

다중 입출력 시스템에서 안테나 그룹화와 빔 형성 사이의 모드 선택 기법

준회원 김 경 철*, 정회원 이 정 우*

Mode Selection Technique Between Antenna Grouping and Beamforming for MIMO Communication Systems

Kyungchul Kim* Associate Member, Jungwoo Lee* Regular Member

요 약

안테나 그룹화(antenna grouping)는 빔 형성(beamforming)과 공간 다중화 기법(spatial multiplexing)의 결합이라 할 수 있다. 안테나 그룹화는 N_t 개의 송신 안테나를 N_g 개의 그룹으로 나누고, 한 그룹 내에서는 빔 형성으로 하나의 데이터 정보를, 각 그룹 사이에서는 공간 다중화 기법으로, 전체 N_t 개의 데이터 정보를 전송하는 시스템을 가정한다. 안테나 그룹화를 통하면 빔 형성을 통하여 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 동시에 공간 다중화 기법에 따른 다중화 이득을 통하여 주파수 효율을 높일 수 있다. 하지만 통신 채널이 조건 나쁜(ill-conditioned) 행렬로 모델링 되거나, 안테나 사이에 상관관계가 있는 경우에는 안테나 그룹화의 BER 성능이 열화될 수 있으므로, 이 경우에는 전체 시스템에서 하나의 데이터 정보만 전송하는 빔 형성의 성능이 가장 좋다. 이 논문에서는 채널이 안테나 그룹화에 적합하면 안테나 그룹화 모드를 선택하여 전송하고, 빔 형성에 적합하면 빔 형성 모드를 선택하여 전송하는 시스템을 가정하였다. 그리고 간단한 모드 선택 기법을 제안한다. 이 모드 선택 기법을 사용하면 매 시간동안 일정한 데이터를 전송할 때, 채널 상태에 따른 BER 성능의 열화를 막고, 최적의 BER 성능을 얻을 수 있다.

Key Words : Antenna grouping, Beamforming, Mode selection

ABSTRACT

Antenna grouping algorithm is hybrid of beamforming and spatial multiplexing. In antenna grouping system, we partition N_t transmit antennas into N_g groups and use beamforming in a group, spatial multiplexing between groups. We can transmit N_t data streams in the $N_t \times N_t$ antenna grouping system. With antenna grouping, we can achieve diversity gain through beamforming, and high spectral efficiency through spatial multiplexing. But if channel is ill-conditioned or there are some correlations between antennas, the performance of antenna grouping is seriously degraded and in that case, beamforming is the best transmit strategy. By selecting the antenna grouping mode when channel is well-conditioned and by selecting the beamforming mode when channel is ill-conditioned, we can prevent serious fluctuation of BER performance caused by varying channel condition and achieve the best BER performance. In this paper, we investigate mode selection algorithm which can select antenna grouping mode or beamforming mode. we also propose a simple mode selection criterion.

* 이 논문 또는 저서는 뉴미디어 통신 공동연구소와 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-314-D00287)

* 서울대학교 전기컴퓨터공학부 무선신호처리 연구실, 뉴미디어 통신 공동연구소 (junglee@ee.snu.ac.kr), (kckim@wmspl.snu.ac.kr)
 논문번호 : KICS2008-11-506, 접수일자 : 2008년 11월 18일, 최종논문접수일자 : 2009년 2월 5일

I. 서 론

1990년대 중반 이후부터 다중 입출력(MIMO) 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1]-[4]}. 다중 입출력 시스템에서는 여러 개의 송신 안테나를 공간 다중화 모드로 사용하여 여러 개의 데이터 정보를 동시에 전송할 수도 있고, 다이버시티 모드를 통하여 하나의 데이터 정보를 확실하게 전송할 수도 있다. 공간 다중화 기법을 통하면 여러 개의 데이터 정보를 전송하기 때문에 동시에 많은 양의 데이터를 전송할 수 있는 장점이 있는 반면, 전송하는 데이터의 신뢰도가 떨어진다는 단점이 있다. 반대로 다이버시티 모드를 사용하면 하나의 데이터 정보만을 전송하기 때문에 한 번에 전송할 수 있는 데이터의 양이 한정되지만 그만큼 데이터의 신뢰도가 높아진다는 장점이 있다. 이와 같이 다이버시티 이득과 다중화 이득 사이에는 상관관계가 있다^[5].

