

논문 2011-48TC-8-5

공간 자원의 양방향 활용에 대한 분석

(Analysis on Bi-Directional Use of Spatial Resources)

주형식*, 이성은**, 홍대식***

(Hyungsik Ju, Sungeun Lee, and Daesik Hong)

요약

다중 안테나 통신 시스템에서 채널의 correlation은 심각한 성능 열화를 일으킨다. 본 논문에서는 공간 자원을 양방향으로 활용함으로써 채널 correlation에 대한 민감도를 줄일 수 있는 방법을 다룬다. 먼저 공간 자원의 양방향 활용에 대한 개념을 제시한 후, 사용 가능한 eigenmode를 분석함으로써 이 기술이 채널 correlation에 대한 민감도를 어떻게 줄이는지에 대해 다루도록 한다. 마지막으로 시뮬레이션 결과를 통해 이 기술이 채널 correlation에 대한 민감도를 효과적으로 줄임을 보인다.

Abstract

In multiple antenna systems, spatial fading correlation causes a significant degradation in performance. In this work, a method for reducing the sensitivity to spatial fading correlation through the bi-directional use of spatial resources is investigated. Firstly, the concept of bi-directional use of spatial resources is introduced. Then, the ability of this technique to reduce the sensitivity to spatial fading correlation is then shown through an analysis of the number of usable eigenmodes (UEMs). This system is found to efficiently reduce the sensitivity to spatial fading correlation.

Keywords : 다중 안테나 시스템, 양방 통신, 채널 correlation

I. 서론

다중 입력 다중 출력 (multiple input multiple output, MIMO)을 통해 무선 통신 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음이 증명되어 왔다. 그러나, MIMO 시스템의 가장 큰 문제점 중 하나는 채널 correlation에 대한 민감도이다^[1]. 채널 correlation은 MIMO 시스템의 채널 용량을 심각하게 떨어뜨린다. 많은 연구들을 통해 채널 correlation 모델, 이 모델을 적용했을 때의 MIMO 시스템의 채널 용량, 그리고 최적의 시그널링이 분석되었다^[1~2]. 위의 연구들을 통하여 MIMO 채널 행렬의 차원이 높아질

수록 채널 correlation에 의한 채널 용량 감소량이 큼이 밝혀졌다. 즉, MIMO 시스템의 채널 용량은 MIMO 채널 행렬의 차원이 작을수록 채널 correlation에 대해 덜 민감하다. 따라서 MIMO 시스템의 차원을 줄일 경우, 비록 이상적인 상황에서의 capacity 증가율은 감소하기는 하지만, 채널 correlation의 영향은 줄일 수 있다.

그러나 채널 차원의 감소에 따른 다중화 이득 (multiplexing gain)을 다른 영역에서 보상할 수 있는 방법이 있다면, 다중화 이득의 손해 없이 채널 correlation의 영향을 줄이는 것이 가능하다. [3~4]의 연구에서는 채널 correlation에 의한 diversity 이득의 손실을 시간, 또는 주파수 영역에서 보상하는 방법이 연구되었다. 이 논문에서는 이러한 보상 방법을 양방향 통신의 관점에서 다룬다.

공간 자원이 양방향으로 사용될 경우, MIMO 채널에서 생성되는 공간 자원이 둘로 분할되어 각각 반대 방향의 통신 링크에 할당된다. 이 논문에서는 공간 자원

* 정회원, ** 정회원, 연세대학교 전기전자 공학부
(Departure or Electrical and Electronic
Engineering, Yonsei University)

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로
한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(No. 2010-0018938)

접수일자: 2011년6월3일, 수정완료일: 2011년8월17일

을 양방향으로 사용하는 MIMO 시스템을 양방향 MIMO (bi-directional MIMO, B-MIMO) 시스템이라 부른다. 반면 기존의 MIMO 시스템의 경우, 모든 공간 자원이 한 방향의 데이터 전송에 사용되므로, 이 논문에서는 기존의 MIMO 시스템을 단방향 MIMO (uni-directional MIMO, U-MIMO) 시스템이라 부른다. U-MIMO 시스템의 경우, 양방향 통신을 위해서는 추가적인 시간 또는 주파수 자원을 필요로 하거나 주어진 자원을 시간, 또는 주파수 영역에서 분할해서 사용해야 한다.

