

논문 2012-49-10-7

다중 사용자 다중 경로 페이딩 채널에서 분산 안테나 시스템을 위한 주파수 영역 Equal-Gain-Combining TR 기법의 Capacity와 Secrecy Rate 분석

(Capacity and Secrecy Rate Analysis of a Frequency-Domain
Equal-Gain-Combining TR Scheme for Distributed Antenna Systems in
Multi-User Multi-Path Fading Channels)

김 명 석*, 이 충 용**

(Myoung-Seok Kim and Chungyong Lee)

요 약

시간 반전 (time-reversal, TR) 전처리 기법은 유효 채널의 전력을 특정 시간으로 집중시키는 역할을 하며, 이를 통해 단일 탭 수신기의 수신 성능을 향상시킬 수 있다. 선형 블록 전처리 형태를 가지는 주파수 영역 동일 이득 결합 (frequency-domain equal-gain-combining, FD-EGC) TR 기법은 기존의 TR 기법에 비해 temporal focusing 성능이 뛰어나다. 또한, FD-EGC는 분산 안테나 시스템 (distributed antenna systems, DAS)에서 minimum mean square error 수신기의 수신 성능을 향상시킨다. 본 논문에서는 이러한 FD-EGC의 수신 성능 분석에 그치지 않고, capacity 성능을 분석하는 것에 중점을 두었다. 우선, DAS에서 FD-EGC의 capacity를 유도하였으며, 안테나 수에 따라 capacity가 증가함을 보였다. 이어 정보 이론적 보안 측면에서 secrecy rate를 유도하였으며, 이를 통해 FD-EGC가 다른 사용자에게 보안을 유지하면서도 목표 사용자에게는 많은 양의 정보를 전송할 수 있음을 보였다.

Abstract

Time-reversal (TR) precoding focuses the energy of the effective channel in time and improves receive performance of a single tap receiver. Frequency-domain equal-gain-combining (FD-EGC) TR scheme, which works in linear block precoding fashion, has better temporal focusing performance than the traditional TR. Also, the FD-EGC improves receive performance of minimum mean square error receiver with distributed antenna systems (DAS). The detailed receive performance of the FD-EGC was analyzed in our previous work. In this paper, we focused on capacity analysis of the FD-EGC in DAS. We derived a scaling law which shows how the use of multiple antenna can increase the capacity of the FD-EGC precoding compared with that of no precoding. In addition, we analyze the secrecy rate of the FD-EGC which shows how high-rate messages can be transmitted towards an intended user without being decoded by the other users from the view point of information theoretic security.

Keywords: distributed antenna systems, time-reversal, equal-gain-combining, secrecy rate

* 학생회원, ** 정회원-교신저자, 연세대학교 전기전자공학과

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. 2010-0025659)

접수일자: 2012년5월15일, 수정완료일: 2012년10월10일

I. 서 론

시간 반전 (time-reversal, TR) 전처리 기법^[1~6]은 유효 채널의 전력을 특정 시간으로 집중시키는 특징으로 인해 주목 받아 왔다. 이러한 TR의 temporal focusing 특징은 단일 탭 수신기를 사용하는 경우, 전송률을 향상시키거나 심볼 간 간섭을 줄일 수 있다. 또한, TR은 다중 사용자 환경에서 전체 시스템 전송률을 향상 시키거나 사용자 간 간섭을 줄이기도 한다^[1~4].

최근, TR은 다중 경로 페이딩 채널을 극복하기 위한 블록 전송에도 사용된다^[5]. 블록 전송에서 주기적 전치 부호 (cyclic prefix, CP)는 블록 간 간섭을 효율적으로 제거하기 위해 사용되며, TR은 CP의 도움으로 인해 선형 블록 전처리 (linear block precoding, LBP) 형태로 처리될 수 있다. 특히, LBP 형태의 TR를 분산 안테나 시스템 (distributed antenna systems, DAS)에 적용하면 안테나 수에 따라 성능을 향상시킬 수 있다.

