

	(19) 대한민국특허청(KR) (12) 공개특허공보(A)	(11) 공개번호 10-2012-0055040 (43) 공개일자 2012년05월31일
(51) 국제특허분류(Int. Cl.) H04B 7/14 (2006.01) H04B 7/04 (2006.01) H04W 40/12 (2009.01) (21) 출원번호 10-2010-0116504 (22) 출원일자 2010년11월22일 심사청구일자 2010년11월22일		(71) 출원인 고려대학교 산학협력단 서울 성북구 안암동5가 1 (72) 발명자 이인규 서울특별시 광진구 능동로 90, B동 605호 (자양동, 더 클래식500) 이경재 서울특별시 노원구 동일로196길 34, 고려빌라 205호 (공릉동) (74) 대리인 이전주, 김정훈

전체 청구항 수 : 총 12 항

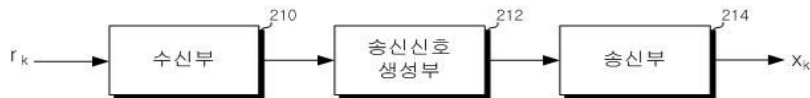
(54) 발명의 명칭 **중폭 전달 기법을 사용하는 다중 안테나 중계 시스템에서 중계 경로 선택장치 및 방법**

(57) 요약

본 발명은 중폭 전달 기법을 사용하는 다중 안테나 중계 시스템에서 채널 상태 정보 (CSI: Channel State Information)를 이용한 에르고딕 용량의 점근적 분석장치 및 방법에 관한 것이다.

이를 위한 바람직한 실시 예로써, 소스 노드, 중계 노드 및 목적 노드 각각에 구비된 안테나 개수의 비율을 기반으로 분류되는 점근적 분석을 통해 용량 최적 중계 행렬을 결정하는 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을 획득하는 방안을 제안한다.

대표도 - 도2



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2010-0017909

부처명 교육과학기술부

연구사업명 중견연구자지원사업 도약 연구

연구과제명 불규칙 행렬이론을 이용한 분산 안테나 기반 다중셀 이동통신 시스템 설계

주관기관 고려대학교 산학협력단

연구기간 2010.05.01 ~ 2011.04.30

특허청구의 범위

청구항 1

소스 노드와 하나 또는 복수의 중계 노드 및 목적 노드를 포함하며, 상기 송신 노드에 의해 전송된 신호를 상기 하나 또는 복수의 중계 노드가 상기 목적 노드로 중계하는 다중 안테나 시스템에서 중계 경로 선택을 위한 에르고딕 용량을 추정하는 방법에 있어서,

제1타입 슬롯에서 상기 소스 노드에 의해 전송된 신호를 수신하는 과정과,

상기 제1타입 슬롯에서 수신한 신호에 소정 중계 전력 제약 조건을 만족하는 용량 최적 중계 행렬을 곱하여 송신할 신호를 생성하는 과정과,

제2타입 슬롯에서 상기 생성한 신호를 상기 목적 노드로 송신하는 과정을 포함하며,

상기 소스 노드, 상기 중계 노드 및 상기 목적 노드 각각에 구비된 안테나 개수의 비율을 기반으로 분류되는 점근적 분석을 통해 상기 용량 최적 중계 행렬을 결정하는 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을 획득함을 특징으로 하는 에르고딕 용량 추정방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 안테나 개수의 비율은,

상기 소스 노드와 상기 목적 노드의 안테나 개수가 고정되고, 상기 중계 노드의 안테나 개수가 많은 제1경우와, 상기 소스 노드와 상기 목적 노드의 안테나 개수가 고정되고, 상기 중계 노드의 안테나 개수가 많은 제2경우 및 상기 소스 노드와 상기 목적 노드의 안테나 개수가 고정되고, 상기 중계 노드의 안테나 개수가 많은 제3경우 중 어느 하나의 경우에 해당함을 특징으로 하는 에르고딕 용량 추정방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 안테나 개수의 비율이 제1경우에 해당하면, 상기 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을

$$\bar{C}_{MNL} = \frac{\min(M, L)}{2} \times \log_2 \left\{ 1 + \frac{P_T P_R N^2}{\sigma_n^2 P_R M N + \sigma_n^2 \min(M, L) (P_T N + \sigma_n^2 M)} \right\} \quad \text{에 의해 획득하며,}$$

여기서 M은 소스 노드의 안테나 개수, N은 중계 노드의 안테나 개수, L은 목적 노드의 안테나 개수, Λ 는 행렬 A의 행렬식(determinant)이고, P_T 와 P_R 각각은 소스 노드에서의 송신 전력과 중계 노드에서의 수신 전력이며, σ_n^2 는 유한 분산 값을 특징으로 하는 에르고딕 용량 추정방법.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 안테나 개수의 비율이 제2경우에 해당하면, 상기 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을

$$\bar{C}_{MNL} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L \log_2 \left[1 + \frac{P_T P_R N (b_{LM} \cdot \mu_k + a_{LN})}{\sigma_n^2 \sigma_k^2 L M + \sigma_n^2 P_R N M + \sigma_k^2 P_T \sum_{i=1}^L (b_{MN} \cdot \mu_i + a_{MN})} \right]$$

에 의해 획득하고,

여기서 M은 소스 노드의 안테나 개수, N은 중계 노드의 안테나 개수, L은 목적 노드의 안테나 개수, 1/2는 반 이중화 모드로 인한 프리로그 인자, P_T 와 P_R 각각은 소스 노드에서의 송신 전력과 중계 노드에서의 수신 전력

이며, a_{MN} 은 $\bar{M} + \sqrt{V}$, b_{MN} 은 $\bar{M} + \sqrt{N} \left(\frac{1}{\sqrt{M}} + \sqrt{V} \right)$, μ_k 는 상수, σ_n^2 는 유한 분산 값을 특징으로 하는 에르고딕 용량 추정방법.

청구항 5

제2항에 있어서,

상기 안테나 개수의 비율이 제3경우에 해당하면, 상기 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을

$$\hat{C}_{MNL} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \log_2 \left[1 + \frac{P_T P_R N (b_{LM} \cdot \mu_k + a_{LN})}{\sigma_s^2 M (P_T N + \sigma_s^2 M) + \sigma_s^2 P_R M (b_{LN} \cdot \mu_k + a_{LN})} \right]$$

에 의해 획득하고,

여기서 M은 소스 노드의 안테나 개수, N은 중계 노드의 안테나 개수, L은 목적 노드의 안테나 개수, 1/2는 반 이중화 모드로 인한 프리로그 인자, P_T 와 P_R 각각은 소스 노드에서의 송신 전력과 중계 노드에서의 수신 전력

이며, a_{LN} 은 $\bar{L} + \sqrt{N}$, b_{LN} 은 $\bar{L} + \sqrt{N} \left(\frac{1}{\sqrt{L}} + \frac{1}{\sqrt{N}} \right)$, μ_k 는 상수, σ_s^2 는 유한 분산 값을 특징으로 하는 에르고딕 용량 추정방법.

청구항 6

제3항 내지 제5항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 상수 μ_k 는,

μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5
-1.7711	-3.6754	-5.1713	-6.4745	-7.6572
μ_6	μ_7	μ_8	μ_9	μ_{10}
-8.7545	-9.7867	-10.7670	-11.7045	-12.6058

에 의해 결정함을 특징으로 하는 에르고딕 용량 추정방법.