이 논문에서는 먼저 공간 자원의 양방향 활용에 대한 개념을 소개하고, U-MIMO에서 양방향 통신을 위한 추가적인 자원 활용과 B-MIMO에서의 자원 활용을 비교한다. 그 다음에는 B-MIMO 시스템과 U-MIMO 시스템의 사용 가능한 spatial eigenmode (usable eigenmode, UEM)의 숫자를 분석함으로써 U-MIMO 시스템에 비해 B-MIMO 시스템이 왜 채널 correlation에 대해 덜 민감한지에 대한 이유를 다루도록 한다.

II. 공간 자원의 양방향 활용

본 논문에서 고려하는 환경은, 각각 N_a 개와 N_b 개의 안테나를 가지는 두 노드 a 와 b 사이의 양방향 통신 환경이다. 이 때 $N = \min(N_a, N_b)$ 를 만족한다고 가정하며, 노드 a 에서 b 로의 데이터 전송 링크를 $link_{ab}$, b 에서 a 로의 데이터 전송 링크를 $link_{ba}$ 로 정의한다.

B-MIMO 시스템과 U-MIMO 시스템을 공정하게 비교하기 위해 N 의 공간 자원과 W 의 대역으로 구성된 단위 자원을 정의한다. 그림 1은 U-MIMO 시스템과 B-MIMO 시스템에서의 단위 자원의 활용을 보여준다.

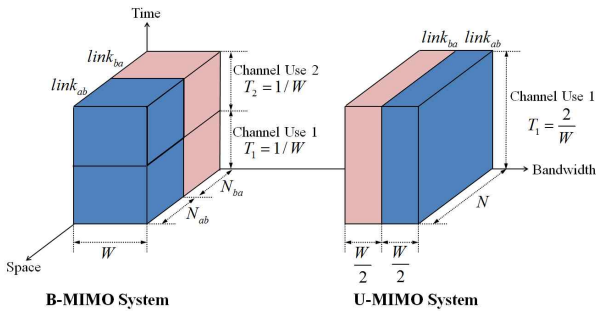


그림 1. B-MIMO와 U-MIMO 시스템의 자원 활용
Fig. 1. Resource use in B-MIMO and U-MIMO systems.

B-MIMO 시스템에서는 $link_{ab}$ 와 $link_{ba}$ 모두 W 의 전 대역을 사용한다. 대신, 두 링크는 공간축에서 분할된다. 이를 위해 노드 a 에서는 N_{at} 개의 안테나를 정보 송신을 위해, N_{ar} 개의 안테나를 정보 수신을 위해 사용하며, 노드 b 에서는 N_{bt} 개의 안테나를 정보 송신을 위해, N_{br} 개의 안테나를 정보 수신을 위해 사용한다. 이 때, N_{at} , N_{ar} , N_{bt} , N_{br} 은 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$N_{at} + N_{ar} = N_a, N_{bt} + N_{br} = N_b, \tag{1}$$

$$N_{ab} = \min(N_{at}, N_{br}), N_{ba} = \min(N_{bt}, N_{ar}), \tag{2}$$

$$N_{ab} + N_{ba} = N. \tag{3}$$

반면 U-MIMO 시스템에서는, $link_{ab}$ 와 $link_{ba}$ 모두 N 의 공간 자원을 모두 사용한다. 대신, 양방향 통신을 위하여 $link_{ab}$ 와 $link_{ba}$ 가 주파수축에서 분할된다. 이 때, $link_{ab}$ 와 $link_{ba}$ 가 사용하는 대역폭의 비율을 각각 α 와 $1 - \alpha$ 라고 가정한다.