송신단에서 채널상태를 안다고 가정하면 좀 더 효율적인 통신 시스템을 구축할 수 있다^[6]. 한 가지 예로 고유전송(eigen-transmission)을 들 수 있다. 특이값 분해(singular value decomposition(SVD))를 이용하여 다중 입출력 채널을 여러 개의 단일 입출력(SISO) 채널로 나눌 수 있다. 이때 송신단에서 각 채널에 워터 필링 기법(water-filling)으로 파워를 할당하여 데이터 정보를 전송하는 것이 채널 용량 측면에서는 이상적이라 알려져 있다. 여러 확률은 가장 열악한 채널에 좌우되지만 워터 필링 기법은 가장 열악한 채널을 보강해 주지 못한다. 따라서 워터 필링 기법에 의한 데이터의 전송이 BER 측면에서는 효과적인 방식이라 할 수 없다. 최소 평균 제곱 오차(MMSE)의 측면에서는 역 워터 필링 기법(inverse water-filling)이 최선의 파워 할당 방법으로 알려져 있다^[7]. 한편, 빔 형성도 하나의 송신 전략이 될 수 있다. SVD 후에 가장 좋은 SISO 채널을 통하여 데이터를 전송하는 것이 빔 형성이다. 빔 형성 모드를 사용하면 수신 신호 대 잡음 비(SNR)를 증가시킬 수 있고, 따라서 데이터의 신뢰도를 증가시킬 수 있으며, 특히 상관 채널의 경우에 빔 형성은 좋은 BER 성능을 얻기 위한 최적의 전략이 될 수 있다. 하지만 채널 사용 당 비트수(bit per channel use(BPCU))를 일정하게 고정시키면, 빔 형성 모드에서는 공간 다중화 기법에 비하여 높은 부호화 차수(modulation order)를 사용해야 한다. 따라서 IID(independent identically distributed) 채널에서는 낮은 부호화 차수로 여러 개의 데이터 정보를

전송하는 공간 다중화 모드보다 BER 성능이 떨어질 수 있다. 또한, 공간 다중화 기법과 빔 형성의 혼합으로 다모드 사전 코딩(multi-mode precoding) 기법도 있다^{[8]-[10]}. 다모드 사전코딩 기법은 전송하는 데이터 정보의 수를 바꾸어가면서 최적의 모드를 선택하여 전송하는 방식으로 최고의 BER 성능을 얻을 수 있다. 하지만 가능한 모든 조합을 고려하기 때문에 복잡도가 증가한다는 단점이 있다.

안테나 그룹화 또한 빔 형성과 공간 다중화 기법의 결합이다^[11]. 안테나 그룹화에서는 송신 안테나의 수(N_t)가 수신 안테나의 수(N_r)보다 많을 때를 가정하고, 송신 안테나를 N_t 개의 그룹으로 나눈다. 그리고 각 그룹에서 하나의 데이터 정보를 전송하여, 전체 N_t 개의 데이터 정보를 전송한다. 다이버시티 이득과 다중화 이득을 동시에 얻을 수 있으므로 BER 성능을 향상시킬 수 있고, 전송하는 데이터 정보의 수를 고정시킴으로서 다모드 사전 코딩에 비하여 구현이 간단해진다. 또한 고유전송에서는 $N_t \times N_r$ 의 사전 코딩 행렬이 송신단으로 케환 되어야 하는 반면, 안테나 그룹화에서는 $N_t \times 1$ 의 사전 코딩 벡터와 그룹화 정보만 송신단으로 케환하면 되므로 케환 양도 줄일 수 있다는 장점이 있다. 하지만 조건 나쁜 채널에서는 (채널의 조건수(condition number)가 매우 클 때는) N_t 개의 데이터를 보낼 수 없기 때문에 안테나 그룹화의 BER 성능이 열화된다. 그리고 안테나 사이의 상관관계가 큰 시스템에서는 조건 나쁜 채널이 자주 생기게 되므로 이 경우에는 이전에 말했듯이 빔 형성이 최적의 송신 전략이 되는 것이다.

따라서 평균적으로 좋은 BER 성능을 유지하면서 채널 상태가 좋지 않을 때의 안테나 그룹화에 생기는 BER 성능 열화를 극복하기 위해서 안테나 그룹화와 빔 형성 사이의 모드 선택 기법을 생각할 수 있다. 우리는 이미 몇 가지 안테나 그룹화 방식을 소개했다^[12]. [12]에서는 특히 순간 표준 채널 상관행렬(normalized instantaneous channel correlation matrix(NICCM))을 이용하여 성능 열화 없이 간단하게 안테나 그룹화를 결정하는 기법을 강조하였다.

