기 최대 반복 횟수에 도달하는 경우 상기 정규화된 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만을 만족하지 않더라도 상기 GS 프리코딩을 종료하는 최적 반복횟수 추정 방법.

#### 청구항 5

청구항 4에 있어서,

상기 최대 반복 횟수는,

ZF 프리코딩 기법에 대한 연산 복잡도( $C_{ZF}$ )와 상기 GS 프리코딩 기법에 대한 연산 복잡도( $C_{Pro}$ ) 간의 차이( $C_D$ ;  $C_{ZF}-C_{Pro}$ )가 0 보다 큰 값을 만족하는 반복 횟수 중 최대 값인 최적 반복횟수 추정 방법.

#### 청구항 6

송신하고자 하는 심볼을 반복하여 업데이트하는 GS 프리코딩 기법을 기반으로 상기 심볼에 대한 GS 심볼을 연산 하되,  $i$ 를 1부터 하나씩 증가시키면서 현재의  $i$ 번째 단계에서 GS 심볼을 구하는 프리코딩부;

상기  $i$ 번째 단계에서 구한 GS 심볼과 이전의  $i-1$ 번째 단계에서 구한 GS 심볼 간의 유클리디안 거리를 연산하는 연산부;

상기 유클리디안 거리를 현재까지 축적된 유클리디안 거리를 기반으로 정규화하는 정규화부; 및

상기 정규화된 유클리디안 거리를 기 설정된 임계값과 비교하여, 상기  $i$ 번째 단계에서 구한 상기 정규화된 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만으로 수렴할 때까지 GS 프리코딩을 반복하는 제어부를 포함하는 최적 반복횟수 추정 장치.

**청구항 7**

청구항 6에 있어서,

상기 제어부는,

상기 정규화된 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만으로 수렴할 때의 해당  $i$ 를 상기 GS 프리코딩의 반복 횟수로 결정하고 상기 GS 프리코딩을 종료하는 최적 반복횟수 추정 장치.

**청구항 8**

청구항 6에 있어서,

상기 정규화부는,

상기  $i$ 번째 단계에서 구한 유클리디안 거리를 1 내지  $i$ 번째 단계까지 축적된 전체  $i$ 개의 유클리디안 거리의 합으로 나누어 정규화하는 최적 반복횟수 추정 장치.

**청구항 9**

청구항 6에 있어서,

상기 GS 프리코딩 기법의 최대 반복 횟수를 설정하는 설정부를 더 포함하며,

상기 제어부는,

상기  $i$ 가 상기 최대 반복 횟수에 도달하는 경우 상기 정규화된 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만을 만족하지 않더라도 상기 GS 프리코딩을 종료하는 최적 반복횟수 추정 장치.

**청구항 10**

청구항 9에 있어서,

상기 최대 반복 횟수는,

ZF 프리코딩 기법에 대한 연산 복잡도( $C_{ZF}$ )와 상기 GS 프리코딩 기법에 대한 연산 복잡도( $C_{Pro}$ ) 간의 차이( $C_0$ ;  $C_{ZF}-C_{Pro}$ )가 0 보다 큰 값을 만족하는 반복 횟수 중 최대 값인 최적 반복횟수 추정 장치.

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 본 발명은 하향링크 대용량 MIMO 시스템 기반의 GS 프리코딩의 최적 반복횟수 추정 장치 및 그 방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 하향링크 대용량 MIMO 시스템에서 GS 프리코딩을 통해 최적의 오류 성능을 얻기 위해 요구되는 최소한의 반복횟수를 추정하는 장치 및 그 방법에 관한 것이다.

**배경 기술**

[0002] 다중 사용자 하향링크 대용량 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템은 신호 송신 이전에 MUI(Multi-User Interference)를 제거하기 위해 신호 전처리 즉, 프리코딩을 수행한다.

[0003] GS(Gauss-Seidel) 프리코딩은 하향링크 대용량 MIMO 시스템에서 MUI를 제거하기 위해 사용되는 프리코딩 기술 중에 하나이다. GS 프리코딩은 대용량 MIMO 시스템에서 최적의 오류 성능을 지니는 프리코딩 기술인 ZF(Zero-

Forcing)의 복잡도를 줄인 방식이다.

- [0004] GS 프리코딩은 주어진 반복횟수 파라미터를 통해 현재의 심볼을 업데이트하는 방식인데, GS 해는 반복횟수가 증가함에 따라 ZF 해에 수렴하는 특성이 있다. GS 프리코딩을 통해 최적의 오류 성능을 얻기 위해서는 데이터를 송신하기 이전에 최적의 반복횟수를 결정해야 한다.
- [0005] 그러나, GS 프리코딩의 최적 반복횟수를 추정하는 방법은 제시된 바 없으며, GS 프리코딩의 반복횟수를 올바르게 추정하지 않으면 오류 성능의 열화가 발생하거나 복잡도가 불필요하게 증가하는 문제점이 있다.
- [0006] 또한, 대부분의 대용량 MIMO 시스템에 관한 선행 연구는 송신 안테나 개수 대비 유저 수의 비율을 8 ~ 16으로 지향하고 있다. 그러나 기지국의 송신 안테나를 무한대로 증가시킬 수는 없을 뿐만 아니라 셀 용량을 증가시키기 위해서는 유저 수를 증가시켜야 하므로 더욱 낮은 수의 비율(ex, 2 또는 4)에서도 동작할 수 있는 신호처리에 관한 연구가 필수적이다.
- [0007] 본 발명의 배경이 되는 기술은 한국공개특허 제10-1580539호(2015.12.28 공고)에 개시되어 있다.

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

- [0008] 본 발명은, 하향링크 대용량 MIMO 시스템에서 데이터를 송신하기 이전에 GS 프리코딩에서 사용되는 최적의 반복 횟수를 낮은 복잡도로 추정하는 하향링크 대용량 MIMO 시스템 기반의 GS 프리코딩의 최적 반복횟수 추정 장치 및 그 방법을 제공하는데 목적이 있다.

**과제의 해결 수단**

- [0009] 본 발명은, GS 프리코딩의 최적 반복횟수 추정 장치를 이용한 최적 반복횟수 추정 방법에 있어서, 송신하고자 하는 심볼을 반복하여 업데이트하는 GS 프리코딩 기법을 기반으로 상기 심볼에 대한 GS 심볼을 연산하되,  $i$ 를 1부터 하나씩 증가시키면서 현재의  $i$ 번째 단계에서 GS 심볼을 구하는 단계와, 상기  $i$ 번째 단계에서 구한 GS 심볼과 이전의  $i-1$ 번째 단계에서 구한 GS 심볼 간의 유클리디안 거리를 연산하는 단계와, 상기 유클리디안 거리를 현재까지 축적된 유클리디안 거리를 기반으로 정규화하는 단계와, 상기 정규화된 유클리디안 거리를 기 설정된 임계값과 비교하는 단계, 및 상기  $i$ 번째 단계에서 구한 상기 정규화된 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만으로 수렴할 때까지 GS 프리코딩을 반복하는 단계를 포함하는 최적 반복횟수 추정 방법을 제공한다.
- [0010] 또한, 상기 GS 프리코딩을 반복하는 단계는, 상기 정규화 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만으로 수렴할 때의 해당  $i$ 를 상기 GS 프리코딩의 반복 횟수로 결정하고 상기 GS 프리코딩을 종료할 수 있다.
- [0011] 또한, 상기 유클리디안 거리를 정규화하는 단계는, 상기  $i$ 번째 단계에서 구한 유클리디안 거리를 1 내지  $i$ 번째 단계까지 축적된 전체  $i$ 개의 유클리디안 거리의 합으로 나누어 정규화할 수 있다.
- [0012] 또한, 상기 최적 반복횟수 추정 방법은, 상기 GS 프리코딩 기법의 최대 반복 횟수를 설정하는 단계를 더 포함하며, 상기  $i$ 가 상기 최대 반복 횟수에 도달하는 경우 상기 정규화 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만을 만족하지 않더라도 상기 GS 프리코딩을 종료할 수 있다.
- [0013] 또한, 상기 최대 반복 횟수는, ZF 프리코딩 기법에 대한 연산 복잡도( $C_{ZF}$ )와 상기 GS 프리코딩 기법에 대한 연산 복잡도( $C_{Pro}$ ) 간의 차이( $C_D; C_{ZF}-C_{Pro}$ )가 0 보다 큰 값을 만족하는 반복 횟수 중 최대 값일 수 있다.
- [0014] 그리고, 본 발명은, 송신하고자 하는 심볼을 반복하여 업데이트하는 GS 프리코딩 기법을 기반으로 상기 심볼에 대한 GS 심볼을 연산하되,  $i$ 를 1부터 하나씩 증가시키면서 현재의  $i$ 번째 단계에서 GS 심볼을 구하는 프리코딩부와, 상기  $i$ 번째 단계에서 구한 GS 심볼과 이전의  $i-1$ 번째 단계에서 구한 GS 심볼 간의 유클리디안 거리를 연산하는 연산부와, 상기 유클리디안 거리를 현재까지 축적된 유클리디안 거리를 기반으로 정규화하는 정규화부, 및 상기 정규화된 유클리디안 거리를 기 설정된 임계값과 비교하여, 상기  $i$ 번째 단계에서 구한 상기 정규화된 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만으로 수렴할 때까지 GS 프리코딩을 반복하는 제어부를 포함하는 최적 반복횟수 추정 장치를 제공한다.
- [0015] 또한, 상기 제어부는, 상기 정규화 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만으로 수렴할 때의 해당  $i$ 를 상기 GS 프리코딩의 반복 횟수로 결정하고 상기 GS 프리코딩을 종료할 수 있다.