III. 채널 모델

일반적으로 N_t 개의 송신 안테나와 N_r 개의 수신 안테나를 가지는 MIMO 통신 시스템의 채널은 Kronecker correlation model을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$H = R_r^{1/2} H_w R_t^{1/2}. \tag{4}$$

여기서 H 와 H_w 는 $N_r \times N_t$ 행렬이며, H_w 행렬의 각각의 성분은 independent, identically distributed (i.i.d) complex Gaussian 랜덤 변수로 표현된다. R_t 와 R_r 은 각각 $N_t \times N_t$, $N_r \times N_r$ 의 차원을 가지는 전송 상관 행렬과 수신 상관 행렬이다.

이를 이용하여 U-MIMO 시스템에서의 채널은 $link_{ab}$ 와 $link_{ba}$ 에서 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$H_{ab}^U = R_b^{1/2} H_{ab,w}^U R_a^{1/2}, \tag{5}$$

$$H_{ba}^U = R_a^{1/2} H_{ba,w}^U R_b^{1/2}. \tag{6}$$

여기서 H_{ab}^U 와 H_{ba}^U 는 각각 U-MIMO 시스템에서 $link_{ab}$

와 $link_{ba}$ 의 MIMO 채널이며, R_a 와 R_b 는 각각 노드 a 와 b 에서의 상관 행렬로, 각각 $N_a \times N_a$ 와 $N_b \times N_b$ 의 차원을 가진다. $H_{ab,w}^U$ 와 $H_{ba,w}^U$ 는 각각 $N_b \times N_a$ 와 $N_a \times N_b$ 의 차원을 가지는 채널 행렬로, 이 행렬들의 각 성분은 i.i.d complex Gaussian 랜덤 변수로 표현된다.

반면, B-MIMO 시스템에서는, $link_{ab}$ 와 $link_{ba}$ 에서의 채널 행렬 및 상관 행렬의 차원이 N_{at} , N_{ar} , N_{bt} , N_{br} 에 의해 결정된다.

먼저, 노드 a 에서의 송, 수신 상관 행렬은 각각 R_{at} 와 R_{ar} 로 정의되며, 각각 $N_{at} \times N_{at}$ 와 $N_{ar} \times N_{ar}$ 의 차원을 가진다. 또한, 노드 b 에서의 송, 수신 상관 행렬은 각각 R_{bt} 와 R_{br} 로 정의되며, 각각 $N_{bt} \times N_{bt}$ 와 $N_{br} \times N_{br}$ 의 차원을 가진다. 이를 이용하여 B-MIMO 시스템의 각 링크에서의 채널은 다음과 같이 표현된다.

$$H_{ab}^B = R_{br}^{1/2} H_{ab,w}^B R_{at}^{1/2}, \quad (7)$$

$$H_{ba}^B = R_{ar}^{1/2} H_{ba,w}^B R_{bt}^{1/2}. \quad (8)$$

여기서 H_{ab}^B 와 H_{ba}^B 는 각각 B-MIMO 시스템에서 $link_{ab}$ 와 $link_{ba}$ 에서의 MIMO 채널이며, 각각 $N_{br} \times N_{at}$ 와 $N_{ar} \times N_{bt}$ 의 차원을 가진다. $H_{ab,w}^B$ 와 $H_{ba,w}^B$ 또한 각각 $N_{br} \times N_{at}$ 와 $N_{ar} \times N_{bt}$ 의 차원을 가지며, 이 행렬들의 성분은 i.i.d complex Gaussian 랜덤 변수이다.