청구항 7

소스 노드와 하나 또는 복수의 중계 노드 및 목적 노드를 포함하는 다중 안테나 시스템에서 상기 송신 노드에 의해 전송된 신호를 상기 목적 노드로 중계하기 위한 중계 경로를 선택하는 중계 노드에 있어서,

제1타임 슬롯에서 상기 소스 노드에 의해 전송된 신호를 수신하는 수신부와,

상기 제1타임 슬롯에서 수신한 신호에 소정 중계 전력 제약 조건을 만족하는 용량 최적 중계 행렬을 곱하여 송신할 신호를 생성하는 송신 신호 생성부와,

제2타임 슬롯에서 상기 생성한 신호를 상기 목적 노드로 송신하는 송신부를 포함하며,

상기 송신 신호 생성부는,

상기 소스 노드, 상기 중계 노드 및 상기 목적 노드 각각에 구비된 안테나 개수의 비율을 기반으로 분류되는 점근적 분석을 통해 상기 용량 최적 중계 행렬을 결정하는 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을 획득함을 특징으로 하는 중계 노드.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 안테나 개수의 비율은,

상기 소스 노드와 상기 목적 노드의 안테나 개수가 고정되고, 상기 중계 노드의 안테나 개수가 많은 제1경우와, 상기 소스 노드와 상기 목적 노드의 안테나 개수가 고정되고, 상기 중계 노드의 안테나 개수가 많은 제2경우 및 상기 소스 노드와 상기 목적 노드의 안테나 개수가 고정되고, 상기 중계 노드의 안테나 개수가 많은 제3경우 중 어느 하나의 경우에 해당함을 특징으로 하는 중계 노드.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 송신 신호 생성부는,

상기 안테나 개수의 비율이 제1경우에 해당하면, 상기 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을

$$\bar{C}_{MNL} = \frac{\min(M, L)}{2} \times \log_2 \left\{ 1 + \frac{P_T P_R N^2}{\sigma_n^2 P_R M N + \sigma_n^2 \min(M, L) (P_T N + \sigma_n^2 M)} \right\}$$

에 의해 획득하며,

여기서 M은 소스 노드의 안테나 개수, N은 중계 노드의 안테나 개수, L은 목적 노드의 안테나 개수, $\mathbf{A}$ 는 행렬 A의 행렬식(determinant)이고, P_T 와 P_R 각각은 소스 노드에서의 송신 전력과 중계 노드에서의 수신 전력이며, σ_n^2 는 유한 분산 값을 특징으로 하는 중계 노드.

청구항 10

제8항에 있어서,

상기 송신 신호 생성부는,

상기 안테나 개수의 비율이 제2경우에 해당하면, 상기 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을

$$\bar{C}_{MNL} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L \log_2 \left[1 + \frac{P_T P_R N (b_{LM} \cdot \mu_k + a_{LN})}{\sigma_n^2 a_k^2 L M + \sigma_n^2 P_R N M + \sigma_n^2 P_T \sum_{i=1}^L (b_{MN} \cdot \mu_i + a_{MN})} \right]$$

에 의해 획득하고,

여기서 M은 소스 노드의 안테나 개수, N은 중계 노드의 안테나 개수, L은 목적 노드의 안테나 개수, 1/2는 반 이중화 모드로 인한 프리로그 인자, P_T 와 P_R 각각은 소스 노드에서의 송신 전력과 중계 노드에서의 수신 전력

이며, a_{MN} 은 $\bar{M} + \sqrt{N}$, b_{MN} 은 $\bar{L} + \sqrt{N} \left(\frac{1}{\sqrt{M}} + \frac{1}{\sqrt{N}} \right)$, μ_k 는 상수, σ_n^2 는 유한 분산 값을 특징으로 하는 중계 노드.

청구항 11

제8항에 있어서,

상기 송신 신호 생성부는,

상기 안테나 개수의 비율이 제3경우에 해당하면, 상기 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을

$$\bar{C}_{MNL} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \log_2 \left[1 + \frac{P_T P_R N (b_{LM} \cdot \mu_k + a_{LN})}{\sigma_n^2 M (P_T N + \sigma_n^2 M) + \sigma_n^2 P_R M (b_{LN} \cdot \mu_k + a_{LN})} \right]$$

에 의해 획득하고,

여기서 M은 소스 노드의 안테나 개수, N은 중계 노드의 안테나 개수, L은 목적 노드의 안테나 개수, 1/2는 반 이중화 모드로 인한 프리로그 인자, P_T 와 P_R 각각은 소스 노드에서의 송신 전력과 중계 노드에서의 수신 전력

이며, a_{LN} 은 $\bar{L} + \sqrt{N}$, b_{LN} 은 $\bar{L} + \sqrt{N} \left(\frac{1}{\sqrt{L}} + \frac{1}{\sqrt{N}} \right)$, μ_k 는 상수, σ_n^2 는 유한 분산 값을 특징으로 하는 중계 노드.

청구항 12

제9항 내지 제11항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 상수 μ_k 는,

μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5
-1.7711	-3.6754	-5.1713	-6.4745	-7.6572
μ_6	μ_7	μ_8	μ_9	μ_{10}
-8.7545	-9.7867	-10.7670	-11.7045	-12.6058

에 의해 결정함을 특징으로 하는 중계 노드.

명세서

기술 분야

[0001] 본 발명은 증폭 전달 기법을 사용하는 다중 안테나 중계 시스템에서 중계 경로를 선택하기 위한 장치 및 방법에 관한 것으로, 특히 채널 상태 정보 (CSI: Channel State Information)를 이용한 에르고딕 용량의 점근적 분석을 통해 중계 경로를 선택하는 장치 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 일반적인 무선통신시스템에서의 데이터 송신 및 수신은 두 개의 통신장치를 연결하는 직접적인 링크를 통하여 이루어진다. 이때 상기 두 개의 통신장치는 이동성을 갖는 것과는 무관하다. 일 예로 상기 두 개의 통신장치는 고정된 기지국과 이동이 가능한 단말이 될 수 있다.

[0003] 하지만 직접적인 링크를 통해 데이터를 송신 및 수신하는 방식은 기지국의 셀 반경이 클 경우 안정된 통신 품질을 보장하기 위하여 많은 소비 전력이 필요하다. 한편 기지국의 셀 반경이 작을 경우에는 더 많은 기지국의 설치가 필요하여 높은 초기 비용과 이를 유지 관리하는 측면에서 경제적이지 못하다.

[0004] 따라서 무선통신서비스의 품질을 보장하기 위해 고정된 중계기나 이동성을 갖는 중계기 및 단말을 이용하여 데이터 송신 및 수신이 가능한 영역을 확장할 수 있다. 이러한 중계 네트워크는 기지국 증설 비용과 유지비용을 줄이는 동시에 기지국의 셀 반경을 확대시킬 수 있고 데이터의 전송량을 증가시킬 수 있다.

[0005] 상기 중계 네트워크의 용량을 개선하기 위해, 다중 안테나들은 점대점 다중입력 다중출력(MIMO: Multiple Input Multiple Output) 시스템들에서 관찰되는 것과 유사한 성능 혜택을 얻기 위해 고려될 수 있다. 상기 MIMO 중계 시스템들의 용량은 이전에도 분석되어 왔지만, 일부 특별한 경우를 제외하고는 여전히 공개적인 문제로 남아있다.

[0006] 최근 고유 값 분해 (SVD: Singular Value Decomposition)에 기반한 선형 기술이 채널 상태 정보 (CSI: Channel State Information)가 중계 시 이용 가능한 경우 MIMO 증폭-전달 (AF: Amplify-and-Forward) 중계 시스템들의 용량을 달성함을 나타내고 있다.

[0007] 상기 중계 기법 중에 하나인 AF (Amplify-and-Forward) 중계 방식은 DF (Decode-and-Forward) 중계 방식에 비하여 간단한 구조와 낮은 복잡성을 가지고 있지만 잡음을 증폭시킬 수 있다는 단점이 있다. 상기 DF 중계방식은 보다 지능화된 중계방식으로 구조가 복잡해지는 단점을 가지고 있다.

[0008] 실제로 중계 네트워크에서 AF 중계 방식을 지원하는 중계 노드는 정보를 복호하지 않고 수신된 기저대역 신호만을 선형적으로 처리하므로, DF 중계 방식을 지원하는 중계 노드에 비해 단순한 구현과 낮은 계산 복잡도라는 장점을 가지고 있다. 따라서 AF MIMO 중계 시스템들의 용량 분석은 실제 중계 시스템들을 설계하는데 있어 중요하다.