우리는 기존의 TR 기법에 비해 temporal focusing 성능이 뛰어나며, 적은 수의 안테나를 가진 DAS에 적합한 주파수 영역 동일 이득 결합 (frequency-domain equal-gain-combining, FD-EGC) 기법^[6]을 제안하였으며, temporal focusing 성능과 minimum mean square error (MMSE) 수신기의 수신 성능을 분석하였다^[6].

본 논문에서는 이러한 FD-EGC의 수신 성능 분석에 그치지 않고, capacity 성능을 분석하는 것에 중점을 두었다. II장에서 DAS와 FD-EGC LBP 기법을 소개하였으며, III장에서 DAS에서 FD-EGC의 capacity 성능을 유도하고, 안테나가 수에 따라 capacity가 증가함을 보였다. IV장에서 정보 이론적 보안 측면에서 secrecy rate를 유도하였으며, 이를 통해 FD-EGC가 다른 사용자에게 보안을 유지하면서도 목표 사용자에게는 신뢰할 수 있는 정보를 전송할 수 있음을 보였다.

II. DAS에서 FD-EGC LBP

1. DAS와 LBP

보내려는 데이터는 기간망을 통해 N_T 개의 안테나가 서로 공유한다. 각 안테나에서 $L_B \times 1$ 심볼 블록 \mathbf{s} 는 $L_B \times L_B$ LBP 행렬을 통과한 후, CP와 함께 전송된다. 수신단에서 CP를 제거하면 수신 신호는

$$\mathbf{y} = \sum_{n_T=1}^{N_T} \mathbf{H}_{n_T} \mathbf{T}_{n_T} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

이며, \mathbf{n} 는 평균이 0이고 분산이 N_{L_B} 인 $L_B \times 1$ 부가 백색 가우스 잡음 벡터이다. 여기서 $L_B \times L_B$ 채널 행렬은

$$\mathbf{H}_{n_T} = \sum_{l=0}^{L-1} h_{n_T}(l) \mathbf{\Pi}^l \quad (2)$$

와 같이 cyclic Toeplitz 행렬이다. 여기서 $h_{n_T}(l)$ 는 안테나 n_T 에서 l 번째 채널 탭이며, $\mathbf{\Pi}$ 는 cyclic shift 행렬, L 는 채널의 길이이다. 모든 전파 지연과 비동기 지연은 CP의 길이보다 짧다고 가정하였다.

가. 기존 TR

기존 TR의 시간 영역 LBP 행렬^[5]은

$$\mathbf{T}_{n_T}^{\text{MRC}} = \nu_{n_T}^{\text{MRC}} \mathbf{H}_{n_T}^{\text{H}} \quad (3)$$

이며, $\nu_{n_T}^{\text{MRC}}$ 은 normalization factor, $(\cdot)^{\text{H}}$ 은 Hermitian 연산자이다. (3)과 동일한 주파수 영역 전처리는

$$\tilde{t}_{n_T}^{\text{MRC}}(l) = \nu_{n_T}^{\text{MRC}} \tilde{h}_{n_T}^*(l), \quad 1 \leq l \leq L_B \quad (4)$$

와 같이 주파수 축으로 최대 비율 결합 (maximum ratio combining, MRC)의 형태를 가지며, $\tilde{h}_{n_T}(l)$ 는 주파수 영역 채널이며 $(\cdot)^*$ 는 복소 켈레 연산자이다.

나. FD-EGC TR

FD-EGC의 주파수 영역 전처리^[6]는

$$\tilde{t}_{n_T}^{\text{EGC}}(l) = \nu_{n_T}^{\text{EGC}} \frac{\tilde{h}_{n_T}^*(l)}{|\tilde{h}_{n_T}(l)|}, \quad 1 \leq l \leq L_B \quad (5)$$

이며, normalization factor $\nu_{n_T}^{\text{EGC}}$ 는 $N_T^{-1/2}$ 로 고정되어 있고 채널 페이딩과 독립적이다. FD-EGC는 주파수 축으로 고정된 전력이 할당되므로, 동작 범위가 넓은 고효율 전력 증폭기를 사용하지 않아도 된다. 더욱이 FD-EGC는 temporal focusing 성능이 뛰어나며, 적은 수의 DAS에서도 MMSE 수신 성능이 뛰어나다^[6].