IV. 공간 자원 활용에 대한 분석

MIMO 시스템의 전송 능력은 사용 가능한 eigenmode (usable eigenmodes, UEM)을 이용하여 설명할 수 있다. [8]과 [9]에서 알 수 있듯이, 평균 mutual information 관점에서 최적의 전송 기법은 수신 SNR에 따라 beamforming에서부터 full rank 전송으로 변화한다. Input covariance matrix의 rank가 UEM의 숫자와 같은 의미를 가지므로, input covariance matrix의 rank를 분석함으로써 시스템의 전송 능력을 가늠할 수 있다. 본 논문에서는 이를 위해 transition SNR^[5]의 개념을 활용한다. $N_t \times N_t$ 송신 상관 행렬 R_t 와 $N_r \times N_r$ 수신 상관 행렬 R_r 을 가지는 MIMO 시스템에 대해 m th transition SNR ($\eta_m(R_t, R_r)$)은 m 개의 eigenmode를 사용함으로써 최적의 평균 mutual information을 얻을 수 있는 최소의 SNR로 정의된다. 이때의 input

covariance matrix는 다음과 같다.

$$Q_m = \frac{P}{m} U_t \begin{bmatrix} I_m & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U_t^H \quad (9)$$

이 때 P 는 전송 파워, I_m 은 $m \times m$ 단위 행렬을 의미한다. R_t 와 R_r 의 eigenvalue decomposition (EVD)는 각각 $R_t = U_t \Lambda_t U_t^H$ 과 $R_r = U_r \Lambda_r U_r^H$ 이다. 이 경우, $\eta_m(R_t, R_r) \leq \eta \leq \eta_{m+1}(R_t, R_r)$ 의 SNR 범위에서 UEM의 수는 m 이다. \tilde{H} 가 0의 평균과 1의 분산을 가지는 i.i.d complex Gaussian 성분으로 이루어진 $N_r \times N_t$ 행렬이라 하고, 전송단과 수신단 사이의 채널을 $H = R_r^{1/2} \tilde{H} R_t^{1/2}$ 라 표시할 경우, rank- m 전송의 achievable rate는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} I_m(\eta, N_t, N_r, R_t, R_r) \\ = E \left[\log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{\eta}{m} \Lambda_r \hat{H}_m \hat{\Lambda}_t \hat{H}_m^H \right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

이 때, $\hat{H} = U_r^H \tilde{H} U_t$ 이고, \hat{h}_i 는 \hat{H} 의 i 번째 열행렬이다. 또한 $\hat{H}_m = [\hat{h}_1 \hat{h}_2 \dots \hat{h}_m]$ 이다.

주어진 단위 자원에 대한 B-MIMO 시스템의 전송 능력은 각 링크에서의 UEM 수의 합으로 결정되어진다. Transition SNR의 개념을 이용할 경우 B-MIMO 시스템이 U-MIMO 시스템보다 크거나 같은 수의 UEM을 가질 조건은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \eta_{m_{ab}}(R_{at}^{opt}, R_{br}^{opt}) \leq \eta \leq \eta_{m_{ab}+1}(R_{at}^{opt}, R_{br}^{opt}), \\ \eta_{m_{ba}}(R_{bt}^{opt}, R_{ar}^{opt}) \leq \eta \leq \eta_{m_{ba}+1}(R_{bt}^{opt}, R_{ar}^{opt}), \\ \eta_{m_{ab}+m_{ba}}(R_t, R_r) \leq \eta \leq \eta_{m_{ab}+m_{ba}+1}(R_t, R_r), \end{aligned} \quad (11)$$

이 때 $(R_{at}^{opt}, R_{ar}^{opt}, R_{bt}^{opt}, R_{br}^{opt})$ 는 각 노드에서 안테나들을 최적의 송, 수신 안테나 그룹으로 나누었을 때 각 노드에서의 송, 수신 상관 행렬의 묶음을 의미한다. UEM의 수가 input covariance matrix의 rank에 의해 결정되므로, UEM은 곧 주어진 SNR에 대한 순간적인 achievable rate의 증가율과 같은 의미를 가진다. 따라서 B-MIMO 시스템의 rate 증가율은 (11)이 만족될 경우 U-MIMO의 rate 증가율보다 크거나 같다. 이러한 조건을 만족시키는 SNR의 영역은 최소한 아래의 두 영역이 존재한다.