본 논문에서는 이전에 소개한 안테나 그룹화 방식을 간략하게 다시 살펴보고, 안테나 그룹화에 사용한 기준을 다시 이용하는 모드 선택 기법을 제안한다. 특히 III-5에서는 [12]에서 강조한 안테나 그룹화를 이용하여 간단하게 모드를 결정하는 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 안테나 그룹화의 기준에 대해 간략히 소개한다. III-1~4에서는 II장의 안테나 그룹화를 사용할 때 가능한 모드 선택 기법의 기준을 확인하고, III-5에서는 간략한 모드 선택 기준을 제안한다. IV장에서 각 기준에 따른 BER 성능을 확인하고, V장에서 결론을 정리한다.

II. 안테나 그룹화

송신단에서 채널 상태를 완벽하게 안다고 가정한다. MIMO 채널 행렬 H 는 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$H = R^{\frac{1}{2}} H_w T^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서 R, T 는 수신, 송신 안테나의 상관관계 행렬이고, H_w 는 Rayleigh 페이딩을 겪는 IID 채널을 가정한다. 안테나 그룹화 모드와 빔 형성 모드에서 받는 수신 신호 y_{AG}, y_B 는

$$y_{AG} = HW_{AG}x + n_1 = H_{AG}x + n_1 \quad (2)$$

$$y_B = HW_Bs + n_2 = H_Bs + n_2 \quad (3)$$

와 같이 모델링 될 수 있다. W_{AG}, W_B, H_{AG}, H_B 는 안테나 그룹화 행렬, 빔 형성 벡터, 안테나 그룹화의 유효 채널, 그리고 빔 형성의 유효 채널이다. x, s 는 안테나 그룹화와 빔 형성에서 송신 파워를 P 로 고정시킨 전송 신호 벡터와 신호 값이고 n_1, n_2 는 각 성분의 평균이 0, 분산이 σ_n^2 인 따르는 잡음 벡터이다. 안테나 그룹화 시스템은 송신 안테나를 그룹 짓는 방법이 BER 성능을 좌우한다. [12]에서 소개한 기준은 다음과 같다.

2.1 채널 합 용량(Sum capacity) (A1)

이 방법은 채널의 채널 합 용량을 그룹화의 기준으로 삼는다^[11]. 여기서 H_i, w_i 는 i 번째 그룹에 해당하는 채널과 그룹화 행렬이다.

$$C \approx \log \left(1 + \frac{SNR}{N_r} \sum_{i=1}^N w_i^H H_i^H H_i w_i \right) \quad (4)$$

이 기준에서는 (4)를 최대화 하는 안테나 그룹을 결정한다. 이 기준은 BER 측면에서 뿐만 아니라 채널 용량 측면에서도 최적의 기준이 아니기 때문에 개선의 여지가 많다. 참고로 M^H 은 행렬 M 의

Hermitian 행렬이다,

2.2 수신 신호의 최소 Euclidean 거리 (A2)

수신 신호의 최소 Euclidean 거리는

$$d_{\min, AG}^2 = \min_{x, x_j \in X} \frac{\|H_{AG}(x_i - x_j)\|^2}{N_r} \quad (5)$$

와 같이 계산할 수 있다. (X 는 가능한 모든 전송 신호의 벡터의 집합이다.) 이 기준에서는 모든 경우의 전송 신호 벡터와 안테나 그룹에 대하여 최소 Euclidean 거리를 계산하여 그 거리가 최대가 되는 안테나 그룹을 선택한다. 이 기준은 BER 성능 측면에서 최적의 안테나 그룹 선택 기법이다. 이 그룹화 기준에 고려해야 할 그룹화의 수와 그에 필요한 SVD의 수는 다른 기준들과 비슷하다. 하지만 전송 신호 벡터와 안테나 그룹의 모든 조합으로 수신 신호 벡터의 최소 거리를 계산해야 하기 때문에 이 기준은 매우 복잡하다.