III. FD-EGC의 Capacity 성능 분석

1. DAS에서 LBP의 Capacity

최적 수신기를 사용하여 얻을 수 있는 capacity는

$$C = \frac{1}{L_B} \log_2 \left| L_B + \frac{S}{N} \mathbf{H}_{\text{eff}} \mathbf{H}_{\text{eff}}^H \right| \quad (6)$$

로 정의되며, 여기서 유효 채널은

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = \sum_{n_T=1}^{N_T} \mathbf{H}_{n_T} \mathbf{T}_{n_T} \quad (7)$$

이다. (6)의 capacity를 주파수 영역 채널로 표현하면

$$C = \frac{1}{L_B} \log_2 \left| L_B + \frac{S}{N} \sum_{n_T=1}^{N_T} \tilde{\mathbf{H}}_{n_T} \tilde{\mathbf{T}}_{n_T} \left(\sum_{n_T=1}^{N_T} \tilde{\mathbf{H}}_{n_T} \tilde{\mathbf{T}}_{n_T} \right)^H \right| \quad (8)$$

$$= \frac{1}{L_B} \sum_{l=1}^{L_B} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \left| \sum_{n_T=1}^{N_T} \tilde{h}_{n_T}(l) \tilde{t}_{n_T}(l) \right|^2 \right)$$

이다. FD-EGC의 capacity를 수식적으로 유도하기 위해 주파수 영역 채널 $\tilde{h}_{n_T}(l)$ 은 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 동일한 복소 정규 분포를 가지며 서로 독립이라고 가정하였다.

2. FD-EGC의 점근 Capacity

(5)와 (8)로부터 FD-EGC의 capacity는

$$C^{\text{EGC}} = \frac{1}{L_B} \sum_{l=1}^{L_B} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \left| \sum_{n_T=1}^{N_T} \nu_{n_T}^{\text{EGC}} |h_{n_T}(l)| \right|^2 \right) \quad (9)$$

$$= \frac{1}{L_B} \sum_{l=1}^{L_B} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \frac{1}{N_T} \left| \sum_{n_T=1}^{N_T} |h_{n_T}(l)| \right|^2 \right)$$

와 같다. (9)의 capacity에서 주파수 영역 유효채널은 N_T 개의 서로 독립이면서 동일하게 Rayleigh 분포를 가지는 확률 변수의 합으로 표현된다. 하지만 Rayleigh 확률 변수의 합에 대한 정확한 확률 분포식은 아직 알려지지 않았다^[7]. 다만, 정확한 확률 분포식 대신 이와 유사한 small argument approximation (SAA)^[7-8]이 널리 사용되고 있다. $L_B \rightarrow \infty$ 인 경우를 가정하면, (9)의 점근 capacity는 SAA에 의해

$$C^{\text{EGC}} \rightarrow \int_0^\infty \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \frac{1}{N_T} x^2 \right) \frac{x^{2N_T-1} e^{-\frac{x^2}{2b}}}{2^{N_T-1} b^{N_T} (N_T-1)!} dx \quad (10)$$

와 같이 표현할 수 있으며, b 는 $(2N_T-1)!! \frac{N_T^{-1} \sigma^2}{2}$ 이다. 여기서 double factorial은

$$(2N-1)!! = \prod_{n=1}^N (2n-1) \quad (11)$$

와 같이 정의된다. 안테나 수에 따른 성능 분석을 용이하게 하기 위해 신호대잡음비가 낮은 경우와 높은 경우로 나누어 점근 capacity를 유도하였다.