$$\begin{aligned} R_1 &= \{\eta | 0 < \eta \leq \eta_{\min}\}, \\ R_2 &= \{\eta | \eta_{\max} \leq \eta < \infty\} \end{aligned} \quad (12)$$

이때, η_{\min} 과 η_{\max} 는 아래와 같다.

$$\eta_{\min} = \min(\eta_2(R_{at}^{opt}, R_{br}^{opt}), \eta_2(R_{bt}^{opt}, R_{ar}^{opt}), \eta_2(R_t, R_r)) \quad (13)$$

$$\eta_{\max} = \max(\eta_{N_{ab}}(R_{at}^{opt}, R_{br}^{opt}), \eta_{N_{ba}}(R_{bt}^{opt}, R_{ar}^{opt}), \eta_N(R_t, R_r)) \quad (14)$$

그림 2는 $N_{ab} = 2$, $N_{ba} = 3$, $N = 5$ 일 때 B-MIMO 와 U-MIMO 시스템의 UEM을 보여준다. 이 그림에서 R_3 는 R_1 과 R_2 외에 (11)을 만족시키는 SNR의 영역이다.

R_1 은 B-MIMO 시스템과 U-MIMO 시스템에서 SNR이 낮은 영역에서의 특성과 관계가 있다. R_1 의 영역에서는 B-MIMO 시스템의 UEM 수는 항상 2인 반면 U-MIMO 시스템의 UEM 수는 항상 1이다. 이는 U-MIMO 시스템뿐만 아니라 B-MIMO 시스템의 $link_{ab}$, $link_{ba}$ 모두 beamforming으로 전송하는 것이 achievable rate 측면에서 최적이기 때문이다. 따라서 이 영역에서는 SNR의 증가에 따라 B-MIMO 시스템의 achievable rate가 U-MIMO 시스템의 achievable rate 보다 빠르게 증가한다. 또한, [6]에서 알 수 있듯이, 두 노드 사이의 채널에 대한 correlation이 심할수록 beamforming이 achievable rate 측면에서 최적인 SNR의 영역은 더욱 넓어진다. 이로부터 두 노드 사이의 채널의 correlation이 심할수록 R_1 이 더욱 넓어짐을 유추할 수 있다. 따라서, achievable rate의 증가율 측면에서 볼 때, SNR이 낮거나 채널의 correlation이 심할수록

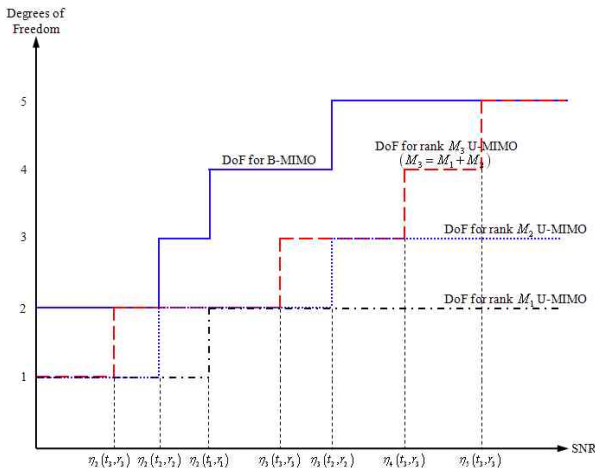


그림 2. B-MIMO와 U-MIMO 시스템의 UEM
Fig. 2. UEMs in B-MIMO and U-MIMO systems.

B-MIMO가 U-MIMO보다 좋은 achievable rate 성능을 가진다고 볼 수 있다.