2.3 유효 채널의 최소 특이값 (A3)

앞에서 언급했듯이, MIMO 채널은 SVD를 통해서 여러 개의 SISO 채널로 쪼개질 수 있다. 그러면 수신 SNR은 각 SISO 채널의 특이값의 제곱에 비례한다. 여기서 가장 열악한 경로의 SNR이 전체 시스템의 에러 확률을 좌우하므로 이 안테나 그룹화 기준은 유효 채널의 최소 특이값을 최대화 하도록 송신 안테나의 그룹을 정한다.

2.4 채널 용량 (A4)

안테나 그룹화 모드의 채널 용량은

$$C = \log \det \left(I_{N_r} + \frac{P}{N_r \sigma_n^2} H_{AG}^H H_{AG} \right) \quad (6)$$

와 같다. 참고로 $\det(M)$ 는 행렬 M 의 행렬식(determinant)이다. 위의 채널 용량을 최대화 하는 안테나 그룹을 선택한다. 이 기준은 채널 용량 측면에서는 최적의 기준이라 할 수 있겠지만, BER 측면에서는 그렇지 않을 수 있다.

2.5 NICCM을 이용한 값 (A5)

이 기준에서는 상관관계가 높은 송신 안테나끼리 그룹으로 묶어서 빔 형성으로 같은 데이터를 전송하고, 상관관계가 낮은 송신 안테나끼리는 공간 다중화 기법을 통해서 다른 데이터를 전송한다. 간단하게 안테나끼리의 상관관계를 측정하기 위하여 아래와 같이 순간 표준 채널 상관 행렬(NICCM)을

정의한다.

$$[R]_{ij} = \frac{1}{\|h_i\| \cdot \|h_j\|} \cdot [H^H H]_{ij} \quad (7)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1,N} \\ r_{12}^* & 1 & \dots & r_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1,N}^* & r_{2,N}^* & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 h_i, h_j 는 채널 행렬 H 의 i, j 번째 열이다. 만약 r_{13} 의 절대값이 크다면, 이는 H 의 첫 번째 열과 세 번째 열의 상관관계가 다른 안테나들 사이의 상관관계보다 크다는 것을 의미한다. 이러한 성질을 이용하면 간단한 안테나 그룹화 기준을 끌어낼 수 있다. 아래에 4×2 MIMO 시스템을 예로 든다. 참고로 1,2번째 안테나를 첫 번째 그룹으로 묶고, 두 번째 그룹으로 3,4번째 안테나를 묶을 때의 표현을 (1,2//3,4)와 같이 한다.

$$R_{4 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & A & B & C \\ A^* & 1 & D & E \\ B^* & D^* & 1 & F \\ C^* & E^* & F^* & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

위에서 $|A|+|F|, |B|+|E|, |C|+|D|$ 값을 비교한다. 그리고 가장 큰 값에 따라서 (1,2//3,4), (1,3//2,4), (1,4//2,3)와 같이 안테나 그룹을 결정할 수 있다. $|A|+|F|$ 가 세 값 중에서 가장 크다면, 이는 1,2번 안테나 사이의 상관관계와 3,4번 안테나 사이의 상관관계가 다른 조합의 상관관계보다 크다고 볼 수 있기 때문이다. $|B|+|E|, |C|+|D|$ 도 마찬가지이다. 이 방법은 간단하게 안테나 그룹화를 위한 그룹을 결정할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 BER 성능도 다른 기준으로 안테나 그룹을 찾을 때와 거의 비슷하다^[12].

III. 모드 선택

각 채널 상황에서 안테나 그룹화의 성능이 좋을지, 빔 형성의 성능이 좋을지 판단하는 여러 가지의 기준을 생각할 수 있다.

3.1 수신 신호의 최소 Euclidean 거리 (M1)

(5)처럼, 빔 형성 모드를 사용할 때 수신단에서 받는 신호의 최소 Euclidean 거리를 구하면

$$d_{\min,B}^2 = \min_{s_i, s_j \in S} \|H_B(s_i - s_j)\|^2 = \lambda_{\max}^2(H) d_{\min,b}^2 \quad (10)$$