가. 신호대잡음비가 큰 경우 ($\text{SNR} \gg 1$)

신호대잡음비가 크다 ($x \gg 1$)는 가정 하에 (10)의 식을 $\log_2(1+x) \approx \log_2 x$ 와 같이 근사화하면

$$C^{\text{EGC}} \approx \int_0^\infty \log_2 \left(\frac{S}{N} \frac{1}{N_T} x^2 \right) \frac{x^{2N_T-1} e^{-\frac{x^2}{2b}}}{2^{N_T-1} b^{N_T} (N_T-1)!} dx \quad (12)$$

$$= \log_2 \left(2b \frac{S}{N} \frac{1}{N_T} \right) + \frac{1}{\ln 2} \left(\sum_{n_T=1}^{N_T-1} \frac{1}{n_T} - \gamma_E \right)$$

와 같으며, $\gamma_E \approx 0.58$ 는 Euler 상수이다. N_T 가 매우 큰 경우, harmonic number는

$$\sum_{n_T=1}^{N_T-1} \frac{1}{n_T} \approx \frac{1}{2} \ln(N_T(N_T-1)) + \gamma_E \quad (13)$$

와 같이 근사화 할 수 있으며^[5], double factorial은

$$(2N_T-1)!! \approx 2N_T e^{-1} \quad (14)$$

와 같은 Stirling의 근사화식^[9]을 이용하여 근사화 할 수 있다. (13)와 (14)의 근사화식을 이용하여 (12)의 capacity를 정리하면

$$C^{\text{EGC}} \approx \log_2 \left(\frac{S}{N} \sigma^2 \sqrt{N_T(N_T-1)} \right) - 0.44 \quad (15)$$

가 된다. TR 전처리를 하지 않을 경우, 위와 유사한 과정을 거쳐 점근 capacity를 정리하면

$$C^{\text{unitary}} \approx \log_2 \left(\frac{S}{N} \sigma^2 \right) - 0.84 \quad (16)$$

와 같다. 점근 capacity 이득은 (15)와 (16)으로부터

$$C^{\text{EGC}} - C^{\text{unitary}} \approx \log_2 \left(\sqrt{N_T(N_T-1)} \right) + 0.4 \quad (17)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, N_T 에 따라 대수적으로 증가한다. 기존 TR이 N_T 가 1일 때 오히려 손해^[5]인 반면, FD-EGC는 모든 N_T 에 대해 이득이다.

나. 신호대잡음비가 작은 경우 (SNR $\ll 1$)

신호대잡음비가 작다 ($x \gg 1$)는 가정 하에 (10)의 식을 $\log_2(1+x) \approx x/\ln 2$ 을 이용하여 근사화하면

$$C^{\text{EGC}} \approx \frac{1}{\ln 2} \frac{S}{N} \frac{1}{N_T!} \int_0^\infty \frac{x^{2N_T+1} e^{-\frac{x^2}{2b}}}{2^{N_T-1} b^{N_T}} dx = \frac{2b}{\ln 2} \frac{S}{N} \quad (18)$$

와 같다. N_T 가 매우 크다고 가정하고 (14)의 Stirling의 근사화식^[9]을 이용하여 double factorial을 근사화하면 (18)의 capacity는

$$C^{\text{EGC}} \approx \frac{2}{e} \frac{1}{\ln 2} \frac{S}{N} \sigma^2 N_T \quad (19)$$

가 된다. TR 전처리를 하지 않을 경우, 위와 유사한 과정을 거쳐 점근 capacity를 정리하면

$$C^{\text{unitary}} \approx \frac{1}{\ln 2} \frac{S}{N} \sigma^2 \quad (20)$$

이다. FD-EGC의 capacity 이득은 (19)와 (20)으로부터

$$C^{\text{EGC}} - C^{\text{unitary}} \approx \frac{2}{e} \frac{1}{\ln 2} \frac{S}{N} \sigma^2 N_T \left(1 - \frac{e}{2} \frac{1}{N_T}\right) \quad (21)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, N_T 에 따라 증가한다.