R_2 는 다중화 이득 및 fading correlation의 영향으로부터의 복구와 관계가 있다. 다중화 이득은 SNR이 무한대로 증가할 때 점근선 적인 achievable rate의 증가율로 정의되며, 이는 full rank 전송을 통해서만 가능하다. 즉, full rank 전송은 다중화 이득을 얻기 위한 필요 조건이 된다. 그러나 이러한 필요 조건은 채널의 correlation이 주도적인 경우에는 성립될 수 없다. 따라서, 모든 UEM들이 데이터 전송을 위해 이용된다면 채널 correlation의 영향은 사라졌다고 볼 수 있으며, 이 경우 MIMO 시스템이 채널 correlation의 영향으로부터 복구되었다고 볼 수 있다. 따라서, 전송단의 관점에서 봤을 때, B-MIMO 시스템과 U-MIMO 시스템 모두 R_2 영역에서는 채널 correlation의 영향에서 벗어났다고 해석할 수 있다.

V. 시뮬레이션

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 B-MIMO와 U-MIMO 시스템의 achievable rate region을 비교한다. 시뮬레이션 과정에서 $N_a = N_b = N$, $\rho_a = \rho_b = \rho$, $\eta_{ab} = \eta_{ba} = \eta$ 임을 가정한다.

그림 3에서는 $N = 2$ 일 때 $\rho = 0$ 인 경우와 $\rho = 0.99$ 인 경우의, 그림 4에서는 $N = 4$ 일 때 $\rho = 0$ 인 경우와 $\rho = 0.99$ 인 경우의 achievable rate region을 보여준다. 두 그림에서 공통적으로 볼 수 있듯이, ρ 가 증가할수록 B-MIMO 시스템과 U-MIMO 시스템의 achievable rate

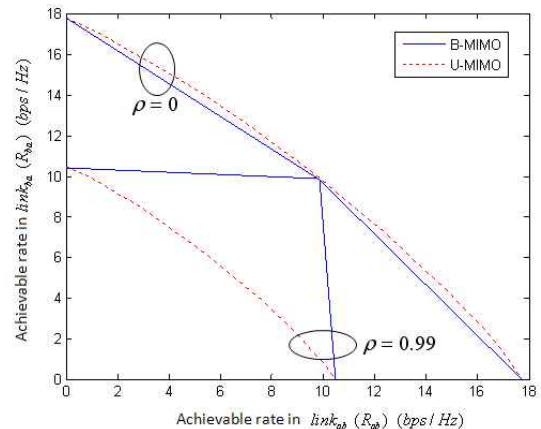


그림 3. 2x2 환경에서의 rate region
Fig. 3. Rate region in 2x2 environment.

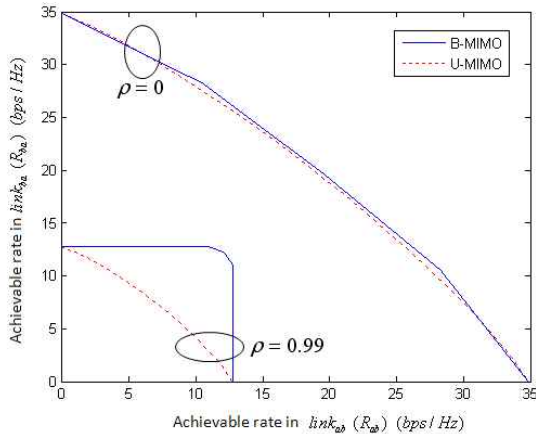


그림 4. 4×4 환경에서의 rate region

Fig. 4. Rate region in 4×4 environment.