[0009] 이러한 이유로 중계 노드에서 CSI가 존재하지 않는 “순수(naive)” MIMO AF 중계 채널들의 에르고딕 용량이 분석적으로 연구되었다. 여기서 단위 행렬은 중계 필터 행렬로서 이용된다. 하지만 순수 AF 구조의 성능은 CSI를 이용하는 SVD 기반 구조에 대해 현저히 성능 저하를 야기할 수 있다.

[0010] 따라서 용량 최적 SVD 기반 중계 방법이 이용되는 중계 및 목적지 노드들에서 CSI를 갖는 MIMO AF 시스템들의 에르고딕 용량을 예측하기 위한 방안 마련이 절실히 요구되었다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 바람직한 실시 예에서는 AF 중계 방식을 지원하는 다중 안테나 시스템에서 CSI를 기반으로 정확한 에르고딕 용량을 획득하기 위한 방법 및 이를 지원하는 중계 노드를 제안한다.

[0012] 또한 바람직한 실시 예에서는 AF 중계 방식을 지원하는 다중 안테나 시스템에서 점근적 분석을 통해 정확한 에르고딕 용량을 획득하기 위한 방법 및 이를 지원하는 중계 노드를 제안한다.

[0013] 또한 바람직한 실시 예에서는 AF 중계 방식을 지원하는 다중 안테나 시스템에서 소스 노드, 중계 노드 및 목적 노드 간의 안테나 비율을 기반으로 구분되는 조건 별로 최적의 에르고딕 용량을 산출하기 위한 방법 및 이를 지원하는 중계 노드를 제안한다.

[0014] 또한 바람직한 실시 예에서는 AF 중계 방식을 지원하는 다중 안테나 시스템에서 소스 노드, 중계 노드 및 목적 노드 간의 안테나 비율을 기반으로 산출된 최적의 에르고딕 용량에 의해 중계 경로를 선택하는 장치 및 방법을 제안한다.

과제의 해결 수단

[0015] 바람직한 실시 예에 따른 소스 노드와 하나 또는 복수의 중계 노드 및 목적 노드를 포함하며, 상기 송신 노드에 의해 전송된 신호를 상기 하나 또는 복수의 중계 노드가 상기 목적 노드로 중계하는 다중 안테나 시스템에서 중계 경로 선택을 위한 에르고딕 용량을 추정하는 방법은, 제1타임 슬롯에서 상기 소스 노드에 의해 전송된 신호를 수신하는 과정과, 상기 제1타임 슬롯에서 수신한 신호에 소정 중계 전력 제약 조건을 만족하는 용량 최적 중계 행렬을 곱하여 송신할 신호를 생성하는 과정과, 제2타임 슬롯에서 상기 생성한 신호를 상기 목적 노드로 송신하는 과정을 포함하며,

[0016] 상기 소스 노드, 상기 중계 노드 및 상기 목적 노드 각각에 구비된 안테나 개수의 비율을 기반으로 분류되는 점근적 분석을 통해 상기 용량 최적 중계 행렬을 결정하는 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을 획득함을 특징으로 한다.

[0017] 또한 바람직한 실시 예에 따른 소스 노드와 하나 또는 복수의 중계 노드 및 목적 노드를 포함하는 다중 안테나 시스템에서 상기 송신 노드에 의해 전송된 신호를 상기 목적 노드로 중계하기 위한 중계 경로를 선택하는 중계 노드는, 제1타임 슬롯에서 상기 소스 노드에 의해 전송된 신호를 수신하는 수신부와, 상기 제1타임 슬롯에서 수신한 신호에 소정 중계 전력 제약 조건을 만족하는 용량 최적 중계 행렬을 곱하여 송신할 신호를 생성하는 송신 신호 생성부와, 제2타임 슬롯에서 상기 생성한 신호를 상기 목적 노드로 송신하는 송신부를 포함하며,

[0018] 상기 송신 신호 생성부는 상기 소스 노드, 상기 중계 노드 및 상기 목적 노드 각각에 구비된 안테나 개수의 비율을 기반으로 분류되는 점근적 분석을 통해 상기 용량 최적 중계 행렬을 결정하는 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을 획득함을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0019] 바람직한 실시 예에서는 용량 달성 SVD 기반 구조를 갖는 MIMO AF 중계 시스템에서 SVD가 생성하는 스트림 당 에르고딕 용량을 얻기 위해 Wishart 행렬들의 고유 값들의 점근적 특성을 이용하였다.

[0020] 이로 인해 점근적 분석에도 불구하고, 적절한 수의 안테나들의 경우에도 에르고딕 용량에 대해 정확한 추정 값을 생성하며, MIMO AF 중계 네트워크들에서의 시스템 파라미터들을 설계하는데 유용한 효과를 얻을 수 있다. 또한 에르고딕 용량의 정확한 추정 값에 의해 최적의 중계 경로를 선택할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0021] 도 1은 본 발명의 실시 예를 적용하기 위한 복수의 중계 노드를 구비하는 무선통신시스템의 구성을 보이고 있는 도면;

도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 다중 안테나 시스템에서 송신 노드에 의해 전송된 신호를 목적 노드로 중계하기 위한 중계 노드의 구성을 보이고 있는 도면;

도 3에서는 서로 다른 중계 안테나들의 수 N 에 따른 다양한 SNR들에 대한 제1경우에서의 분석 결과를 도시하고 있는 도면;

도 4는 다양한 M 에 대한 실험 에르고딕 용량을 폐쇄형 수식과 비교하고 있는 도면.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0022] 하기의 설명에서는 본 발명에 따른 동작을 이해하는데 필요한 부분만이 설명되며 그 이외 부분의 설명은 본 발명의 요지를 흐트러뜨리지 않도록 생략될 것이라는 것을 유의하여야 한다.

[0023] 후술될 바람직한 실시 예에서는 용량 최적 SVD 기반 중계 방법이 이용되는 중계 및 목적지 노드들에서 CSI를 갖는 MIMO AF 시스템들의 에르고딕 용량에 대한 예측을 통해 최적의 중계 경로를 선택하는 방안을 제안할 것

이다. 이때 순시 용량(instantaneous capacity)의 예측 동작이 채널 분포에 걸쳐 수행되어야 하므로, 정확한 에르고딕 용량의 산출은 매우 복잡하다. 또한 폐쇄형 솔루션의 부재로 인해 유용한 통찰(insights)을 제공하지 못한다.

[0024] 따라서 바람직한 실시 예에서는 다양한 점근적 구조들에서 복잡한 Wishart 행렬의 고유 값 분포를 위해 Tracy-Widom 법칙을 이용함으로써, 통찰력 있는 관찰을 제공하기 위해 MIMO AF 시스템의 에르고딕 용량을 예측하기 위한 새로운 점근적 폐쇄형 방안에 따른 수식들을 도출할 것이다. 여기서 3가지 점근적 분석들, 즉 i) 많은 중계 노드의 안테나 수와 고정된 소스와 목적 노드의 안테나 수, ii) 많은 소스 및 중계 노드의 안테나 수와 고정된 목적지 노드의 안테나 수 및 iii) 많은 중계 및 목적 노드의 안테나 수와 고정된 소스 노드의 안테나 수에 대한 분석을 고려한다.

[0025] 뿐만 아니라 후술될 바람직한 실시 예는 단일 중계 노드를 고려하고 있지만, 분석된 결과들은 다중 중계 노드들과 밀집된 협력 중계 네트워크들의 에르고딕 용량의 상한 (upper bound)으로서 이용될 수 있다.

[0026] 그리고 획득한 폐쇄형 에르고딕 용량으로부터, 소스 노드의 안테나 수가 목적 노드의 안테나 수 보다 더 커지게 되면, 많은 중계 노드의 안테나들이 가진 용량이 감소된다. 이러한 현상은 다중 사용자 다이버시티 시스템들에서 관찰되는 채널 하드닝 효과와 비슷하며, 이는 정보 이론적 관점에서 전체 유효(effective) 채널의 순위(rank)보다 더 많이 소스 노드의 안테나를 증가시키는 것이 바람직하지 않다는 것을 의미한다.