[0016] 또한, 상기 정규화부는, 상기  $i$ 번째 단계에서 구한 유클리디안 거리를 1 내지  $i$ 번째 단계까지 축적된 전체  $i$ 개의 유클리디안 거리의 합으로 나누어 정규화할 수 있다.

[0017] 또한, 상기 최적 반복횟수 추정 장치는, 상기 GS 프리코딩 기법의 최대 반복 횟수를 설정하는 설정부를 더 포함하며, 상기 제어부는, 상기  $i$ 가 상기 최대 반복 횟수에 도달하는 경우 상기 정규화 유클리디안 거리가 상기 임계값 미만을 만족하지 않더라도 상기 GS 프리코딩을 종료할 수 있다.

**발명의 효과**

[0018] 본 발명에 따르면, 하향링크 대용량 MIMO 시스템에서 데이터를 송신하기 이전에 GS 프리코딩에서 사용되는 최적의 반복횟수를 낮은 복잡도로 결정함으로써 임의의 환경에서도 사전 테스트를 진행하지 않고도 GS 프리코딩을 통한 최적의 오류 성능을 얻을 수 있다.

**도면의 간단한 설명**

- [0019] 도 1은 본 발명의 실시예가 적용되는 하향링크 대용량 MIMO-OFDM 시스템 모델을 나타낸 도면이다.
- 도 2는 도 1의 송신단에 포함된 GS 프리코딩의 최적 반복횟수 추정 장치의 구성을 나타낸 도면이다.
- 도 3은 도 2의 장치를 이용한 최적 반복횟수 추정 방법을 설명하는 도면이다.
- 도 4는 반복횟수가 증가함에 따른 복소평면에서의 GS 해( $M=100$ )를 나타낸 도면이다.
- 도 5는 반복횟수를 추정하지 않은 종래의 GS 프리코딩, 본 발명의 반복횟수 추정 기법을 사용한 GS 프리코딩, 그리고 ZF 프리코딩의 곱셈 연산량을 비교한 도면이다.
- 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 최적 반복횟수 추정 알고리즘의 순서도이다.
- 도 7은 본 발명에서 성능 평가를 위해 사용한 측정 파라미터를 설명한 도면이다.
- 도 8은 유저 수에 따른  $W$  대각지배성 크기를 나타낸 도면이다.
- 도 9는  $s^{(0)}$ 의 계산 방식에 따른 GS 해와 ZF 해의 MSE 성능을 비교한 도면이다.
- 도 10은 반복횟수에 따른 정규화된 유클리디안 거리를 나타낸 도면이다
- 도 11은  $N_t=100$  일 때, 유저 수에 따라 GS 프리코딩이 최적의 오류 성능을 지니기 위해 요구되는 최소한의 반복 횟수  $(i_{opt})$  를 나타낸다.
- 도 12는  $100 \times 20$  및  $100 \times 30$  시스템에서 반복횟수 추정 기법을 사용하지 않은 종래의 GS 프리코딩, 본 발명의 반복횟수 추정 기법을 사용한 GS 프리코딩, 그리고 ZF 프리코딩의 BER 성능을 나타낸 도면이다.
- 도 13은  $100 \times 40$  및  $100 \times 50$  시스템에서 반복횟수 추정 기법을 사용하지 않은 종래의 GS 프리코딩, 본 발명의 반복횟수 추정 기법을 사용한 GS 프리코딩, 그리고 ZF 프리코딩의 BER 성능을 나타낸 도면이다.
- 도 14는 반복횟수 추정 기법을 사용하지 않은 종래의 GS 프리코딩, 본 발명에서의 반복횟수 추정 기법을 사용한 GS 프리코딩 그리고 ZF 프리코딩의 곱셈 연산량을 나타낸 도면이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

[0020] 그러면 첨부한 도면을 참고로 하여 본 발명의 실시 예에 대하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 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 도면 부호를 붙였다.

[0021] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 다른 부분과 "연결"되어 있다고 할 때, 이는 "직접적으로 연결"되어 있는 경우뿐 아니라, 그 중간에 다른 소자를 사이에 두고 "전기적으로 연결"되어 있는 경우도 포함한다. 또한 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아

니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.

[0022] 본 발명은 하향링크 대용량 MIMO 시스템에서 GS 프리코딩에 사용되는 반복횟수를 추정하는 기법에 관한 것이다. GS 프리코딩에서 사용되는 반복횟수는 사전에 알려져 있지 않으며, 하향링크 시스템에서 반드시 신호 전송 이전에 결정되어야 하는 중요한 파라미터이다. GS 프리코딩 연산 시 최적의 오류 성능을 얻기 위해 요구되는 최소한의 반복횟수보다 높은 반복횟수를 적용하면 복잡도가 불필요하게 증가하며, 반대로 낮은 반복횟수를 적용하면 GS 해는 ZF 해에 수렴하지 못하여 송신전력을 증가시켜도 오류 성능이 개선되지 않는 현상이 발생한다.

[0023] 본 발명은 하향링크 대용량 MIMO 시스템에서 데이터를 송신하기 이전에 GS 프리코딩에서 사용되는 최적의 반복 횟수를 낮은 복잡도로 추정함으로써, 임의 환경에서도 시스템의 복잡도를 줄이고 오류 성능을 높일 수 있는 기법을 제시한다.

[0024] 도 1은 본 발명의 실시예가 적용되는 하향링크 대용량 MIMO-OFDM 시스템 모델을 나타낸 도면이다.

[0025] 도 1에 나타낸 것과 같이, 하향링크 대용량 MIMO-OFDM 시스템은  $N_t$  개의 송신 안테나를 가진 송신단 (Transmitter) 및  $N_u$  명의 유저를 포함한 수신단(Receiver)을 포함한다.

[0026] 본 발명에서는 도 1과 같이  $N_t$  개의 송신 안테나와 한 개의 수신 안테나를 가진  $N_u$  명의 유저가 존재하는 하향 링크 대용량 MIMO-OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템을 고려한다. ( $N_t > N_u$ )

[0027] 송신단은 변조를 완료한 송신 심볼을 프리코딩하여 전처리한 후에 송신 안테나를 통하여 전송한다. 프리코딩은 ZF, GS 기법 등 다양하며, 본 발명의 실시예는 주어진 반복횟수 파라미터를 통해 심볼을 업데이트하는 GS 프리코딩 기법을 기반으로 한다.

[0028] 모든 유저에 대한 수신 신호 벡터  $y$  는 다음의 수학적 식 1과 같다.

**수학적 식 1**

[0029] 
$$y = \sqrt{P}HGx/\beta + z$$

[0030] 여기서,  $P$  는 기지국 송신 전력,  $H$  는 채널 행렬로서, 각 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 i.i.d.(Independent and Identically Distributed) 채널 계수,  $G$  는 프리코딩 행렬,  $x$  는 송신 신호 벡터로서 각 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 변조된 송신 신호,  $z$  는 잡음 벡터로서 각 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 AWGN(Additive White Gaussian Noise), 그리고  $\beta$  는 프리코딩으로 인해 변하는 송신 전력을 방지하기 위한 정규화 상수를 나타낸다.