다. 하한과 상한

이전 항에서 근사화에 사용된 $\log_2(1+x) \approx \log_2 x$ 과 $\log_2(1+x) \approx x/\ln 2$ 는 각각 capacity의 하한과 상한으로 사용될 수 있다. 좀 더 근접한 상한을 구하기 위해 Jensen의 부등식을 이용하였으며, $\log_2(1+x)$ 가 x 에 대해 볼록 함수이기 때문에

$$\frac{1}{L_B} \sum_{l=1}^{L_B} \log_2(1+x(l)) \leq \log_2 \left(1 + \frac{1}{L_B} \sum_{l=1}^{L_B} x(l)\right) \quad (22)$$

를 만족한다. 위 가정들을 이용하여 구하여진 상하한은

$$\log_2 \left(\frac{2}{e} \frac{S}{N} \sigma^2 \sqrt{N_T(N_T-1)} \right) < C_{\text{EGC}} < \log_2 \left(1 + \frac{2}{e} \frac{1}{\ln 2} \frac{S}{N} \sigma^2 N_T \right) \quad (23)$$

이다. 유도 과정에서 harmonic number의 하한은

$$\sum_{n_T=1}^{N_T-1} \frac{1}{n_T} > \frac{1}{2} \ln(N_T(N_T-1)) + \gamma_E, \quad N_T \geq 1 \quad (24)$$

을 사용하였고, double factorial의 상한은

$$(2N_T-1)!!^{N_T} < 2^{1+\frac{1}{4}N_T} e^{-1}, \quad N_T \geq 2 \quad (25)$$

을 사용하였다.

라. Capacity 성능식의 모의실험 검증

이번 항에서는 이전 항에서 유도한 FD-EGC의 capacity 성능식을 모의실험을 통해 검증하였으며, 수식 유도과정에서와 동일하게 채널은 모두 평균이 0이고 분산이 $\sigma^2=1$ 인 동일한 복소 정규 분포를 가지며 서로 독립이라고 가정하였다.

그림 1에서는 신호대잡음비가 작다는 가정 하에 유도된 성능식 (19)과 (21)은 -30dB에서, 신호대잡음비가 크다는 가정 하에 유도된 성능식 (15)와 (16)은 30dB에서 실제 채널에서의 capacity와 비교하였으며, 유도된 성능식이 실제 채널의 capacity와 유사한 것을 확인할 수 있다. 그림 2에서는 신호대잡음비가 0dB와 10dB인 경우에 (23)의 capacity 상하한식과 실제 채널에서의 capacity를 비교하였다.

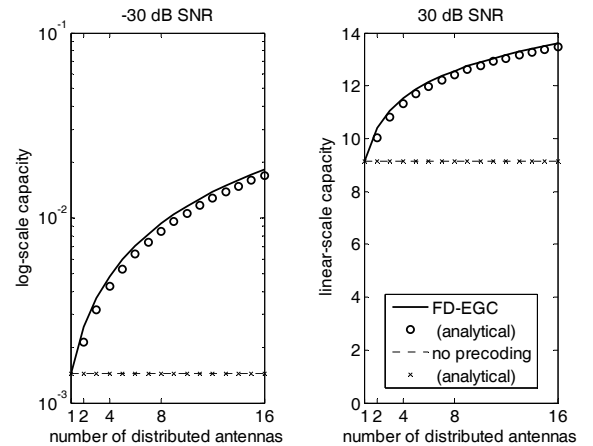


그림 1. 모의실험과 capacity 성능식 비교
Fig. 1. Comparison between analytical capacity and numerical capacity.

IV. FD-EGC의 Secrecy Rate 성능 분석

1. DAS에서 LBP의 Secrecy Rate

정보 이론적 보안 측면에서 secrecy rate^[5, 10]는

$$R = \min_u [C - C_u]_{+0} = [C - C_u]_{+0} \quad (26)$$

로 정의되며, 여기서 $[x]_{+a}$ 는 $\max(x, a)$ 를 의미한다. (26)

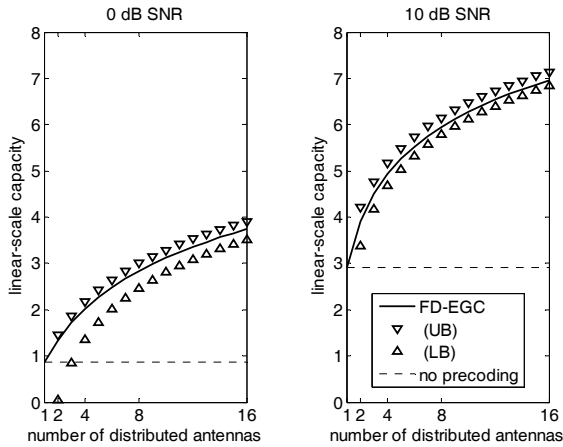


그림 2. 모의실험과 capacity 상하한식 비교
Fig. 2. Comparison between analytical bound of capacity and numerical capacity.