[0027] 따라서 후술될 바람직한 실시 예에서는 MIMO AF 중계 채널들에 대한 시스템에 대해 설명하고, 새로운 에르고딕 용량 수식들에 의해 에르고딕 용량을 예측하는 구체적인 동작에 대해 설명할 것이다. 그리고 시뮬레이션 결과를 통해 바람직한 실시 예로 인한 성능 향상에 대해 살펴보도록 한다.

[0028] 이하, 본 발명에 따른 바람직한 실시 예를 첨부한 도면을 참조하여 상세히 설명한다.

[0029] 도 1은 본 발명의 실시 예를 적용하기 위한 복수의 중계 노드를 구비하는 무선통신시스템의 구성을 보이고 있다.

[0030] 도 1을 참조하면, 소스 노드 S는 K개의 중계 노드들 R_1 내지 R_K 중 적어도 하나의 중계 노드 $R_k (1 \leq k \leq K)$ 를 경유하여 목적지 노드 D와의 통신을 수행한다. 상기 소스 노드 S는 M개의 안테나를 구비하고, 상기 K개의 중계 노드들 R_1 내지 R_K 각각은 N개의 안테나를 구비하며, 상기 목적 노드 D는 L개의 안테나를 구비한다.

[0031] 본 발명의 실시 예에서는 큰 경로 손실로 상기 소스 노드 S와 상기 목적지 노드 D 사이의 직접 링크를 고려하지 않으며, 상기 K개의 중계 노드들 R_1 내지 R_K 과 상기 목적 노드 D는 모든 채널 상태 정보 (Channel State Information, CSI)를 가지나 상기 소스 노드 S는 그렇지 않는 것으로 가정한다. 그리고 모든 페이딩 채널들은 모든 주파수에서 균일하게 발생하는 것을 가정한다.

[0032] 상기 소스 노드 S는 제1타임 슬롯 구간에서 상기 K개의 중계 노드들 R_1 내지 R_K 에게 신호 s를 전송하며, 상기 K개의 중계 노드들 R_1 내지 R_K 각각은 상기 소스 노드 S로부터 전송된 신호를 수신한다. 예컨대 상기 K개의 중계 노드들 R_1 내지 R_K 중 임의의 중계 노드 R_k 에서 수신된 N차의 수신 신호 벡터 r_k 는 하기 <수학식 1>과 같이 주어진다.

수학식 1

[0033]
$$r_k = H_k s + n_k$$

[0034] 여기서 H_k 는 소스 노드 S와 k번째 중계 노드 R_k 간의 $N \times M$ 채널 행렬을 의미하며, n_k 는 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 혼합백색잡음 (AWGN: Additive White Gaussian Noise) 벡터를 의미한다. 즉 상기 n_k 는 제로 평균과 $E(nn^*) = \sigma_n^2 I_N$ 을 가진 부가 복소 가우시안 잡음 벡터 (additive complex Gaussian noise vector)를 나타낸다.

[0035] 그리고 s는 $E(ss^*) = \frac{P_T}{M} I_M$ 을 갖는 M 차원 송신 신호 벡터를 나타낸다. 여기서, P_T 는 소스에서의 전체 전

송 전력을 나타내고, I_N , $(\cdot)^*$ 및 ε 은 각각 N 차원 단위 행렬, 켤레 전치 (conjugate transpose) 및 예측 연산자를 나타낸다.

[0036] 상기 K 개의 중계 노드들 R_1 내지 R_K 는 상기 수신한 신호 r_1 내지 r_K 에 $N \times 1$ 의 중계 가중치 행렬 (또는 용량 최적 중계 행렬) F_1 내지 F_K 를 송신한 신호 x_1 내지 x_K 를 제2타임 슬롯 구간에서 상기 목적 노드 D 로 전송한다.

[0037] 예컨대 상기 K 개의 중계 노드들 R_1 내지 R_K 중 임의의 중계 노드 R_k 에서 송신되는 신호 벡터 x_k 는 하기 <수학식 2>과 같이 주어진다.

수학식 2

[0038]
$$x_k = F_k r_k = F_k H_k s + F_k n_k$$

[0039] 여기서 F_k 는 k 번째 중계 노드에서의 중계 가중치 행렬로써, k 번째 중계 전력 제약 (constraint) 조건 ($\varepsilon \{ \text{Tr}(xx^*) \} \leq P_R$)을 만족하여야 한다. 이는 하기 <수학식 3>으로 나타낼 수 있다.

수학식 3

[0040]
$$\text{TR} \left\{ F \left(\frac{P_T}{M} H H^* + \sigma_n^2 I_N \right) F^* \right\} \leq P_R$$

[0041] 여기서 그리고 $\text{Tr}\{A\}$ 은 행렬 A 의 대각 합 (trace)을 의미하며, I_N 은 N 크기의 단위 행렬을 의미한다. 그리고 P_T 는 소스 노드에서의 전체 전송 전력을 의미하고, M 은 소스 노드의 안테나 수를 의미한다.

[0042] 상기 K 개의 중계 노드들 R_1 내지 R_K 각각은 상기 <수학식 2>와 같이 주어진 신호 x_1 내지 x_K 를 목적 노드 D 로 전송한다. 상기 목적 노드 D 는 상기 K 개의 중계 노드들 R_1 내지 R_K 각각으로부터 전송된 신호를 수신한다.

[0043] 상기 목적 노드 D 에 의해 수신된 신호 y 는 하기 <수학식 4>로 정의할 수 있다.

수학식 4

[0044]
$$y = \sum_{k=1}^K G_k F_k H_k s + \sum_{k=1}^K G_k F_k n_k + z$$

[0045] 여기서 G_k 는 k 번째 중계 노드와 목적 노드 D 간의 $L \times N$ 의 채널 행렬을 의미하고, z 는 평균이 0이고 분산이 σ_z^2 인 혼합백색잡음 (AWGN: Additive White Gaussian Noise) 벡터를 의미한다. 즉 상기 z 는 제로 평균과 공분산 행렬 $\sigma_z^2 I_L$ 을 갖는 복소 백색 가우시안 잡음 벡터를 나타낸다. 또한 채널 행렬들 H 와 G 의 요소들은 제로 평균과 단위 분산(variance)을 갖는 독립적이고 동일하게 분포된 (i.i.d) 복소 가우시안 분포를 갖는다.

[0046] 한편 SVD 기반의 선형 처리에 의하면, 점대점 다중 안테나 시스템에서와 같이 다중 중계 채널들의 용량을 달성할 수 있다. 이 경우 용량 최적 중계 행렬 F 는 하기 <수학식 5>와 같이 표현될 수 있다.

수학식 5

[0047]
$$F = V_C \Sigma_F U_H^H$$

[0048] 여기서, Σ_F 는 $\Sigma_F \triangleq \text{diag}[\sqrt{f_1}, \sqrt{f_2}, \dots, \sqrt{f_N}]$ 로서 $N \times N$ 대각 행렬이고, $N \times N$ 단위 행렬들 U_H 과 V_C 는 내림차

순으로 고유 값들을 갖는 채널들 $\mathbf{H} = \mathbf{U}_H \mathbf{\Sigma}_H \mathbf{V}_H^*$ 과 $\mathbf{G} = \mathbf{U}_G \mathbf{\Sigma}_G \mathbf{V}_G^*$ 의 SVD를 통해 획득된다.

상기 <수학식 5>에서의 대각 행렬 $\mathbf{\Sigma}_F$ 을 정의하기 위해 사용된 f_k 는 하기 <수학식 6>으로 정의될 수 있다.

수학식 6

$$f_k = \frac{\alpha_k^2 \left[\sqrt{\frac{P_T^2}{M^2 \sigma_n^4} \alpha_k^2 + 4 \frac{P_T}{M \sigma_n^2} \alpha_k \beta_k \varphi} - \frac{P_T}{M \sigma_n^2} \alpha_k - 2 \right]^+}{2 \beta_k \left(\frac{P_T}{M} \alpha_k + \sigma_n^2 \right)}$$

여기서, α_k 와 β_k 는 각각 $\mathbf{H}\mathbf{H}^*$ 와 $\mathbf{G}^*\mathbf{G}$ 의 k번째 가장 큰 고유 값들을 나타내며, $[x]^+$ 는 $\max\{0, x\}$ 로 정의된다.