[0031] 종래의 GS(Gauss-Seidel) 프리코딩을 기술하기 위해, 먼저 gram 행렬  $W$  는 다음의 수학적 식 2와 같이 정의된다.

**수학적 식 2**

[0032] 
$$W = HH^H$$

[0033] 최적의 오류 성능을 지니는 ZF(Zero-Forcing) 프리코딩은 수학적 식 1의  $G$  를  $H$  의 의사역행렬  $G = H^H(HH^H)^{-1} = H^H W^{-1}$  로 계산한다. 따라서 ZF 프리코딩은  $W$  의 역행렬을 계산해야 하고,  $W$  는

$N_u \times N_u$  크기의 행렬이므로  $N_u$  가 증가할수록 역행렬을 계산하는 복잡도는 비선형적으로 증가한다.

[0034] GS 프리코딩은 낮은 복잡도의 ZF 프리코딩으로, 수학식 1의  $\mathbf{s} = \mathbf{G}\mathbf{x}$  를 ZF 프리코딩보다 간단히 구하는 방식이다.

[0035]  $\mathbf{W}$  는 Hermitian positive definite 성질을 지니고 있어, 다음과 같이 분해된다.

**수학식 3**

[0036] 
$$\mathbf{W} = \mathbf{D} + \mathbf{L} + \mathbf{L}^H$$

[0037] 여기서  $\mathbf{D}$  와  $\mathbf{L}$  은 각각  $\mathbf{W}$  의 대각행렬과 엄격한 하삼각행렬을 나타낸다. 반복횟수가  $i$  일 때, GS 해  $\mathbf{s}^{(i)}$  는 다음과 같이 표현된다.

**수학식 4**

[0038] 
$$\mathbf{s}^{(i)} = (\mathbf{D} + \mathbf{L})^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{L}^H \mathbf{s}^{(i-1)}), \quad i = 1, 2, \dots$$

[0039] GS 프리코딩 기법은 수학식 4의  $i$  를 하나씩 늘려가면서 GS 해를 반복하여 구하여 심볼을 업데이트한다.

[0040] 여기서,  $i=1$  일 때,  $\mathbf{s}^{(i-1)} = \mathbf{s}^{(0)}$  이다. 이러한  $\mathbf{s}^{(0)}$  은 초기해(초기값)를 나타내며, 이는 시스템 설계 목적에 따라 가변적으로 설정될 수 있다.

[0041] 본 발명의 실시예에서는 GS 해의 수렴속도를 증가시키기 위하여, 다음과 같이 계단행렬을 이용한 2term-NS(Neumann Series) 기법을 이용하여 초기해(초기값)를 설정한 것을 가정한다.

**수학식 5**

[0042] 
$$\mathbf{s}^{(0)} = \left( \sum_{n=0}^1 (\mathbf{I}_K - \mathbf{S}^{-1} \mathbf{W})^n \right) \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x}$$

[0043] 계단행렬  $\mathbf{S}$  는 다음과 같은 조건을 만족시키는 행렬로서, 종래에 초기행렬로 주로 사용되었던  $\mathbf{D}$  보다 높은 수렴속도를 지니면서 역행렬  $\mathbf{S}^{-1}$  을 구할 때 거의 유사한 복잡도를 지니는 장점이 있다.

[0044] 이와 같이 계단행렬을 이용한 2term-NS 기법을 이용할 경우 수학식 4의 초기값  $\mathbf{s}^{(0)}$  을 더욱 견고히 설정할 수 있다.

[0045] 아래 수학식 6은 계단행렬  $\mathbf{S}$  의 각 행과 열의 성분을 표현한 것에 해당한다.



수학식 6

$$-S_{mm-1} = 0, S_{mm+1} = 0,$$

$$m = 2, 4, \dots, 2 \left\lfloor \frac{N_u}{2} \right\rfloor.$$

$$-S_{mm-1} = 0, S_{mm+1} = 0,$$

$$m = 1, 3, \dots, 2 \left\lfloor \frac{N_u - 1}{2} \right\rfloor + 1.$$

[0046]

[0047]

이하에서는 상술한 내용을 바탕으로 본 발명의 실시예에 따른 GS 프리코딩의 최적 반복횟수 추정 장치 및 그 방법을 설명한다.

[0048]

도 2는 도 1의 송신단에 포함된 GS 프리코딩의 최적 반복횟수 추정 장치의 구성을 나타낸 도면이고, 도 3은 도 2의 장치를 이용한 최적 반복횟수 추정 방법을 설명하는 도면이다.

[0049]

도 2 및 도 3을 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 최적 반복횟수 추정 장치(100)는 프리코딩부(110), 연산부(120), 정규화부(130), 제어부(140) 및 설정부(150)를 포함한다. 각 부(110, 120, 130, 150)의 동작 및 각 부 간의 데이터 흐름은 제어부(140)에 의해 제어될 수 있다.

[0050]

또한, 본 발명의 실시예에 따른 최적 반복횟수 추정 장치(100)는 도 1의 송신단에 포함되어 구현될 수 있으며, 도 1의 송신단 내 포함된 프리코딩 블록에 해당할 수 있다.

[0051]

먼저, 프리코딩부(110)는 송신하고자 하는 심볼을 반복하여 업데이트하는 GS 프리코딩 기법을 기반으로 심볼에 대한 GS 심볼을 연산한다(S310). 여기서 송신하고자 하는 심볼이란 도 1과 같이 변조를 거쳐 프리코딩 블록으로 들어온 신호에 해당할 수 있다.

[0052]

프리코딩부(110)는 수학식 4를 기반으로 GS 프리코딩을 수행한다. 이때,  $i=1$ 부터 시작하여  $i$ 를 하나씩 증가시키면서 현재의  $i$ 번째 단계에서의 GS 심볼을 구한다( $i=1, 2, \dots$ ). 수학식 4의  $S^{(i)}$ 는  $i$ 번째 단계의 GS 해를 의미한다.

[0053]

따라서, GS 프리코딩 기법은 수학식 4의  $i$ 를 하나씩 늘려가면서 GS 해를 반복하여 구하면서 심볼을 업데이트한다.

[0054]

여기서,  $i=1$ 일 때 수학식 4의 우항에서 나오는  $s^{(0)}$ 은 앞서 설명한 초기해(초기값)에 해당하는 것으로 본 실시예는 수학식 5에 나타낸 계단행렬을 이용한 2term-NS 기법을 통해 설정된 것을 가정한다.

[0055]

물론, 이러한 계단 행렬을 이용한 2term-NS 기법 이외에, 후술하는 수학식 14에 의한 대각 행렬(Diagonal matrix)을 이용한 기법을 이용하여 초기해를 설정할 수도 있다. 다만, 계단 행렬을 이용한 초기 값이 대각 행렬을 이용하여 얻은 초기값보다 견고하여 보다 높은 MSE 성능을 나타낸다.

[0056]

수학식 4에서, 1번째 단계( $i=1$ )의 GS 해  $S^{(1)}$ 은 초기해  $S^{(0)}$ 로부터 구해지며, 2번째 단계( $i=2$ )의 GS 해  $S^{(2)}$ 은 이전에 구한  $S^{(1)}$ 로부터 구해짐을 알 수 있다.

[0057]

여기서  $i$ 가 늘어날수록, 즉 반복횟수가 증가할수록 GS 해는 ZF 프리코딩을 통한 이상적인 ZF 해에 가까워져 신뢰도는 높아지지만 속도가 느려지는 단점이 있다.

[0058]

도 4는 반복횟수가 증가함에 따른 복소평면에서의 GS 해( $M=100$ )를 나타낸 도면이다. GS 해는 실수부와 허수부를 가지므로 복소평면의 점으로 나타낼 수 있다.

[0059]

도 4의 (a)와 (b)는 서로 다른 초기해를 사용하여 구한 GS 해의 결과이다. 여기서, 도 4의 (a)는 계단행렬을 이용한 2term-NS 기법을 사용한 수학식 5의 결과를 초기해로 사용하였을 때의 결과이고, (b)는 대각 행렬을 통한  $D^{-1}x$ 을 초기해로 사용하였을 때의 결과이다.