region이 줄어든다. 그러나 $\rho = 0.99$ 일 때, B-MIMO 시스템의 achievable rate는 이상적인 two-way channel의 achievable rate region인 정사각형의 achievable rate region으로 수렴한다. 이는 channel correlation이 높은 환경에서는 low rank signaling이 더욱 효율적이기 때문에 B-MIMO 시스템이 더욱 효율적임을 입증한다. B-MIMO 시스템의 rate region이 이상적인 two-way channel의 rate region인 정사각형에 수렴하는 이유는, low rank signaling이 link_{ab}와 link_{ba}에서 독립적으로 수행되기 때문이다. 이러한 이유로 B-MIMO 시스템에서 fading correlation의 효과가 감소하게 된다. 반면 U-MIMO 시스템의 경우에는 ρ 가 증가할수록 achievable rate region이 심각하게 감소하며, B-MIMO 시스템과 비교했을 때 매우 작음을 알 수 있다. 그러나 $\rho = 0$ 일 때에는 B-MIMO 시스템의 achievable rate region은 이상적인 two-way channel의 rate region에 수렴하지 못하는데, 이는 B-MIMO 시스템의 각 link에서 공간 자원의 일부가 사용되지 못하기 때문이다.

IV. 결 론

본 논문에서는, 양방향 다중 입력 다중 출력 시스템에서 공간 자원의 활용을 분석하였다. 공간 자원을 단방향으로 사용하는 시스템과 양방향으로 사용하는 시스템에 대하여, 주어진 공간 및 주파수 자원이 동일하게 주어졌을 때의 사용 가능한 eigenmode의 수를 비교함으로써 두 시스템의 공간 자원의 활용을 비교하였다.

두 노드 사이의 채널이 상관되어 있지 않은 경우에는 두 시스템의 공간 자원 활용이 사실상 같으나, 채널이 심하게 상관되어 있을수록 공간 자원을 양방향으로 사용하는 시스템이 더욱 효율적으로 공간자원을 사용한다. 이러한 공간 자원의 활용은 achievable rate의 증가로 이어져, 공간 자원을 양방향으로 사용할 때의 achievable rate region이 공간 자원을 단방향으로 사용할 때의 achievable rate region보다 훨씬 넓어짐을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. Chiani, M. Z. Win, and A. Zanella, "On the Capacity of Spatially Correlation MIMO Rayleigh-Fading Channels", *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2363-2371, Oct. 2003.
- [2] C. -N. Chuah, D. N. C. Tse, J. M. Kahn, and R. A. Valanzuela, "Capacity Scaling in MIMO Wireless Systems under Correlated Fading", *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 48, no. 3, pp. 637-650, Mar. 2002.
- [3] E. Ko, and D. Hong, "A Robust STBC-Based Transmit Diversity Scheme for OFDM Systems over Spatially Transmit Correlated Fading Channels", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 2, pp. 984-991, Mar. 2007.
- [4] H. R. Bahrami and T. Le-Ngoc, "MIMO Precoder Designs for Frequency-Selective Fading Channels using Spatial and Path Correlation", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 5, pp. 3441-3452, Sep. 2007.
- [5] Raghavan, V. V. Veeravalli, and R. W. Heath, Jr., "Reduced Rank Signaling in Spatially Correlated MIMO Channels", in *Proc. IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT) 2007*, Nice, France, pp. 1081-1085, June, 2007.
- [6] V. V. Veeravalli, Y. Liang, and A. M. Sayeed, "Correlated MIMO Wireless Channels: Capacity, Optimal Signaling, and Asymptotics", *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 51, no. 6, pp. 2058-2071, June. 2005.

저 자 소 개



주 형 식(정회원)
2005년 연세대학교 전기전자
공학과 학사 졸업.
2011년 연세대학교 전기전자
공학과 박사 졸업.
<주관심분야 : 이동통신, MIMO
시스템, 2-way communication>



이 성 은(정회원)
대한전자공학회 논문지
제 46권 TC편 2호 참조



홍 대 식(정회원)
1990년 Purdue University
Electrical Engineering
박사 졸업
1991년~현재 연세대학교 전기
전자공학과 교수
<주관심분야 : 디지털통신, 통신
신호처리, 5G시스템, cognitive radio 시스템>