그리고 φ 는 하기 <수학식 7>의 고유 솔루션으로 주어진다. 하기 <수학식 7>은 상기 <수학식 5>로 정의되는 용량 최적 중계 행렬을 <수학식 3>에 의해 정의된 중계 전력 제약 조건에 적용함으로써 구해진다.

수학식 7

$$\sum_{k=1}^{\min(M,N,L)} f_k \left(\frac{P_T}{M} \alpha_k + \sigma_n^2 \right) = P_R$$

상기 <수학식 7>에 의하면, 상기 <수학식 6>에서 $k = 1, 2, \dots, \min(M, N, L)$ 에 대해서만 0이 아닌 f_k 를 가지는 것에 유의하여야 한다.

도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 다중 안테나 시스템에서 송신 노드에 의해 전송된 신호를 목적 노드로 중계하기 위한 중계 노드의 구성을 보이고 있다.

도 2를 참조하면, 수신부 (210)는 제1타임 슬롯에서 소스 노드에 의해 전송된 신호를 수신한다. 송신신호 생성부 (212)는 상기 제1타임 슬롯에서 수신한 신호에 소정 중계 전력 제약 조건을 만족하는 용량 최적 중계 행렬을 곱하여 송신할 신호를 생성한다. 상기 송신 신호 생성부 (212)는 소스 노드, 중계 노드 및 목적 노드 각각에 구비된 안테나 개수의 비율을 기반으로 분류되는 점근적 분석을 통해 상기 용량 최적 중계 행렬을 결정하는 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을 획득한다. 상기 에르고딕 용량을 추정하는 구체적인 방안에 대해서는 후술될 것이다.

한편 상기 소스 노드, 중계 노드 및 목적 노드 각각에 구비된 안테나 개수의 비율의 일 예로는 세 가지의 경우로 분류할 수 있다. 해당 세 가지 경우 중 제1경우는 소스 노드와 목적 노드의 안테나 개수가 고정되고, 중계 노드의 안테나 개수가 많은 경우에 해당한다. 그리고 제2경우는 상기 소스 노드와 상기 목적 노드의 안테나 개수가 고정되고, 상기 중계 노드의 안테나 개수가 많은 경우에 해당한다. 마지막으로 제3경우는 상기 소스 노드와 상기 목적 노드의 안테나 개수가 고정되고, 상기 중계 노드의 안테나 개수가 많은 경우에 해당한다.

후술될 에르고딕 용량을 추정하는 구체적인 방안에서는 상기 세 가지 경우 각각에 대해 다양한 점근적 분석들에 의해 에르고딕 용량의 폐쇄적 표현을 획득하는 것에 대해 설명할 것이다.

송신부(214)는 제2타임 슬롯에서 상기 송신신호 생성부(212)에 의해 생성된 신호를 목적 노드로 송신한다.

이하 바람직한 실시 예에 따라 AF 기법에 의해 신호를 중계하는 다중 안테나 시스템에서 점근적 에르고딕 용량을 분석하고, 상기 분석을 통해 원하는 에르고딕 용량을 추정하는 방안에 대해 구체적으로 설명한다.

먼저 앞서 <수학식 4>에 의해 정의된 목적 노드에서의 수신 신호들과 전체 잡음 항들이 제로 평균 원형 대칭 복소 가우시안 분포를 갖는다고 가정한다. 이 경우 AF 기법에 의해 신호를 중계하는 다중 안테나 시스템에서의 순시 용량은 아래 <수학식 8>로 표현될 수 있다.

수학식 8

$$C = \frac{1}{2} \log_2 \left| \mathbf{I}_L + \frac{P_T}{M} \mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{H}^\dagger \mathbf{F}^\dagger \mathbf{G}^\dagger (\sigma_n^2 \mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{F}^\dagger \mathbf{G}^\dagger + \sigma_z^2 \mathbf{I}_L)^{-1} \right|$$

[0062]

[0063] 여기서, 1/2는 프리-로그(pre-log) 인자로써 반 이중화 모드로 인한 것이다. 그리고 Δ 는 행렬 A의 행렬식(determinant)을 나타낸다.

[0064] 이 경우 에르고딕 용량은 상기 <수학식 5>로 정의된 용량 최적 중계 행렬을 이용하고 채널 구현들에 예측을 취함으로써, 하기 <수학식 9>에 의해 얻을 수 있다.

수학식 9

$$\mathcal{E}\{C\} = \sum_{k=1}^{\min(M, N, L)} \mathcal{E}\{C_k\}$$

[0065]

[0066] 여기서, 각 스트림 $\mathcal{E}\{C_k\}$ 의 에르고딕 용량은 하기 <수학식 10>과 같이 정의된다.

수학식 10

$$\mathcal{E}\{C_k\} \triangleq \frac{1}{2} \mathcal{E} \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{P_T}{M} \frac{f_k \alpha_k \beta_k}{\sigma_n^2 f_k \beta_k + \sigma_z^2} \right) \right\}$$

[0067]

[0068] 이 후 상기 <수학식 10>에 의한 예측을 위해 공동 분포 함수들로 Wishart 행렬들 α_k 와 β_k 의 정렬된 고유 값들이 인가된다. 그러나 너무 복잡한 공동 분포로 인해 폐쇄형 솔루션을 도출하기가 어렵다.

[0069] 따라서 에르고딕 용량의 폐쇄형 표현을 얻기 위해서는 다양한 점근적 분석들이 가능하다. 바람직한 실시 예에서는 세 가지의 상황을 고려하여 에르고딕 용량을 추정하는 방안을 마련하고자 한다.

[0070] 첫 번째 경우로 소스 노드와 목적 노드 각각의 안테나 개수 M과 L을 고정하고, 중계 노드의 안테나 개수 N이 상대적으로 큰 경우를 가정한다. 그리고 두 번째 경우로 목적 노드의 안테나 개수 L을 고정하고, 소스 노드와 중계 노드 각각의 안테나 개수 M과 N이 상대적으로 큰 경우를 가정한다. 마지막 세 번째 경우로 소스 노드의 안테나 개수 M을 고정하고, 중계 노드와 목적 노드 각각의 안테나 개수 N과 L이 상대적으로 큰 경우를 가정한다.

A. 제1경우

[0071]

[0072] 이하 앞서 정의된 바와 같이 소스 노드와 목적 노드 각각의 안테나 개수 M과 L을 고정하고, 중계 노드의 안테나 개수 N이 상대적으로 큰 안테나 비율을 갖는 제1경우에 대해 시스템들의 에르고딕 용량을 폐쇄형으로 도출하기 위한 방안에 대해 살펴보도록 한다.

[0073] H와 G의 요소들은 (i.i.d) 가우시안 임의 변수들이어서 강한 수렴에 대한 다양한 조건들이 쉽게 만족되므로, N이 무한대로 가면서 $\mathbf{H}^* \mathbf{H} / N$ 와 $\mathbf{G} \mathbf{G}^* / N$ 는 각각 $\mathbf{I}_M$ 와 $\mathbf{I}_L$ 로 수렴한다는 것에 유의한다. 따라서 고정된 M과 L에 대해서 점근적 고유 값들은 하기 <수학식 11>과 하기 <수학식 12>와 같이 주어진다.

수학식 11

$$\tilde{C}_{MNL} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L \log_2 \left[1 + \frac{P_T P_R N (b_{LM} \cdot \mu_k + a_{LN})}{\sigma_n^2 \sigma_z^2 LM + \sigma_n^2 P_R NM + \sigma_z^2 P_T \sum_{i=1}^L (b_{MN} \cdot \mu_i + a_{MN})} \right]$$

수학식 12

$$\begin{aligned} \mathcal{E}\{C_k\} &= \frac{1}{2} \mathcal{E} \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{P_T P_R N \alpha_k}{\sigma_n^2 P_R NM + \sigma_z^2 P_T \sum_{i=1}^L \alpha_i + \sigma_n^2 \sigma_z^2 LM} \right) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \mathcal{E} \left\{ \log_2 \mathcal{E}\{\Phi_k\} + \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\Phi_k - \mathcal{E}\{\Phi_k\}}{\mathcal{E}\{\Phi_k\}} \right) \right\} - \frac{1}{2} \mathcal{E} \left\{ \log_2 \mathcal{E}\{\Omega_k\} + \log_2 \left(1 + \frac{\Omega_k - \mathcal{E}\{\Omega_k\}}{\mathcal{E}\{\Omega_k\}} \right) \right\} \end{aligned}$$

여기서 α_k 와 β_k 는 하기 <수학식 13>과 <수학식 14>에 의해 각각 정의될 수 있다.