[0060]

이러한 도 4는 다양한 안테나 및 유저 수의 조합에 따른 시스템의 결과를 나타내고 있다. 예를 들어,  $100 \times 50$

GS는 100개의 송신 안테나와 50명의 유저를 포함한 100×50 시스템에서 GS 프리코딩을 이용할 경우 반복횟수 (i)의 증가에 따른 GS 해의 추이를 보여주며, 100×50 ZF는 동일 시스템에서 ZF 프리코딩을 이용하여 획득한 ZF 해를 보여준다. GS 프리코딩을 이용한 결과의 경우, i는 1~8까지 나타내었으며 이는 프리코딩을 8회까지 반복한 것을 의미한다.

[0061] 도 4에서는  $\mathbf{s}^{(i)}$ 의 첫 번째 원소인  $s_1^{(i)}$ 을 표현하였고,  $\mathbf{s}^{(i)}$ 의 각 원소는 통계적으로 동일한 분포를 지니므로 일반화에 대한 오류는 없다. 도 4에서 (a)와 (b) 모두 반복횟수가 증가할수록 ZF 해에 수렴함을 알 수 있고, 유저 수가 증가함에 따라  $\mathbf{W}$ 의 대각지배성이 낮아져 수렴속도가 감소함을 알 수 있다.

[0062] 그러나 (a)와 (b) 모두 100×50 시스템에서는 부족한 반복횟수로 인해 GS 해가 ZF 해에 수렴하지 못한 결과를 보이고 있다. 그리고 (a)가 (b)보다 높은 수렴속도를 지니는데, 이는 (a)가  $\mathbf{s}^{(0)}$ 를 계산할 때 계단행렬을 이용한 2term NS를 사용하였기 때문이다. 또한, 반복횟수가 증가할수록  $s_1^{(i)}$ 과  $s_1^{(i-1)}$ 의 차이는 점점 감소함을 알 수 있다.

[0063] 결과적으로, GS 해는 반복횟수가 증가함에 따라 ZF 해에 수렴하며, 현재 단계에서 구한 GS 해와 직전 단계에서 구한 GS 해 간의 거리( $s_1^{(i)}$ 과  $s_1^{(i-1)}$ 의 차이)는 i가 증가할수록 감소하는 추이를 확인할 수 있다.

[0064] 따라서, 본 발명의 실시예는 현재 단계의 GS 심볼과 이전 단계의 GS 심볼의 유클리디안 거리를 이용하여 최적 반복횟수를 추정하며, 유클리디안 거리 함수는 반복횟수가 증가함에 따라 감소하는 형태를 지닌다.

[0065] 이러한 점에 따라, 연산부(120)는 현재의 i번째 단계에서 구한 GS 심볼과 이전의 i-1번째 단계에서 구한 GS 심볼 간의 유클리디안 거리(Euclidean Distance; ED)를 아래의 수학적 식 7을 통해 연산한다(S320).

**수학적 식 7**

[0066] 
$$e^{(i)} = \left| \mathbf{s}^{(i)} - \mathbf{s}^{(i-1)} \right|, i = 1, 2, \dots$$

[0067] 여기서,  $e^{(i)}$ 는 i번째 단계에서 구한 유클리디안 거리 값에 해당한다. 이러한 유클리디안 거리는 도 4와 같은 복소평면에서의  $s_1^{(i)}$ 과  $s_1^{(i-1)}$ 간 거리를 의미한다.

[0068] 본 발명의 실시예는 수학적 식 7에서 구한 유클리디안 거리 값을 상대적인 비율로 표현하기 위하여, 정규화된 유클리디안 거리를 이용하는데, 그 근거는 다음과 같다.

[0069] 우선, 최적의 반복횟수를 결정하기 위한 방법 중에는  $E[\mathbf{s}^{(i)}]$ 를 구하는 closed-form solution을 고려할 수도 있으나, 이는 세 가지의 문제점을 지니고 있다.

[0070] 첫 번째, 수학적 식 4는 반복횟수에 따른 피드백 구조이므로 closed-form solution을 구하는 것이 매우 복잡하다. 두 번째,  $\mathbf{s}^{(0)}$ 는 시스템에 따라 가변적으로 설정될 수 있는데, 가변하는 모든  $\mathbf{s}^{(0)}$ 에 대해 일일이 closed-form solution을 구해야 하는 번거로움이 있다. 세 번째, 송신 안테나 개수 대 유저 수의 비율이 낮을수록 대용량 MIMO 시스템의 주요 특성인 채널 경화(channel hardening) 혹은 호의적인 전파(favorable propagation)의 효과가 줄어들어, 대용량 MIMO 시스템에서 자주 사용되는 random matrix theory가 더 이상 성립되지 않아 높은 반복횟수 추정 오차를 야기하는 문제점이 있다.

[0071] 따라서, 본 발명의 실시예에서는 절대적인 방식이 아닌 상대적인 방식을 이용하는데,  $\mathbf{s}^{(i)}$ 와  $\mathbf{s}^{(i-1)}$ 의 차이는 i가 증가함에 따라 감소하는 함수임을 고려하여,  $\mathbf{s}^{(i)}$ 와  $\mathbf{s}^{(i-1)}$ 간 정규화된 유클리디안 거리(Normalized Euclidean Distance; NED)를 계산한다. 정규화된 유클리디안 거리(NED)는 단순 유클리디안 거리(ED)와 달리 절

대적인 거리를 상대적인 비율로 표현하기 위함이다.

[0072] 이와 같이, 본 발명의 실시예는 유클리디안 거리값을 상대적인 비율로 표현하기 위해 정규화된 유클리디안 거리를 이용하며, 해당 값이 매우 작을 때 즉, 유클리디안 거리의 변화율이 임계값 미만으로 매우 작을 때의 반복횟수를 최적의 반복횟수로 결정한다.

[0073] 구체적으로, 정규화부(130)는 유클리디안 거리  $e^{(i)}$ 를 현재까지 축적된 유클리디안 거리( $e^{(1)}, e^{(2)}, \dots, e^{(i)}$ ) 기반으로 정규화한다(S330).

[0074] 이때, 정규화된 유클리디안 거리  $\bar{e}^{(i)}$ 는 아래의 수학적 식 8과 같이 표현된다.

**수학적 식 8**

[0075] 
$$\bar{e}^{(i)} = \frac{e^{(i)}}{\gamma^{(i)}} = \frac{|s^{(i)} - s^{(i-1)}|}{\gamma^{(i)}}$$

[0076] 여기서,  $\gamma^{(i)}$ 는 다음의 수학적 식 9와 같이 정의된다.

**수학적 식 9**

[0077] 
$$\begin{aligned} \gamma^{(1)} &= 1, \\ \gamma^{(i)} &= \sum_{k=1}^i e^{(k)}, \quad i = 2, 3, \dots \end{aligned}$$

[0078] 여기서  $i=1$ 인 1번째 단계의 경우 그 이전에 구한 거리 데이터가 없기 때문에, 이때의  $\gamma^{(i)}$ 는 1의 값을 사용하며,  $i$ 가 2 이상인 이후의 단계부터  $\gamma^{(i)}$ 는 현재까지 구해진 유클리디안 거리의 합산 값을 사용한다.

[0079] 따라서, 수학적 식 8에 나타난 정규화된 유클리디안 거리  $\bar{e}^{(i)}$ 는 간단히  $i$ 번째 단계에서 구한 유클리디안 거리  $e^{(i)}$ 를 1 ~  $i$ 번째 단계까지 축적된 전체  $i$ 개의 유클리디안 거리의 합( $\gamma^{(i)} = \sum e^{(i)}$ )으로 나눈 값으로 정의될 수 있다.

[0080] 정규화된 유클리디안 거리  $\bar{e}^{(i)}$ 는 유클리디안 거리  $e^{(i)}$ 를 비율로 표현한 것인데, 이는  $e^{(i)}$ 를  $\gamma^{(i)}$ 로 나누었기 때문이다. 여기서  $\gamma^{(i)}$ 는  $e^{(1)}, e^{(2)}, \dots, e^{(i)}$ 의 합이므로,  $\bar{e}^{(i)} = [e^{(1)} e^{(2)} \dots e^{(i)}]$ 의 모든 원소의 합은 1이 된다. 예를 들어,  $e^{(1)} = 5$ ,  $e^{(2)} = 3$ ,  $e^{(3)} = 2$ 일 때, 
$$\bar{e}^{(3)} = \frac{e^{(3)}}{e^{(1)} + e^{(2)} + e^{(3)}} = \frac{2}{5 + 3 + 2} = \frac{1}{5}$$
이며, 이는 유클리디안 거리 비율의 20%를 차지함을 의미한다.