에서 C 는 III장에서 살펴본 목표 사용자의 capacity이며 C_u 는 목표하지 않는 사용자 u 가 해독할 수 있는 누설 capacity이다. (26)의 secrecy rate는 다른 사용자에게 보안을 유지하면서 목표 사용자에게만 보낼 수 있는 순수 capacity를 의미한다. u' 는 누설 capacity가 가장 큰 사용자이다.

2. 누설 Capacity

누설 capacity는 (8)과 유사하게

$$C_u = \frac{1}{L_B} \sum_{l=1}^{L_B} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \left| \sum_{n_T=1}^{N_T} \tilde{h}_{u,n_T}(l) \tilde{t}_{n_T}(l) \right|^2 \right) \quad (27)$$

로 정의되지만, (27)의 전처리 $\tilde{t}_{n_T}(l)$ 는 사용자 u 와의 채널 $\tilde{h}_{u,n_T}(l)$ 이 아닌 목표 사용자와의 채널 $\tilde{h}_{n_T}(l)$ 에 적합하도록 설계되며 $\tilde{h}_{u,n_T}(l)$ 과는 독립이다. 여기서 채널 $\tilde{h}_{u,n_T}(l)$ 은 III장에서와 유사하게 평균이 0이고 분산이 $\tilde{\sigma}_u^2$ 인 복소 정규 분포를 가진다고 가정하였다.

(5)의 FD-EGC 전처리는 주파수 영역으로 동일한 전력을 할당하며, 채널의 위상만을 보상한다. (5)와 (27)로부터 FD-EGC의 누설 capacity를 정리하면

$$C_u^{EGC} = \frac{1}{L_B} \sum_{l=1}^{L_B} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \frac{1}{N_T} \left| \sum_{n_T=1}^{N_T} \tilde{h}_{u,n_T}(l) \angle \tilde{h}_{n_T}^*(l) \right|^2 \right) \quad (28)$$

이다. 여기서 보상하는 위상은 $\angle \tilde{h}_{n_T}^*(l)$ 은 $\tilde{h}_{u,n_T}(l)$ 와 독

립이기 때문에 유효채널의 확률 분포에는 변화가 없다. 따라서 (28)의 누설 capacity는 III장에서 살펴본 TR 전처리를 하지 않을 경우의 capacity와 동일한 확률 분포를 가지며, 따라서 점근 누설 capacity는 신호대잡음비가 큰 경우에는 (16)과 유사하게

$$C_u^{EGC} \approx \log_2 \left(\frac{S}{N} \tilde{\sigma}_u^2 \right) - 0.84 \quad (29)$$

으로, 신호대잡음비가 작은 경우에는 (20)과 유사하게

$$C_u^{EGC} \approx \frac{1}{\ln 2} \frac{S}{N} \tilde{\sigma}_u^2 \quad (30)$$

으로 유도할 수 있다.

3. FD-EGC의 점근 Secrecy Rate

안테나 수에 따른 성능 분석을 용이하게 하기 위해 신호대잡음비가 낮은 경우와 높은 경우로 나누어 점근 secrecy rate를 유도하였다.

가. 신호대잡음비가 큰 경우 ($\text{SNR} \gg 1$)

FD-EGC의 점근 secrecy rate는 신호대잡음비가 큰 경우, (26)과 (15), (29)로부터

$$R^{EGC} \approx \left[\log_2 \left(\sqrt{N_T(N_T-1)} \frac{\tilde{\sigma}^2}{\tilde{\sigma}_{u'}^2} \right) + 0.4 \right]_{+0} \quad (31)$$

와 같이 정리할 수 있으며, N_T 에 따라 대수적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고 (31)의 secrecy rate는 송신 전력의 크기에 영향을 받지 않으며, 오로지 채널의 크기 비와 안테나 수에만 영향을 받는다. 참고로 TR 전처리를 하지 않을 경우에 점근 secrecy rate는

$$R^{\text{unitary}} \approx \left[\log_2 \left(\frac{\tilde{\sigma}^2}{\tilde{\sigma}_{u'}^2} \right) \right]_{+0} \quad (32)$$