수학식 13

$$\alpha_k \rightarrow N \quad \text{for } k = 1, 2, \dots, M$$

수학식 14

$$\beta_k \rightarrow N \quad \text{for } k = 1, 2, \dots, L$$

상기 <수학식 13>과 <수학식 14>에 의하면, 모든 α_k 와 β_k 는 결정 값(deterministic value) N을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 상기 <수학식 6>에서 이용되는 중계 전력 계수 f_k 는 $k = 1, 2, \dots, \min(M, N, L)$ 에 대해 동일한 값을 가진다.

따라서 상기 <수학식 7>에 의해 주어진 전력 제약으로부터 하기 <수학식 15>와 같이 간단하게 중계 전력 계수 f_k 가 계산될 수 있다.

수학식 15

$$f_k = \frac{P_R}{\min(M, L) \left(\frac{P_T}{M} N + \sigma_n^2 \right)}$$

상기 <수학식 13>, <수학식 14> 및 <수학식 15>를 상기 <수학식 9>와 <수학식 10>에 대입하면, 최종적으로 획득하고자 하는 폐쇄형 에르고딕 용량을 하기 <수학식 16>에 의해 산출할 수 있다.

즉 N이 ∞ 일 때, MIMO AF 중계 시스템들의 에르고딕 용량은 $\lim_{N \rightarrow \infty} [\mathcal{E}\{C\} - \bar{C}_{MNL}] = 0$ 에 따른다. 그리고 크지만 유한의 수 N에 대해서도 에르고딕 용량은 $\mathcal{E}\{C\}$ 는 $\bar{C}_{MNL}$ 으로 근사화 ($\mathcal{E}\{C\} \approx \bar{C}_{MNL}$)된다.

따라서 폐쇄형 에르고딕 용량에 근사 값인 $\bar{C}_{MNL}$ 은 하기 <수학식 16>과 같이 주어진다.

수학식 16

$$\bar{C}_{MNL} = \frac{\min(M, L)}{2} \times \log_2 \left\{ 1 + \frac{P_T P_R N^2}{\sigma_n^2 P_R MN + \sigma_z^2 \min(M, L) (P_T N + \sigma_n^2 M)} \right\}$$

[0086] 하지만 $M > N$ 인 경우, 큰 N 을 갖는 에르고딕 용량은 앞서 개시된 정리에 따라

$$\varepsilon(C) \approx \frac{L}{2} \log_2 \left\{ 1 + \frac{P_T P_R N^2}{\sigma_n^2 P_T N L + \sigma_n^2 (P_R N + \sigma_n^2 L) M} \right\}$$

로 주어진다. 따라서 에르고딕 용량은 M 의 감소 함수임을 관찰할 수 있다. 이는 중계 시스템 $\min(M, N, L)$ 의 순위보다 더 많은 소스 안테나들을 이용하는 것이 유용하지 않음을 의미한다. 이러한 용량 축소 현상은 MIMO 다중 사용자 다이버시티 시스템들에서 발견되는 채널 하드닝 효과와 유사하다.

[0087] 하지만 채널 하드닝 효과와는 달리, 이 용량 축소는 H 가 G 보다 더 큰 순위를 가질 때 유도됨에 주목할 필요가 있다. 즉 소스 노드는 모든 M 개의 송신 안테나들을 따라 송신 전력을 동일하게 분배한다. 하지만 활성 송신 스트림의 수는 상기 <수학식 16>에서와 같이 G 의 순위에 의해 제한된다.

[0088] 따라서, M 이 L 보다 커지면, 스트림 당 소스 송신 전력은 감소되므로 에르고딕 용량도 감소하게 된다.

[0089] B. 제2경우

[0090] 이하 앞서 정의된 바와 같이 목적 노드의 안테나 개수 L 을 고정하고, 소스 노드와 중계 노드 각각의 안테나 개수 M 과 N 이 상대적으로 큰 안테나 비율을 갖는 제1경우에 대해 시스템들의 에르고딕 용량을 폐쇄형으로 도출하기 위한 방안에 대해 살펴보도록 한다.

[0091] 앞서 살펴본 제1경우에서는 고정된 M 과 L 에 대해 간단한 폐쇄형 근사 값(approximation)를 제공하였다. 하지만 M 또는 L 이 커지면서 실험 결과들과는 잘 맞지 않을 수도 있다. 따라서 하기에서의 설명에서는 M 과 N 이 모두 증가되며 L 은 고정되어 있는 경우를 고려한다.

[0092] N 이 무한대로 가고 L 이 고정되었으므로, 앞서 설명한 제1경우에서처럼 GG^+/N 은 I_k 로 수렴된다. 따라서 상기 <수학식 14>에서와 같이 $GG^+ \beta_k$ 의 고유 값은 N 이 된다.

[0093] M 과 N 이 ∞ 인 경우, H^+H 의 k 번째 가장 큰 고유 값의 적절하게 스케일된 버전은 하기 <수학식 17>와 같이 해당 Tracy-Widom 분포로 수렴된다.

수학식 17

[0094]

$$p\left(\frac{\alpha_k - \alpha_{MN}}{b_{MN}}\right) \rightarrow F_2(s, k)$$

[0095] 여기서, $p(\cdot)$ 는 임의 변수의 확률 밀도 함수(pdf)이고, $F_2(s, k)$ 는 분포 함수이다. 상기 분포 함수 $F_2(s, k)$ 는 관련 논문인 'M. Dieng and C. A. Tracy, "Application of random matrix theory to multivariate statistics," available at , pp. 1-81, Mar. 2006.'에 정의되어 있다. 한편 상기 $F_2(s, k)$ 가 M 또는 N 에 의존하지 않음에 유의하는 것이 중요하다.

[0096] 따라서 상기 $F_2(s, k)$ 의 평균과 분산을 μ_k 와 σ_k^2 로 나타내면, α_k 의 평균과 분산은 상기 <수학식 17>로부터 점근적으로 하기 <수학식 18>과 <수학식 19>와 같이 표현된다.

수학식 18

[0097]

$$\varepsilon\{\alpha_k\} \rightarrow b_{MN} \cdot \mu_k + \alpha_{MN}$$

수학식 19

[0098]

$$\varepsilon\{(\alpha_k - \varepsilon\{\alpha_k\})^2\} \rightarrow b_{MN}^2 \cdot \sigma_k^2$$

[0099] 여기서, μ_k 와 σ_k^2 는 관련 논문 ‘F. Bornemann, “On the numerical evaluation of distributions in random matrix theory: A review with an invitation to experimental mathematics,” *available at* <http://arxiv.org/abs/0904.1581>, pp. 1-51, May 2009.’ 에서와 같이 계산될 수 있다. 이때 고정된 k에 대한 μ_k 와 σ_k^2 는 유한 값들임에 유의해야 한다.

[0100] 한편 다양한 k에 대한 μ_k 에 대해 하기 <표 1>에서 정의하고 있다.

표 1

[0101]

μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5
-1.7711	-3.6754	-5.1713	-6.4745	-7.6572
μ_6	μ_7	μ_8	μ_9	μ_{10}
-8.7545	-9.7867	-10.7670	-11.7045	-12.6058

[0102] 한편 하기 <수학식 20>과 <수학식 21>에서 M과 N이 무한대로 가면서 a_{MN} 는 b_{MN} 보다 우세하므로, 상기 <수학식 18>과 <수학식 19>로부터의 $\frac{\varepsilon\{\alpha_1\}}{\varepsilon\{\alpha_k\}}$ 과 $\frac{\varepsilon\{(a_k - \varepsilon\{\alpha_k\})^2\}}{\varepsilon\{\alpha_k\}^2}$ 은 유한 상수들인 μ_k 와 σ_k^2 로 인해 1과 0으로 각각 수렴한다.