[0081] 본 발명의 실시예는  $\bar{e}^{(i)}$  값이 매우 작을 때, 즉 유클리디안 거리의 변화율이 임계값 이하로 매우 작을 때의 해당 반복횟수  $i$ 를 최적의 반복횟수로 결정한다.

[0082] 이를 기반으로, 제어부(140)는  $i$ 번째 단계에서 구한 정규화된 유클리디안 거리  $\bar{e}^{(i)}$ 가 임계값 미만으로 수렴할 때까지 GS 프리코딩을 반복한다(S340). 이는 곧  $\bar{e}^{(i)}$ 가 임계값 미만이 되면 그때의  $i$  값을 GS 프리코딩의 최적

반복 횟수로 결정하고 GS 프리코딩을 종료함을 의미한다.

[0083] 이와 같은 방식으로  $\bar{e}^{(i)}$  를 계산하면서 각  $i$ 번째 단계에서  $\bar{e}^{(i)}$  의 값이 임계값( $\eta$ )보다 작을 경우, 해당  $i$ 를 최적의 오류 성능을 지니기 위해 요구되는 최소한의 반복횟수로 결정한다.

[0084] 본 발명에서는 임계값  $\eta = 0.01$  로 설정하였으며, 이는  $\bar{e}^{(i)}$  의 모든 원소의 합이 1이므로  $e^{(i)}$  의 변화율이 1% 이하인 경우를 나타낸다.

[0085] 즉, 본 발명의 알고리즘은  $e^{(i)}$  의 변화율이 1% 이하인 경우, GS 해는 ZF 해에 수렴하여, 그보다 반복횟수를 증가시켜도 더 이상의 변화량은 매우 미미하다고 고려하였다.

[0086] 그런데, S340 단계의 결과 매우 큰 수의 반복횟수가 결정되면 GS 프리코딩이 오히려 ZF 프리코딩보다 높은 복잡도를 지니게 될 수 있다. 이러한 문제를 방지하기 위해, 설정부(150)는 GS 프리코딩 기법의 최대 반복 횟수를 사전에 설정한다.

[0087] 그러면, 제어부(140)는  $\bar{e}^{(i)}$  이 임계값 미만을 만족하지 않더라도, 현재  $i$ 가 최대 반복 횟수에 도달한 경우라면, 더 이상 GS 프리코딩을 수행하지 않고 종료하도록 프리코딩부(110)를 제어한다.

[0088] 여기서, 설정부(150)는 사전에 각 프리코딩 기법에 대한 연산의 복잡도를 정량적으로 계산하여 반복횟수 최댓값을 설정해 둔다.

[0089] 이때, 최대 반복 횟수는 ZF 프리코딩 기법에 대한 연산 복잡도( $C_{ZF}$ )와 GS 프리코딩 기법에 대한 연산 복잡도( $C_{Pro}$ ) 간의 차이( $C_D = C_{ZF} - C_{Pro}$ )가 0 보다 큰 값을 만족하는 반복 횟수 중에서 최대 값에 해당할 수 있다. 이러한 최대 반복 횟수는 S310 단계 이전에 시스템 환경을 고려하여 미리 설정될 수 있다.

[0090] 도 5는 반복횟수를 추정하지 않는 종래의 GS 프리코딩, 본 발명의 반복횟수 추정 기법을 사용한 GS 프리코딩, 그리고 ZF 프리코딩의 곱셈 연산량을 비교한 도면이다.

[0091] 도 5에서 알 수 있듯이, 본 발명의 실시예에 따른 추정 기법을 사용한 GS 프리코딩은 종래의 GS 프리코딩의 연산량에서  $iN_u$  의 추가적인 곱셈 연산량만 요구하며, 이는 유저 수에 관한 1차식이므로 매우 낮은 복잡도를 유발한다.

[0092] 최대 반복횟수를 초기화하기 위해 도 5를 토대로 두 기법 간의 복잡도 차이  $C_D = C_{ZF} - C_{Pro}$  를 계산하면 다음의 수학적 식 10과 같다.

**수학적 식 10**

[0093] 
$$C_D = -(N_u^2 + N_u)i + (N_u^3 - 2N_u^2 - 4N_u + 4)$$

[0094] 수학적 식 10에서  $C_D > 0$  을 만족시키는 최대 반복횟수를 구하면  $i_{Max} = N_u - 4$  이다. 만일 유저 수  $N_u$  가 100이면, 최대 반복횟수는 96으로 설정된다.

[0095] 따라서, 추정 과정 중,  $i_{Max} - 1$  번째 루프에서도  $e^{(i)}$  의 변화율이 1%를 초과하여 최적의 반복횟수가 결정되지 않으면, 본 발명의 알고리즘은  $i_{Max}$  를 최적의 반복횟수로 결정하고 알고리즘을 종료한다.

[0096] 추정된 최적의 반복횟수를  $\hat{i}$  라고 하면, ZF 프리코딩과 본 발명에서의 반복횟수 추정 기법을 이용한 GS 프리코딩을 통해 신호를 전송할 때, 각각의 수신 신호는 다음의 수학적 식 11과 같다.

수학식 11

$$ZF : \mathbf{y} = \sqrt{P} \mathbf{H} \mathbf{G} \mathbf{x} / \beta + \mathbf{z} = \sqrt{P} \mathbf{H} \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1} \mathbf{x} / \beta + \mathbf{z} = \sqrt{P} \mathbf{H} \mathbf{s}^{(i)} / \beta + \mathbf{z}$$

$$GS : \mathbf{y} = \sqrt{P} \mathbf{H} \mathbf{G} \mathbf{x} / \beta + \mathbf{z} = \sqrt{P} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \mathbf{s}^{(i)} / \beta + \mathbf{z}$$

[0097]

[0098] 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 최적 반복횟수 추정 알고리즘의 순서도이다. 본 발명에서 정규화 상수  $\beta$  를 낮은 복잡도로 구하기 위해 Wishart 행렬의 분포를 이용하여, 다음과 같이 계산한다.

수학식 12

$$\beta = E[\text{tr}(\mathbf{W}^{-1})] = N_u / (N_t - N_u)$$

[0099]

[0100] 이는 대용량 MIMO 시스템에서 송신 안테나 개수 대비 유저 수의 비율이 2 이상이면, 기댓값 연산자 없이 실제로 정확하게 계산한  $\text{tr}(\mathbf{W}^{-1})$  와 일치함이 증명되었다.

[0101] 도 7은 본 발명에서 성능 평가를 위해 사용한 측정 파라미터를 설명한 도면이고, 도 8은 유저 수에 따른  $\mathbf{W}$  의 대각지배성 크기를 나타낸 도면이다.

[0102] 대각지배성 크기  $v$  는 다음과 같이 계산된다.

수학식 13

$$v = \frac{1}{N_u} \frac{\sum_{k=1}^{N_u} w_{mm}}{\sum_{k=1, k \neq m}^{N_u} |w_{mk}|}$$

[0103]

[0104] 여기서  $w_{mk}$  는  $\mathbf{W}$  의  $m$  번째 행의  $k$  번째 열을 나타낸다. 도 8에서  $N_u$  가 증가할수록 대각지배성의 크기가 작아짐을 알 수 있는데, 이는 수학식 13에서처럼 다른 유저로 인한 간섭 성분의 크기가 커지기 때문이다. 즉, 대각지배성 크기가 낮다는 것은 다른 유저로 인한 간섭이 크다는 것을 의미한다.

[0105] 도 9는  $\mathbf{s}^{(0)}$  의 계산 방식에 따른 GS 해와 ZF 해의 MSE(Mean Square Error) 성능을 비교한 도면이다. 도 9에서 사용된  $\mathbf{s}^{(0)}$  는 각각 다음과 같다.

수학식 14

$$\mathbf{s}^{(0)} = \mathbf{D}^{-1}\mathbf{x}. \text{ (Diagonal matrix without NS)}$$

$$\mathbf{s}^{(0)} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{x}. \text{ (Stair matrix without NS)}$$

$$\mathbf{s}^{(0)} = \left( \sum_{n=0}^1 (\mathbf{I}_K - \mathbf{D}^{-1}\mathbf{W})^n \right) \mathbf{D}^{-1}\mathbf{x}. \text{ (Diagonal matrix with 2 term NS)}$$

$$\mathbf{s}^{(0)} = \left( \sum_{n=0}^1 (\mathbf{I}_K - \mathbf{S}^{-1}\mathbf{W})^n \right) \mathbf{S}^{-1}\mathbf{x}. \text{ (Stair matrix with 2 term NS)}$$

[0106]

[0107] 도 9에서 계단행렬을 이용하였을 때, 대각행렬을 이용하였을 때보다 더욱 높은 MSE 성능을 지님을 알 수 있는데, 이는 계단행렬이 대각행렬 대비 더 많은  $\mathbf{W}$ 의 원소를 포함하기 때문이다.