로 계산할 수 있다. (S 는 빔 형성에서 가능한 모든 전송 신호의 집합, $\lambda_{\max}(\cdot)$ 은 \cdot 의 최대 특이값, $d_{\min,b}$ 는 송신단에서 빔 형성의 전송 신호 사이의 최소 거리이다.) (10)에서 두 번째 등식은 s_i, s_j 가 스칼라이기 때문이다. (5)의 값과 (10)의 값을 비교하여, (5)가 크면 안테나 그룹화 모드를 선택, (10)이 크면 빔 형성 모드를 선택한다. 송신 성좌도는 고정되어 있으므로, 빔 형성 모드의 최소 Euclidean 거리는 1회의 SVD로 쉽게 계산할 수 있다. 반면 안테나 그룹화의 최소 Euclidean 거리는 빔 형성의 (10)과 같이 간단한 식으로 표현되지 않는다. 따라서 송신 성좌도의 모든 좌표를 안테나 그룹화 행렬의 선택에 따른 유효 채널에 대입하여 실제 최소 Euclidean 거리를 찾아야 하기 때문에 그 계산이 매우 복잡하다. 4개의 안테나에서 2개의 데이터 정보를 보낸다고 가정하고, 16QAM 혹은 64QAM을 사용한다면 대략 (16)²회 혹은 (64)²회의 거리 계산 연산이 필요한 것이다.

3.2 최소 Euclidean 거리의 범위 (M2)

위에서 언급한 바와 같이 (5)의 계산이 매우 복잡할 때에는 정확한 값을 계산하는 것이 아니라 범위를 이용할 수도 있다. [13]에 따르면 (5)의 값은 아래와 같이 한정된다.

$$\lambda_{\min}^2(H_{AG}) \frac{d_{\min,ag}^2}{N_r} \leq d_{\min,AG}^2 \leq \lambda_{\max}^2(H_{AG}) \frac{d_{\min,ag}^2}{N_r} \quad (11)$$

여기서 $d_{\min,ag}$ 는 안테나 그룹화를 사용할 때 송신단에서 전송 신호 벡터 사이의 최소 거리이다. [13]과 마찬가지로, (10)에서 계산한 값과 (11)의 최소 경계(lower bound) 부분을 비교하여 (10)이 크면 빔 형성 모드를, (11)의 최소 경계가 크면 안테나 그룹화 모드를 선택하는 시스템을 생각할 수 있다.

3.3 채널 용량 (M3)

빔 형성 모드의 채널 용량은

$$C = \log \det \left(1 + \frac{P}{\sigma_n^2} H_B^H H_B \right) \quad (12)$$

이다. 따라서 (6)과 (12)를 비교하여 (6)이 크면 안테나 그룹화 모드를, (12)가 크면 빔 형성 모드를 선택하는 모드 선택 기법을 사용할 수도 있다.

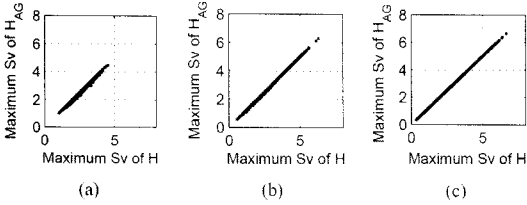


그림 1. 4×2 시스템에서 $\lambda_{\max}(H)$ 와 $\lambda_{\max}(H_{AG})$ 의 관계 (a) IID 채널, (b) 상관 채널 (angle of departure(AOD): 45°, angular spread(AS): 15°), (c) 상관 채널 (AOD: 45°, AS: 15°)

3.4 조건수 (M4)

위의 III-2에서는 송신 모드를 선택하는 기준으로

$\lambda_{\min}^2(H_{AG}) \frac{d_{\min,ag}^2}{N_r}$ 와 $\lambda_{\max}^2(H_B) d_{\min,b}^2$ 값을 비교했다.

여기서 빔 형성 벡터의 성질에 따라 $\lambda_{\max}(H_B)$ 는 $\lambda_{\max}(H)$ 와 같고, 안테나 그룹화 행렬과 특이값의 성질에 따라서

$$\lambda_{\max}(H_{AG}) \leq \lambda_{\max}(H) \cdot \lambda_{\max}(W_{AG}) = \lambda_{\max}(H) \quad (13)$$

의 관계가 성립한다. 하지만 그림 1에서 보듯이, $\lambda_{\max}(H_{AG}) \approx \lambda_{\max}(H)$ 로 근사화할 수 있으므로 III-2의 기준을 약간 변형하여

$$\frac{\lambda_{\max}(H_{AG})}{\lambda_{\min}(H_{AG})} \text{와 } \sqrt{\frac{d_{\min,ag}^2}{N_r \cdot d_{\min,b}^2}}$$

을 생각할 수 있다. 여기서 앞의 항은 H_{AG} 의 조건수이다. 따라서 이 시스템은 조건수가 특정 경계 값보다 작으면 안테나 그룹화 모드를 선택하고, 특정 임계값보다 크면 빔 형성 모드를 선택하는 시스템으로 생각할 수 있다. 이는 좋은 상태 채널 (ill-conditioned channel)에서는 안테나 그룹화 모드를 선택하고, 나쁜 상태 채널에서 빔 형성 모드를 선택한다는 초기의 가정에 부합하는 결론이다.