수학식 20

[0103]
$$a_{MN} = (\sqrt{M} + \sqrt{N})^2$$

수학식 21

[0104]
$$b_{MN} = (\sqrt{M} + \sqrt{N}) \left(\frac{1}{\sqrt{M}} + \frac{1}{\sqrt{N}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

[0105] 이는 $k \leq L$ 의 경우 α_k 의 값에 비해 무시할만한 분산으로 인해 고유 값들의 비율 α_1/α_k 이 점근적으로 1 이 됨을 의미한다. 이 경우 점근적 고유 값들은 하기 <수학식 22>로 표현될 수 있다.

수학식 22

[0106]
$$\hat{C}_{MNL} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \log_2 \left[1 + \frac{P_T P_R N (b_{LM} \cdot \mu_k + a_{LN})}{\sigma_z^2 M (P_T N + \sigma_n^2 M) + \sigma_n^2 P_R M (b_{LN} \cdot \mu_k + a_{LN})} \right]$$

[0107] 한편 상기 <수학식 6>에서 f_k 는 고유 값들의 비율들에 의존하므로, 상기 f_k 는 k와 독립적인 상수가 된다. 따라서 전력 제약 조건을 정의하고 있는 상기 <수학식 7>을 만족하는 f_k (k=1, 2, ..., L)는 하기 <수학식 23>과 같이 계산된다.

수학식 23

[0108]
$$f_k = \frac{P_R}{\frac{P_T}{M} \sum_{l=1}^L \alpha_l + L \sigma_n^2}$$

[0109] 그 후 상기 <수학식 14>와 <수학식 23>의 결과를 상기 <수학식 10>에 적용하여, 상기 <수학식 12>를 얻게 된다.

[0110] 상기 <수학식 12>에서 Φ_k 와 Ω_k 각각은 하기 <수학식 24>, <수학식 25>와 같이 정의된다.

수학식 24

$$\Phi_k \triangleq \sigma_n^2 P_R N M + \sigma_x^2 P_T \sum_{i=1}^L \alpha_i + \sigma_n^2 \sigma_x^2 L M + P_T P_R N \alpha_k$$

[0111]

수학식 25

$$\Omega_k \triangleq \sigma_n^2 P_R N M + \sigma_x^2 P_T \sum_{i=1}^L \alpha_i + \sigma_n^2 \sigma_x^2 L M$$

[0112]

[0113] 상기 <수학식 12>에서 매클로린 (Maclaurin) 급수를 이용하면, 하기 <수학식 26>과 같은 에르고딕 용량을 얻을 수 있다.

수학식 26

$$\begin{aligned} \varepsilon\{C_k\} = & \frac{1}{2} \log_2 \varepsilon\{\Phi_k\} - \frac{1}{2} \log_2 \varepsilon\{\Omega_k\} + \frac{1}{2 \ln 2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \frac{\varepsilon\{(\Phi_k - \varepsilon\{\Phi_k\})^n\}}{\varepsilon\{\Phi_k\}^n} \\ & - \frac{1}{2 \ln 2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \frac{\varepsilon\{(\Omega_k - \varepsilon\{\Omega_k\})^n\}}{\varepsilon\{\Omega_k\}^n} \end{aligned}$$

[0114]

[0115] 여기서, 오른쪽의 3번째 항에서 n 이 1인 경우 $\frac{\varepsilon\{(\Phi_k - \varepsilon\{\Phi_k\})\}}{\varepsilon\{\Phi_k\}}$ 은 0이다. 또한 n 이 2인 경우, $\frac{\varepsilon\{(\Phi_k - \varepsilon\{\Phi_k\})^2\}}{\varepsilon\{\Phi_k\}^2}$ 는 Φ_k 의 분산과 평균으로 표현된다.

[0116] 상기 <수학식 24>로 정의된 Φ_k 는 α_i ($i = 1, 2, \dots, L$)의 선형 방정식이므로, Φ_k 의 분산은 분산 및 공분산 항들로 표현된다. 이때 $i > j$ 인 경우 α_i 와 α_j 사이의 공분산은 α_i 의 분산 보다 작음에 유의한다.

[0117] 따라서 $\varepsilon\{(\Phi_k - \varepsilon\{\Phi_k\})^2\}$ 와 $\varepsilon\{\Phi_k\}^2$ 는 상기 <수학식 18>과 <수학식 19>에서의 α_i 의 분산과 평균을 상기 <수학식 20>과 <수학식 21>과 함께 이용하여 큰 M 과 N 에 대해서 점근적으로 $O\left(\frac{(\sqrt{M} + \sqrt{N})^{\frac{4}{3}}}{(\sqrt{MN})^{\frac{2}{3}}}\right)$ 과 $((\sqrt{M} + \sqrt{N}))$ 으로 표현된다.

[0118] 여기서, $u(x) = O(v(x))$ 는 $|u(x)/v(x)|$ 가 $x \rightarrow \infty$ 로 한정되어 있다는 것을 의미한다. 그러므로, 큰 M 과 N 에 대해서 $\frac{\varepsilon\{(\Phi_k - \varepsilon\{\Phi_k\})^2\}}{\varepsilon\{\Phi_k\}^2} = O\left(1/\left((\sqrt{M} + \sqrt{N})^{\frac{4}{3}}(\sqrt{MN})^{\frac{2}{3}}\right)\right)$ 임을 알 수 있다. 유사하게, $n > 2$ 인 경우의 $\frac{\varepsilon\{(\Phi_k - \varepsilon\{\Phi_k\})^n\}}{\varepsilon\{\Phi_k\}^n}$ 과 모든 n 에 대한 $\frac{\varepsilon\{(\Omega_k - \varepsilon\{\Omega_k\})^n\}}{\varepsilon\{\Omega_k\}^n}$ 은 무시할만한 것임을 알 수 있다.

[0119] 따라서 상기 <수학식 26>은 $\varepsilon\{C_k\} \approx \frac{1}{2} \log_2 \frac{\varepsilon\{\Phi_k\}}{\varepsilon\{\Omega_k\}}$ 을 따르고, 이로 인해 상기 <수학식 18>을 이용하여 상기 <수학식 11>을 도출할 수 있다.

[0120] 상술한 바와 같이 M 과 N 이 ∞ 일 때, MIMO AF 중계 시스템들의 에르고딕 용량은 $\lim_{M \rightarrow \infty} \lim_{N \rightarrow \infty} [\varepsilon\{C\} - \bar{C}_{MNL}] = 0$ 이며, 크지만 유한인 수 M 과 N 에 대해서도 동일하게, 에르고딕 용량은 $\varepsilon\{C\} \approx \bar{C}_{MNL}$ 로 근사화된다. 여기서 $\bar{C}_{MNL}$ 은 상기 <수학식 11>에 의해서 주어진다. 상기 <수학식 9>에

서 a_{MN} 와 b_{MN} 는 상기 <수학식 20>과 <수학식 21>에 의해 정의된다.

[0121] 하지만 $N/M \rightarrow \infty$ 또는 $N/M \rightarrow 0$ 에 따라 상기 <수학식 17>에서의 Tracy-Widom 법칙이 여전히 수렴할 수 있다. 그러므로 상술한 제2경우에 대한 설명은 N에 비해 다소 작거나 큰 M에 대해서도 에르고딕 용량을 추정할 수 있는 것으로 예상된다.

[0122] C. 제3경우

[0123] 이하 앞서 정의된 바와 같이 소스 노드의 안테나 개수 M을 고정하고, 중계 노드와 목적 노드 각각의 안테나 개수 N과 L이 상대적으로 큰 안테나 비율을 갖는 제3경우에 대해 시스템들의 에르고딕 용량을 폐쇄형으로 도출하기 위한 방안에 대해 살펴보도록 한다. 즉 중계 및 목적 노드의 안테나 개수가 무한대로 갈 때의 에르고딕 용량의 폐쇄형 근사값을 도출한다.