[0108] 그리고 NS(Neumann Series)를 사용하였을 때, 더욱 높은 MSE 성능을 지님을 알 수 있다. 그러나 유저 수가 증가할수록 NS를 사용하였을 때의 결과는 NS를 사용하지 않았을 때의 결과에 수렴함을 알 수 있는데, 이는 도 8의 결과에서처럼 유저 수가 증가함에 따라  $\mathbf{W}$ 의 대각지배성 크기가 작아져 NS로 인한 효과가 미미해지기 때문이다.

[0109] 도 10은 반복횟수에 따른 정규화된 유클리디안 거리를 나타낸 도면이다

[0110] 정규화된 유클리디안 거리는 도 4에서 처럼 반복횟수가 증가함에 따라 감소함수 형태를 지닌다. 그리고 계단행렬을 이용하였을 때의 정규화된 유클리디안 거리는 대각행렬을 이용하였을 때의 정규화된 유클리디안 거리보다 높은 수렴속도를 지님을 알 수 있다. 또한, 유저 수가 증가함에 따라 정규화된 유클리디안 거리가 더 큰 것을 알 수 있는데, 이는 도 8의 결과에서처럼 유저 수가 증가함에 따라  $\mathbf{W}$ 의 대각지배성 크기가 작아지기 때문이다.

[0111] 도 11은  $N_t=100$  일 때, 유저 수에 따라 GS 프리코딩이 최적의 오류 성능을 지니기 위해 요구되는 최소한의 반복 횟수 ( $i_{Opt}$ )를 나타낸다. 이러한 최소한의 반복횟수는 사전에 시뮬레이션으로 미리 구한 값(정답값)에 해당한다.

[0112] 도 12는  $100 \times 20$  및  $100 \times 30$  시스템에서 반복횟수 추정 기법을 사용하지 않은 종래의 GS 프리코딩, 본 발명의 반복횟수 추정 기법을 사용한 GS 프리코딩, 그리고 ZF 프리코딩의 BER(Bit Error Rate) 성능을 나타낸 도면이다.

[0113] 도 12에서  $i_{Avg}$ 는 100,000번의 랜덤한 환경에서 성능 측정을 진행하면서 추정된 평균 반복횟수이다. 반복횟수 오차를 정량적으로 표현하기 위해 유저 수가  $m$  일 때의 반복횟수 추정 오차  $\delta_m$ 은 다음과 같이 정의된다.

수학식 15

$$\delta_m = |i_{Opt} - i_{Avg}|$$

[0114]

[0115] 도 12에서  $\delta_{20} = 0.08$  이고,  $\delta_{30} = 0.16$  이다. 본 발명의 실시예에 따른 최적 반복횟수 추정 기법을 이용한 결과,  $100 \times 20$  및  $100 \times 30$  시스템 모두 반복횟수 추정 오차가 매우 작음을 알 수 있다. 즉, 추정된 최종 반

복 횡수가 정답 값  $(i_{opt})$  에 가까운 것을 알 수 있다. 또한, 유저 수가 증가할수록 반복횟수 추정 오차가 증가함을 알 수 있는데, 이는 도 8의 결과에서처럼 유저 수가 증가함에 따라  $W$ 의 대각지배성 크기가 작아지기 때문이다.

[0116] 도 13은 100×40 및 100×50 시스템에서 반복횟수 추정 기법을 사용하지 않은 종래의 GS 프리코딩, 본 발명의 반복횟수 추정 기법을 사용한 GS 프리코딩, 그리고 ZF 프리코딩의 BER 성능을 나타낸 도면이다.

[0117] 도 13에서  $\delta_{40} = 0.22$  이고,  $\delta_{50} = 0.27$  이다. 100×40 및 100×50 시스템 모두 반복횟수 추정 오차가 0.3 이하로 작음을 알 수 있다. 그러나, 도 13의 경우 도 12보다 유저 수가 많으므로, 도 12의 결과보다 반복횟수 추정 오차가 약간 크지만, 1 이하의 오차를 지니므로 최적의 오류 성능을 지니는데 있어서 반복횟수 추정 성능이 우수함을 알 수 있다.

[0118] 도 14는 반복횟수 추정 기법을 사용하지 않은 종래의 GS 프리코딩, 본 발명에서의 반복횟수 추정 기법을 사용한 GS 프리코딩 그리고 ZF 프리코딩의 곱셈 연산량을 나타낸 도면이다.

[0119] 도 14의 결과로부터, 본 발명의 반복횟수 추정 기법을 이용한 GS 프리코딩은 ZF 프리코딩보다 곱셈 연산량이 낮을 뿐만 아니라, 반복횟수 추정 기법을 사용하지 않은 종래의 GS 프리코딩과는 거의 유사한 곱셈 연산량을 지닐 수 있다. 이는 반복횟수를 추정함에 있어 필요한 연산은 오로지 정규화된 유클리디안 거리를 계산하는 것으로  $iN_u$ 의 곱셈 연산량만 요구되기 때문이다.

[0120] 이와 같이, 본 발명은 신호를 송신하기 전에 GS 프리코딩에 사용되는 최적의 반복횟수를 현재 시스템 환경에 맞게 적응적으로 결정함으로써, ZF 프리코딩 보다는 낮은 복잡도를 가지면서, 주어진 반복횟수에 따라 동작하는 종래의 GS 기법보다는 복잡도를 줄일 수 있다.

[0121] 요약하면, 본 발명의 실시예는 GS 프리코딩의 반복횟수를 추정하기 위해 복잡한 closed-form solution을 해결하는 것이 아닌 상대적인 방법을 이용한다. 즉, GS 프리코딩은 반복횟수가 증가할수록 ZF 해에 근사함을 이용하여, 현재의 GS 심볼과 이전의 GS 심볼 간의 유클리디안 거리를 구한다. 이때, 유클리디안 거리를 비율로 표현하기 위해 정규화된 유클리디안 거리를 구하여, 유클리디안 거리의 변화율이 1% 이하이면 이를 최적의 반복횟수로 추정한다. 또한, GS 프리코딩은 낮은 복잡도의 ZF 프리코딩이므로 GS 프리코딩이 ZF 프리코딩보다 높은 복잡도를 지니지 않도록, 복잡도를 사전에 정량적으로 구하여 최대 반복횟수를 초기화한다.

[0122] 성능 평가 결과, 유저 수가 증가함에 따라 반복횟수 추정 오차가 커지지만, 송신 안테나 개수 대비 유저 수의 비율이 2일 때도 0.3 이하의 반복횟수 추정 오차를 보임으로서 매우 높은 반복횟수 추정 성능을 보였다.

[0123] GS 프리코딩을 통해 최적의 오류 성능을 얻기 위해서 요구되는 반복횟수는 시스템의 규모와 채널 상태에 따라 다르다. 그런데, 제안한 본 발명의 기법에 따르면, 하향링크 대용량 MIMO 시스템에서 데이터를 송신하기 이전에 GS 프리코딩에서 사용되는 최적의 반복횟수를 낮은 복잡도로 결정함으로써, 임의의 환경에서도 사전 테스트를 진행하지 않고도 GS 프리코딩을 통한 최적의 오류 성능을 얻을 수 있다.