3.5 NICCM을 이용한 값 과 커브 피팅 (M5)

II-5에서 $|A|+|B|, |B|+|C|, |C|+|D|$ 중 하나가 다른 것에 비하여 월등히 크면, 특정 안테나끼리의 상관관계만 큰 것이므로 안테나 그룹화 모드를 사용하는데 문제가 없다. 하지만 위의 세 값이 전체적으로 모두 크면, 송신 안테나 전체의 상관관계가 크다는 의미이므로, 안테나 그룹화 모드를 사용하는 것 보다는 빔 형성 모드를 사용하는 것이 BER 성능 측면에서 유리할 것이다. 여기서는 모드 선택 기법의 기준으로 위의 세 값 중에 작은 두 값의 합을 사용하였다. 만약 작은 두 값의 합이 특정한 값보다 작

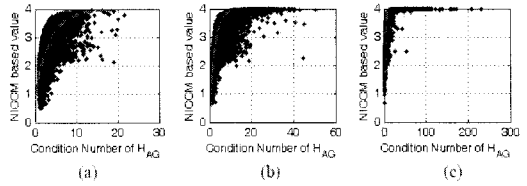


그림 2. 4×2 시스템에서 조건수와 NICCM 값의 관계 (a) IID 채널, (b) 상관 채널 (angle of departure(AOD): 45°, angular spread(AS): 15°), (c) 상관 채널 (AOD: 45°, AS: 15°)

표 1. 커브 피팅에 사용한 계수

$y = 4 - ae^{(bx)}$	IID	Corr. (45//15)	Corr. (45//6)
a	3.073	3.694	3.8
b	-0.2738	-0.3847	-0.4438

으면 안테나 그룹화 모드를 선택하고, 특정한 값보다 크면 빔 형성 모드를 선택하는 방식이다. 그리고 모드를 선택하는 기준 값을 결정하는 데는 III-4를 이용 할 수 있다. NICCM에서 구한 세 값 중에 작은 두 값의 합과 H_{AG} 의 조건수 사이에는 그림 2와 같은 관계가 있기 때문이다.

H_{AG} 의 조건수와 NICCM에서 나온 작은 두 값의 합을 커브 피팅으로 근사화했다. 그림 2에서 점선은 각 데이터에 맞추어진 함수의 곡선이다. (9)에서 $A \sim F$ 는 최대값이 1이기 때문에 NICCM에서 구한 작은 두 값의 합은 4를 넘길 수 없고, 각 데이터의 추세가 지수 함수의 추세와 비슷하기 때문에 커브 피팅에는 $y = 4 - ae^{(bx)}$ 의 함수를 이용하였다. 커브 피팅에 사용한 계수는 표 1과 같다.

III-4와 같이 안테나 그룹화과 빔 형성에서 사용하는 부호화 차수와 수신 안테나의 개수에 따른 조건수의 기준값을 결정한다. 그 다음 커브 피팅을 이용해 이 값을 NICCM에서 나오는 값으로 대응시키고, 실제 채널의 NICCM을 계산해서, 실제 채널의 값이 조건수에 대응된 기준 값보다 작으면 안테나 그룹화 모드를, 크면 빔 형성 모드를 사용한다.

IV. 실험

(1)의 채널 모델에는 IEEE 802.11n 표준의 TGn 모델을 사용하였다. 실험상 편의를 위하여 송신 안테나끼리의 상관관계만을 가정하였다. 그림 3은 IID 채널에서 BPCU가 4일때 안테나 그룹화, 빔 형성, 고유전송, 그리고 모드 선택 기법의 BER 성능을 보여준다. 모드 선택 기법의 BER 성능이 안테