로, 다중 안테나의 사용으로 인한 이득을 얻을 수 없다. 또한, 목표 사용자의 채널 크기가 최대 누설 사용자의 채널 크기보다 큰 경우, 어떠한 비밀 정보도 안전하게 전송할 수 없다. 반면, FD-EGC는 다중 안테나를 이용하여 이러한 문제를 해결할 수 있다.

나. 신호대잡음비가 작은 경우 ($\text{SNR} \ll 1$)

신호대잡음비가 작은 경우 FD-EGC의 점근 secrecy

rate는 (26)과 (19), (30)으로부터

$$R^{EGC} \approx \frac{2}{e} \frac{1}{\ln 2} \frac{S}{N} \tilde{\sigma}^2 N_T \left[1 - \frac{e}{2} \frac{\tilde{\sigma}_{u'}^2}{\tilde{\sigma}^2} \frac{1}{N_T} \right]_{+0} \quad (33)$$

와 같이 정리되며, N_T 에 따라 선형적으로 증가한다. TR 전처리를 하지 않을 경우 점근 secrecy rate는

$$R^{unitary} \approx \frac{1}{\ln 2} \frac{S}{N} \tilde{\sigma}^2 \left[1 - \frac{\tilde{\sigma}_{u'}^2}{\tilde{\sigma}^2} \right]_{+0} \quad (34)$$

로 다중 안테나의 사용으로 인한 이득을 얻을 수 없다. 또한, 목표 사용자의 채널 크기가 최대 누설 사용자의 채널 크기보다 큰 경우, 어떠한 비밀 정보도 안전하게 전송할 수 없다. 반면, FD-EGC는 다중 안테나를 이용하여 이러한 문제를 해결할 수 있다. 또한, 안테나가 무한하면 (33)의 secrecy rate는 (19)의 채널 capacity로 수렴한다.

다. Secrecy Rate 성능식의 모의실험 검증

이번 항에서는 이전 항에서 유도한 FD-EGC의 secrecy rate 성능식을 모의실험을 통해 검증하였다. 수식 유도과정에서와 동일하게 주파수 영역 채널은 모두 평균이 0인 복소 정규 분포를 가지며 서로 독립이라고 가정하였다. 또한 목표 사용자와 누설 사용자의 채널 크기는 각각 $\tilde{\sigma}^2 = 1$ 과 $\tilde{\sigma}_u^2 = 1$ 로 가정하였다.

그림 3에서는 신호대잡음비가 작다는 가정 하에 유도된 성능식 (33)과 (34)는 -30dB에서, 신호대잡음비가 크다는 가정 하에 유도된 성능식 (31)과 (32)는 30dB에

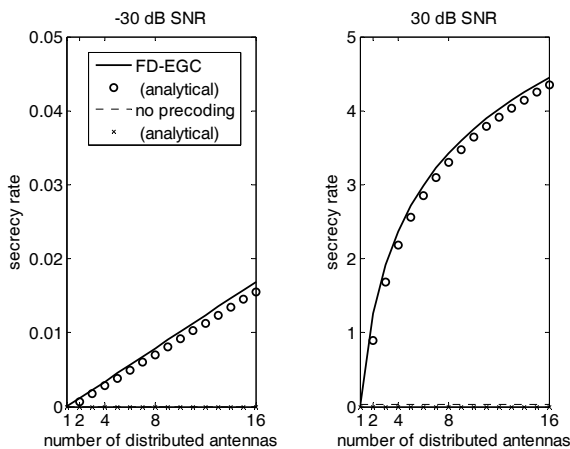


그림 3. 모의실험과 secrecy rate 성능식 비교
Fig. 3. Comparison between analytical secrecy rate and numerical capacity.

서 실제 채널에서의 secrecy rate과 비교하였으며, 유도된 성능식이 실제 채널의 secrecy rate와 유사하다.