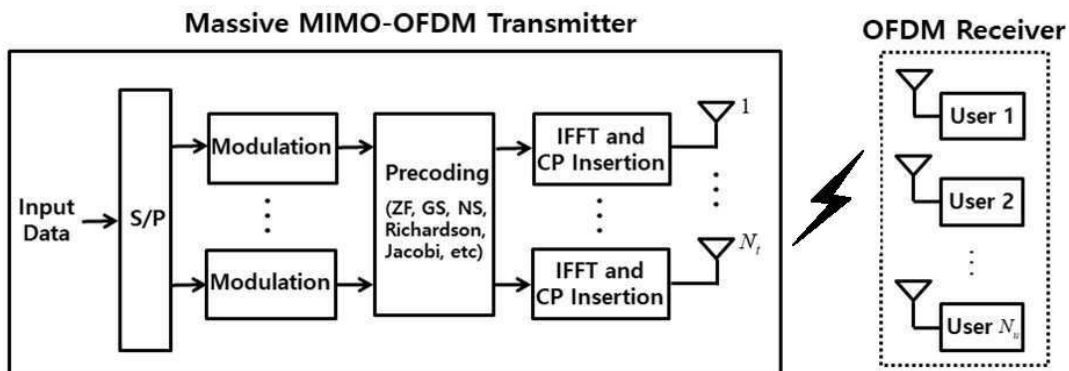
[0124] 본 발명은 도면에 도시된 실시 예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시 예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

**부호의 설명**

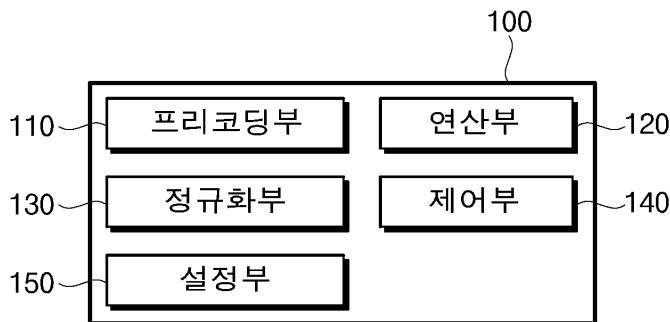
- [0125] 100: GS 프리코딩의 최적 반복횟수 추정 장치
- 110: 프리코딩부                      120: 연산부
- 130: 정규화부                        140: 제어부
- 150: 설정부

도면

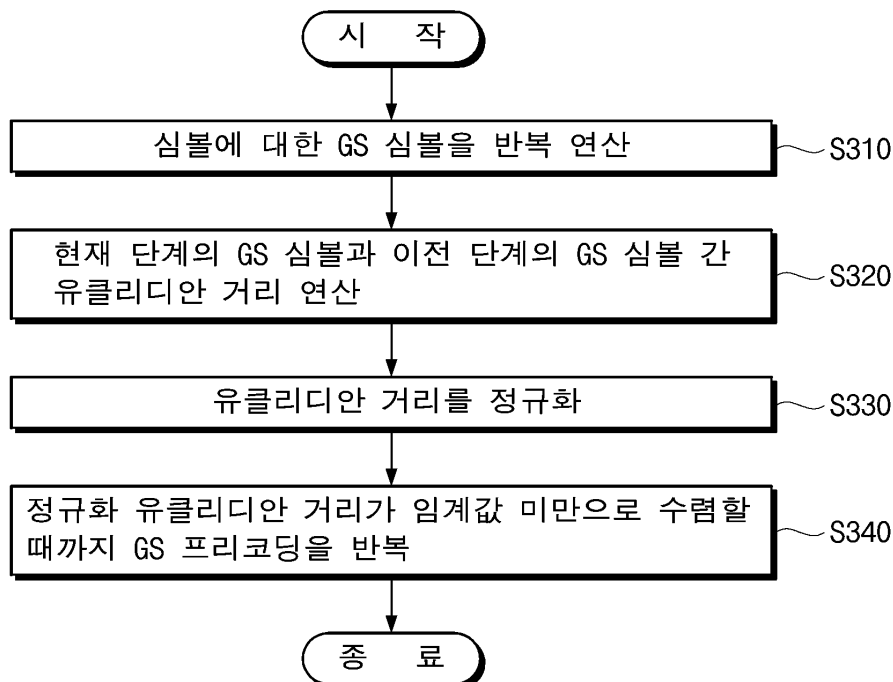
도면1



도면2

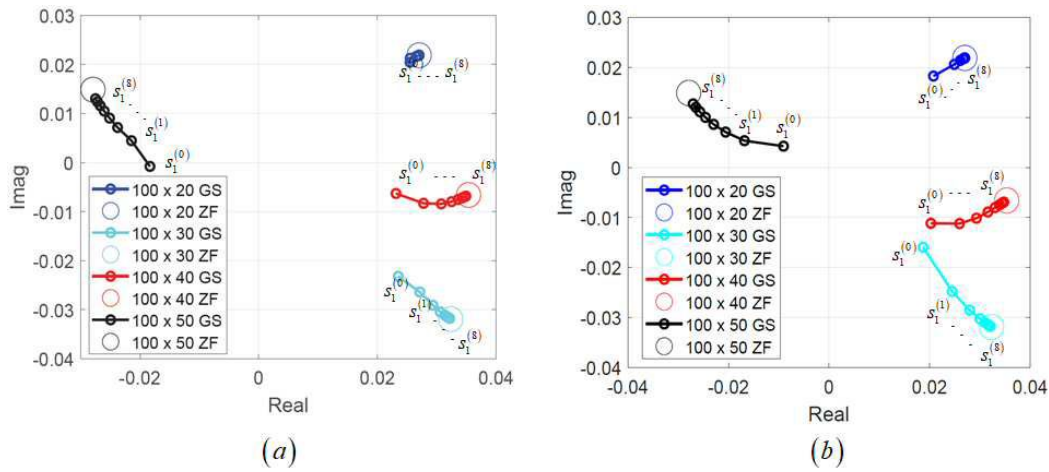


도면3





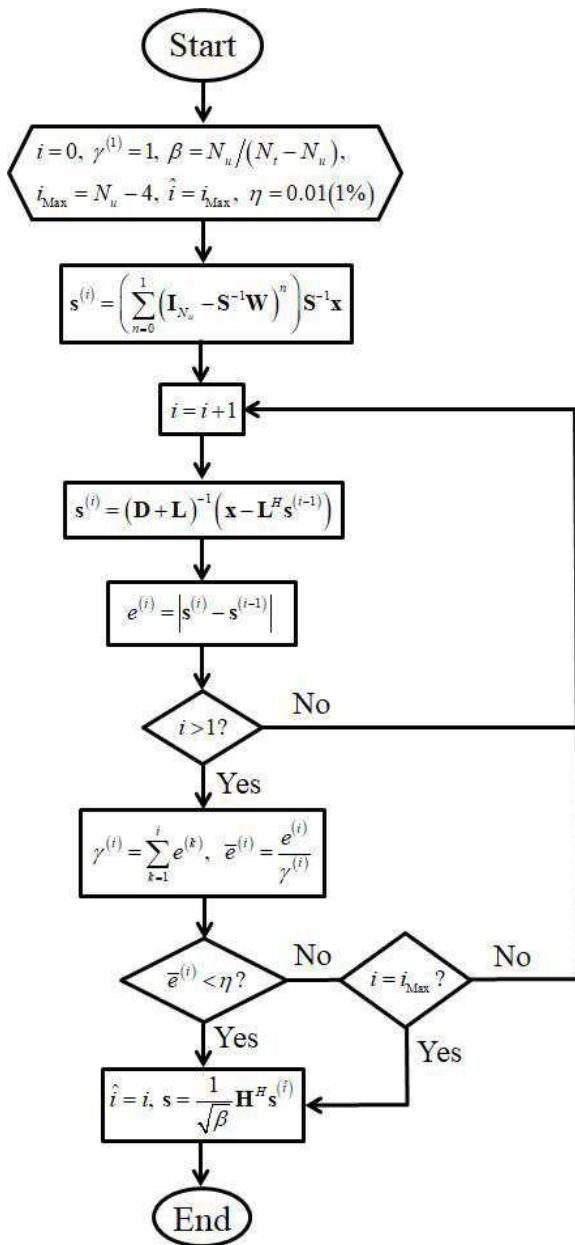
도면4



도면5

| 기법                                   | 곱셈 연산량   |
|--------------------------------------|--|
| GS 프리코딩 ( $C_{GS}$ )                 | $C_{GS} = (i+4)N_u^2 + (N_t+4)N_u - 4$   |
|                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>s^{(0)}</math> : <math>4N_u^2 + 4N_u - 4</math></li> <li>• <math>s^{(i)}</math> : <math>iN_u^2</math></li> <li>• <math>H^H s^{(i)}</math> : <math>N_t N_u</math></li> </ul> |
|                                      |  |
| 개발된 추정 기법을 이용한 GS 프리코딩 ( $C_{Pro}$ ) | $C_{Pro} = (i+4)N_u^2 + (i+N_t+4)N_u - 4$  |
|                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• GS : <math>(i+4)N_u^2 + (i+N_t+4)N_u - 4</math></li> <li>• <math>e^{-(1)}, e^{-(2)}, \dots, e^{-(i)}</math> : <math>iN_u</math></li> </ul>  |
|                                      |  |
| ZF 프리코딩 ( $C_{ZF}$ )                 | $C_{ZF} = N_u^3 + 2N_u^2 + N_t N_u$  |
|                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>W^{-1}</math> : <math>N_u^3 + N_u^2</math> (Gauss-Jordan)</li> <li>• <math>H^H(W^{-1}x)</math> : <math>N_u^2 + N_t N_u</math></li> </ul>                                    |
|                                      |  |