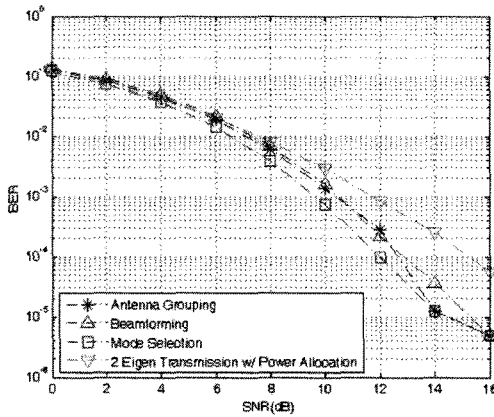


그림 3. IID 채널, BPCU가 4인 4×2 MIMO 시스템에서 평균 BER 성능 (A2 & M1)

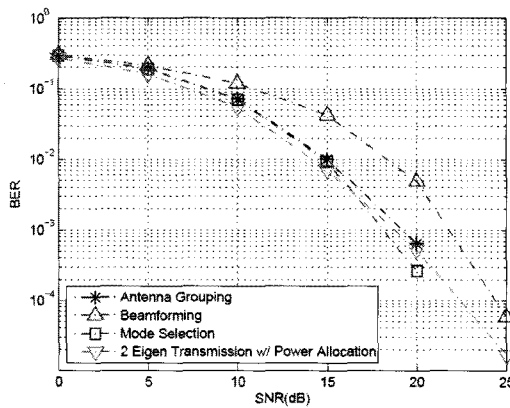


그림 4. IID 채널, BPCU가 8인 4×2 MIMO 시스템에서 평균 BER 성능 (A5 & M1)

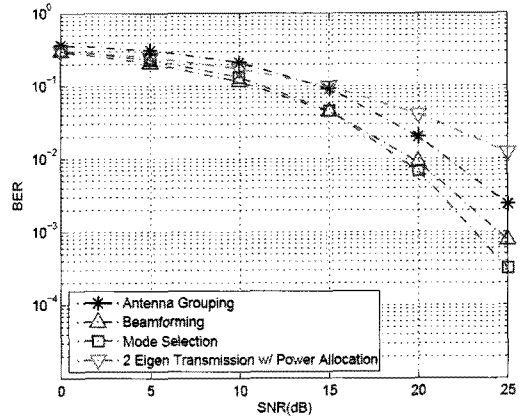


그림 5. 상관 채널, BPCU가 8인 4×2 MIMO 시스템에서 평균 BER 성능 (A5 & M1)

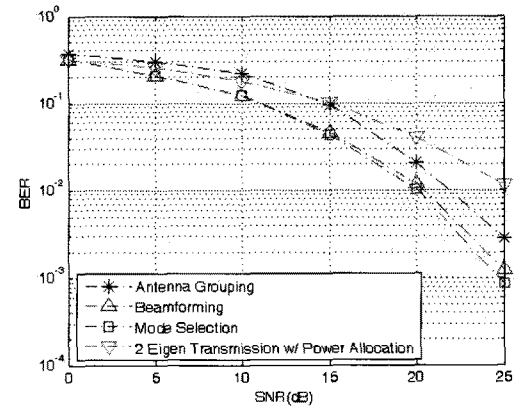


그림 6. 상관 채널, BPCU가 8인 4×2 MIMO 시스템에서 평균 BER 성능 (A5 & M5)

나 그룹화, 또는 빔 형성 모드만을 사용하는 것 보다 우수한 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 상관 채널에서도 마찬가지이다. 한편, 안테나 그룹화 기법과 모드 선택 기법은 독립적인 과정으로, BPCU가 커지면 복잡도가 매우 높아지는 II-2의 안테나 그룹화 기법 대신 II-5의 안테나 그룹화 기법과 III-1 모드 선택 기법의 조합을 사용할 수도 있다.

그림 4와 그림 5는 BPCU가 8일 때, IID 채널과 상관 채널에서의 BER 성능을 나타낸 그래프이다.(그림 5에서는 출발각(AOD): 45°, 각분포(AS): 6°의 채널을 가정하였다.) 그림 4와 5를 비교해보면, IID 채널에서는 안테나 그룹화나 역 위터 필링 기법을 사용한 고유전송의 성능이 빔 형성보다 월등히 좋다. 하지만 높은 상관 채널에서는 안테나 그룹화와 고유전송의 성능이 심각하게 열화되어서 빔 형성 기법의 성능이 좋다. 우리는 이러한 현상을 해결하고자 모드 선택 기법을 제안하였고, 모드 선택 기법의 성능은

IID 채널에서 낮은 SNR 영역에서 약간 떨어지지만, 높은 SNR 영역에서는 안테나 그룹화나 고유전송 기법보다 우수하다. 그리고 상관관계 채널에서도, 모드 선택 기법의 BER 성능이 낮은 SNR 영역에서는 빔 형성 기법과 비슷하지만 높은 SNR 영역에서는 가장 좋다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 모드 선택 기법을 사용하면, 채널의 상태에 상관없이, 안테나끼리의 상관관계에 관계없이, 우수한 BER 성능을 얻을 수 있다.