[0124] 후술할 제3경우에 관한 설명은 앞서 설명된 제2경우에 관한 설명과 유사할 수 있다. 즉 N이 무한대로 가고 M이 고정될 때, H^{+H} 은 $N I_M$ 으로 수렴하므로, 상기 <수학식 13>에서 정의된 바와 같이 α_k 은 N이 된다.

[0125] 상기한 가정에 의해 L과 N이 무한대로 갈 때, $GG^+ \beta_k$ 의 고유 값들은 하기 <수학식 27>에 정의된 바와 같이 해당 Tracy-Widom 분포로 수렴한다.

수학식 27

[0126]
$$P\left(\frac{\beta_k - a_{LM}}{b_{LM}}\right) \rightarrow F_2(s, k)$$

[0127] 그러면 상기 <수학식 27>으로부터의 β_k 의 점근적 평균과 분산은 $\varepsilon\{\beta_k\} \rightarrow b_{LM} \cdot \mu_k + a_{LM}$ 와 $\varepsilon\{(\beta_k - \varepsilon\{\beta_k\})^2\} \rightarrow b_{LM}^2 \cdot \sigma_k^2$ 로 정리된다.

[0128] 앞서 살펴본 제2경우에 대한 설명에서도 나타난 바와 같이, 고정된 M에 대해서 N과 L이 무한대로 가면, 고유 값들의 비 β_k / β_k 는 $k=1, 2, \dots, M$ 에 대해서 1로 수렴한다. 그러면 전력 제약 조건을 정의하고 있는 상기 <수학식 7>을 만족하는 f_k ($k=1, 2, \dots, L$)는 상기 <수학식 15>에 의해 주어진다.

[0129] 따라서 최종적으로 상기 <수학식 13>과 <수학식 15>를 상기 <수학식 7>에 대입하고, 상기 <수학식 27>에 대해 제2경우에서 설명된 증명과 유사한 방식을 이용하면, 상기 <수학식 22>를 도출하게 된다.

[0130] 상술한 바를 정리하면, L과 N이 ∞ 일 때, MIMO AF 중계 시스템들의 에르고딕 용량은 $\lim_{L \rightarrow \infty} \lim_{N \rightarrow \infty} [\varepsilon\{C\} - \bar{C}_{MNL}] = 0$ 에 따르고, 크지만 유한인 L과 N에 대해서도 동일하게 에르고딕 용량은 $\varepsilon\{C\} \approx \bar{C}_{MNL}$ 이다. 이 경우 $\bar{C}_{MNL}$ 은 상기 <수학식 22>와 같이 정리될 수 있다. 여기서, a_{LN} 와 b_{LN} 은 상기 <수학식 20>과 <수학식 21>로 주어진다.

[0131] 한편 제3경우는 제2경우와 유사하게 N보다 더 작거나 큰 L에 대해서 이용할 수 있음에 유의한다. 따라서 제2경우와 제3경우는 Tracy-Widom 법칙으로 점근적 고유 값에 대한 결과들을 이용함으로써, 다양한 M과 L에 대해 제1경우에 비해 더 정확한 수식들을 제공한다.

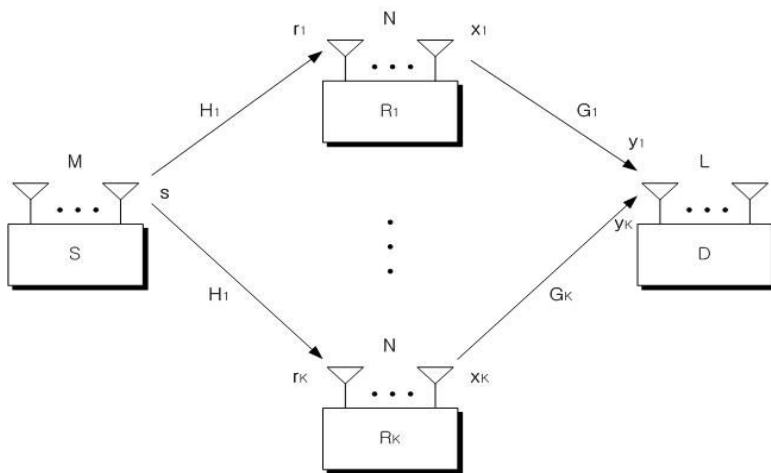
[0132] 상술한 바람직한 실시 예에서는 점근적인 경우만을 고려하였으나, 다른 분석적 결과들은 유한 차원에서의 점

근적 분석의 정확성 덕분에 적절한 수의 안테나들의 경우에 대한 실제 시뮬레이션된 결과들에 꽤 근접할 수 있다.

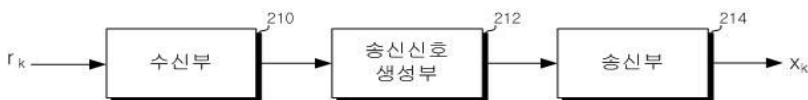
- [0133] 바람직한 실시 예를 적용할 시에 획득할 수 있는 시뮬레이션 결과를 정리하면 다음과 같다. 즉 MIMO 중계 채널들에서의 점근적 에르고딕 용량의 분석을 확인하기 위해 시뮬레이션 결과를 제시한다.
- [0134] 제시된 시뮬레이션에서 $P_T = P_R = P$ 및 $\sigma_n^2 = \sigma_z^2 = 1$ 을 가정하였고, 신호 대 잡음 비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)는 P/σ_n^2 로 정의하였다. 그리고 모든 시뮬레이션 결과들은 SVD 기반 용량 달성 방식을 이용하였으며, 제1 내지 제3경우에서의 폐쇄형 근사값들과 비교된다.
- [0135] 도 3에서는 서로 다른 중계 안테나들의 수 N에 따른 다양한 SNR들에 대한 제1경우에서의 분석 결과를 도시하였다.
- [0136] 도 3을 참조하면, N이 증가하면서 제1경우에 의해 예측되는 바와 같이 근사 값들이 정확히 시뮬레이션 결과들과 일치하는 것을 알 수 있다. N=4의 경우에서 적절한 수의 안테나들에 대해서도, 근사 값이 모든 SNR 범위에서 실험 결과들과 불과 1/10 dB 밖에 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다.
- [0137] 도 4는 다양한 M에 대한 실험 에르고딕 용량을 폐쇄형 수식과 비교하고 있다. 여기서, 제2경우와 제3경우에서의 근사 값들은 각각 $M \geq L$ 과 $M \leq L$ 의 경우들에 대해 이용되었다.
- [0138] 한편 제시된 시뮬레이션 결과들은 다양한 M, N 및 L의 대부분의 경우들에 있어서도 폐쇄되어 있다. 하지만 M과 N은 충분히 크지 않을 수 있다. 또한, $M > L$ 의 경우에 있어 소스 안테나들의 수 M이 증가하면서 용량은 감소하는 것을 주목해야 한다.
- [0139] 따라서 이 결과들은 제1경우에서 예상되는 바와 같이, 중계 안테나들의 수가 많은 경우 소스 안테나들의 수가 목적지 안테나들의 수 G를 초과하지 않도록 (즉, $M \leq L$) 설계되어야 한다.

도면

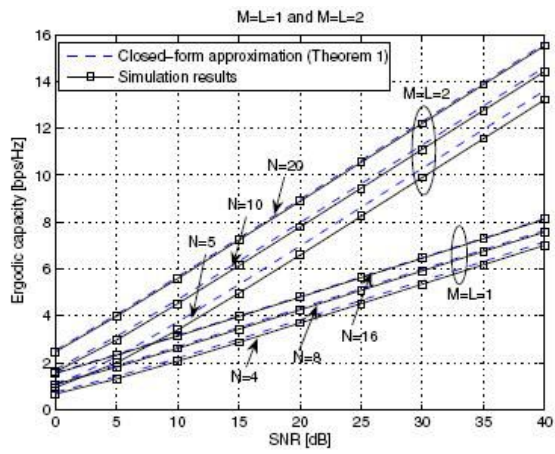
도면1



도면2



도면3



도면4