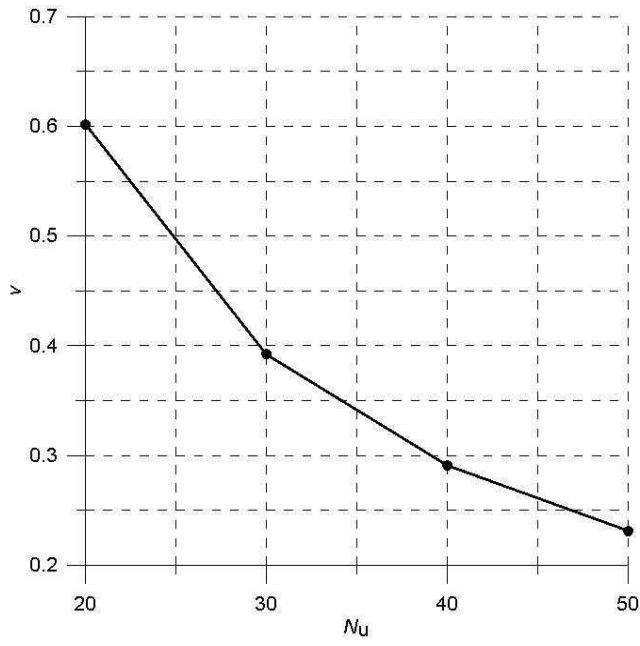
도면6



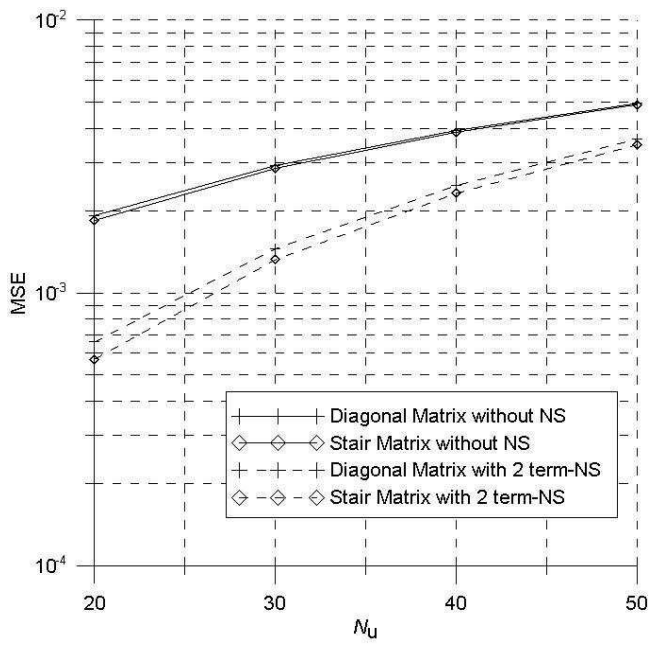
도면7

| 파라미터    | 값 혹은 기법  |
|---------|--|
| 디지털 변조  | 16-QAM(Quadrature Amplitude Modulation)        |
| 채널 코딩   | LDPC(Low Density Parity Check) - 1/2 code rate |
| $N_t$   | 100  |
| $N_u$   | 10, 20, 30, 40, 50                             |
| 채널 모델   | 8개의 다중 경로를 지나는 레일리 페이딩                         |
| 듀플렉싱 모드 | TDD(Time Division Multiplexing)                |
| 채널 추정   | 직교 파일럿 기반의 LS(Least Square)                    |

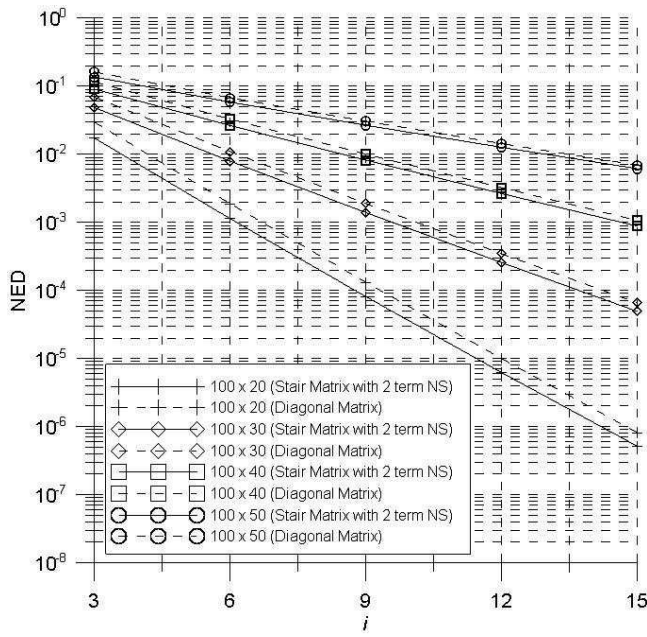
도면8



도면9



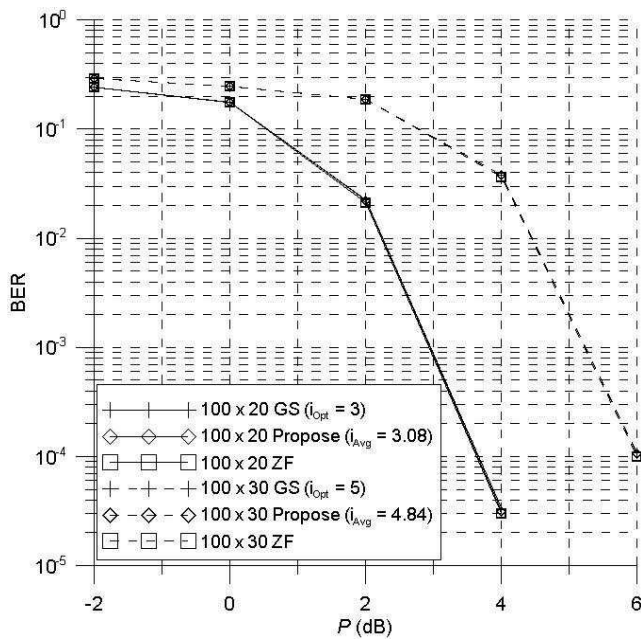
도면10



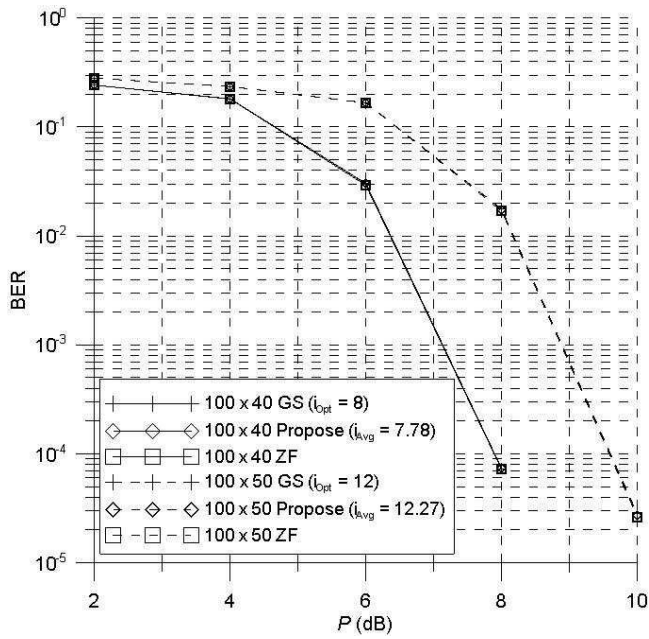
도면11

|           |    |    |    |    |
|-----------|----|----|----|----|
| $N_u$     | 20 | 30 | 40 | 50 |
| $i_{Opt}$ | 3  | 5  | 8  | 12 |

도면12



도면13



도면14