VI. 결 론

DAS에서 FD-EGC TR의 capacity 성능을 분석하였다. 신호대잡음비가 낮은 경우와 높은 경우로 나누어 점근 capacity를 유도하였으며, 일반적인 경우에 대해서는 점근 capacity의 하한과 상한을 유도하였다. 유도된 수식은 모의실험을 통해 실제 채널에서의 capacity를 잘 대변할 수 있음을 확인하였다. FD-EGC는 안테나 수에 따라 점근 capacity를 대수적(신호대잡음비가 매우 작은 경우 선형적)으로 증가시키는 것을 보였다.

이러 정보 이론적 보안 측면에서 FD-EGC의 secrecy rate를 유도하였으며, 이를 통해 FD-EGC가 다른 사용자에게 보안을 유지하면서 목표 사용자에게는 신뢰할 수 있는 정보를 전송할 수 있음을 보였다. 유도된 수식은 모의실험을 통해 실제 채널에서의 secrecy rate와 유사함을 확인하였다. FD-EGC는 많은 수의 안테나와 같이 사용되었을 때, spatial focusing 효과가 크며, secrecy rate를 증가시킬 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Sigit Aryo Pambudi, 최승규, 이충용, "Shifted Time Reversal Technique for Two-user Wireless Communication Using Variable Rate Back-off," *전자공학회논문지*, 제48권 TC편, 제5호, 33-39쪽, 2011년 5월
- [2] 김주호, 복태훈, 배진호, 팽동국, 이종현, 김성일, "서해상에서의 계절에 따른 통신 성능 분석," *전자공학회논문지*, 제48권 TC편, 제1호, 9-15쪽, 2011년 1월
- [3] H. T. Nguyen, P. Kyritsi, and P. C. F. Eggers, "Time reversal technique for multi-user wireless communication with single tap receiver," in *16th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, pp. 1-5, July 2007.
- [4] H. T. Nguyen, "On the performance of one bit time reversal for multi-user wireless communications," in *IEEE Int. Symp. Wireless Communication Systems*, pp. 672-676, Trondheim, Norway, October 2007.
- [5] T. Koike-Akino, A. F. Molisch, C. Duan, Z. Tao,

- and P. Orlik, "Capacity, MSE and secrecy analysis of linear block precoding for distributed antenna systems in multi-user frequency-selective fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 3, pp. 888-900, March 2011.
- [6] M.-S. Kim, M. Yoon, and C. Lee, "Performance Analysis of a Frequency-Domain Equal-Gain-Combining Time-Reversal Scheme for Distributed Antenna Systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 9, pp. 1454-1457, September 2012.
- [7] J. Hu and N. C. Beaulieu, "Accurate simple closed-form approximations to Rayleigh sum distributions and densities," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 109-111, February 2005.
- [8] M. Schwartz, W. R. Bennett, and S. Stein, *Communication Systems and Techniques*. New York: McGraw-Hill, 1966.
- [9] F. L. Bauer, "Remark on Stirling's formula and on approximations for the double factorial," *The Math Intelligencer*, vol. 29, no. 2, pp. 10-14, 2007.
- [10] Thang Van Nguyen, Hien Quoc Ngo, and Hyundong Shin, "Secrecy Capacity of Nakagami- m Fading Channels," in *Int. Techn. Conf. Circuits/Systems, Computers and Communications*, pp. 1262-1265, Jeju island, Korea, July 2009.

저 자 소 개



김 명 석(학생회원)
2005년 연세대학교 전기전자
공학과 학사 졸업.
2007년 연세대학교 전기전자
공학과 석사 졸업.
2007년~현재 연세대학교 전기
전자공학과 박사 과정.

2012년~현재 삼성전자 선임연구원.
<주관심분야 : 통신, 신호처리>



이 충 응(정회원)-교신저자
1987년 연세대학교 전기전자
공학과 학사 졸업.
1989년 연세대학교 전기전자
공학과 석사 졸업.
1995년 Georgia Tech.
전자공학과 박사 졸업.

1996년~1997년 삼성전자 선임연구원.
1997년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수.
<주관심분야 : 통신, 신호처리>