그림 6은 모드 선택에서 III-5의 기준을 사용한 결과이다. II-5의 기준은 III-1의 기준과 같이 각 송신 신호에 따른 최소 Euclidean 거리를 계산할 필요가 없으며, II-5의 간단한 안테나 그룹화에서 계산된 값들을 그대로 사용할 수 있기 때문에 모드를 선택하는 과정이 매우 간단하다는 장점이 있다. 또한 그림 6에서 보듯이, 이 모드 선택 기준을 사용해도 III-1의 모드 선택 기법과 비슷한 BER 성능을 얻을 수 있다.

V. 결 론

MIMO 시스템에서 안테나 그룹화 기법을 통하여 BER 성능을 향상시킬 수 있다. 하지만, 채널 상태가 안테나 그룹화에 적합하지 않을 경우에는 안테나 그룹화의 성능이 열화된다. 본 논문에서는 채널 상태가 안테나 그룹화에 적합하지 않을 경우에는 빔 형성 모드 선택하는 시스템을 가정하였다. 그리고 이전에^[12] 제안한 안테나 그룹화의 기준을 이용하여 안테나 그룹화와 빔 형성 모드를 선택하는 기법을 소개하였다. 그리고 이를 확장하여 더욱 간단한 모드 선택 기법을 제안하였다. 모드 선택 기법을 사용하면, 채널 상태에 상관없이 우수한 성능의 BER을 얻을 수 있다. 따라서 이 기법은 일정 수준의 서비스 품질(QOS(quality of service))을 만족시켜야 하는 고속 전송 시스템에서 사용 가능할 것이다. 한편, 이상적인 모드 선택 기준을 찾으면 안테나 그룹화와 빔 형성 중에 좋은 것보다 좋은 성능을 얻을 수 있을 것이다. 따라서 이상적인 모드 선택 기법을 찾는 연구가 계속되어야 할 것이다.

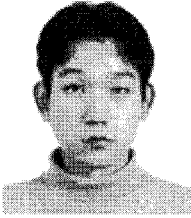
참 고 문 헌

- [1] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *European Transactions on Telecommunications*, Vol.10, No.6, pp.585-595, 1999.
- [2] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communication a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Communications*, Vol.6, No.3, pp 311-335, 1998.
- [3] S. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.16, No.8, pp.1451-1458, 1998.
- [4] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.17, No.3, pp.451-460, Mar. 1999.
- [5] L. Zheng and D. N. C. Tse, "Diversity and multiplexing: a fundamental trade-off in multiple antenna channels," *IEEE Transactions*

- on *Information Theory*, Vol.49, No.5, pp.1073-96, May 2003.
- [6] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, "Capacity limits of MIMO channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.21, No.5, pp.684-702, 2003.
- [7] H. Sampath and A. J. Paulraj, "Joint Transmit and Receive Optimization for High Data Rate Wireless Communication Using Multiple Antennas," *33rd IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Vol.1, pp.215-219, Pacific Grove, Calif, USA, Oct. 1999.
- [8] D. J. Love and R. W. Heath, "Multimode Precoding for MIMO Wireless Systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.53, No.10, part 1, pp.3674-3687, Oct. 2005.
- [9] R. W. Heath and D. J. Love, "Multimode Antenna Selection for Spatial Multiplexing Systems With Linear Receivers," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.53, No.8, pp.3042-3056, Aug. 2005.
- [10] N. Khaled, C. Desset, S. Thoen, and H. D. Man, "Spatial-Mode Selection for the Joint Transmit and Receive MMSE Design," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Vol.2004, Issue 9, pp.1199-1211, 2004.
- [11] I. Kim, K. Lee, and J. Chun, "A MIMO antenna structure that combines transmit beamforming and spatial multiplexing," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.6, No.3, Mar. 2007.
- [12] K. Kim and J. Lee, "Antenna Grouping Technique for MIMO Beamforming Systems," in *Proceedings of 42th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Oct. 2008.
- [13] R. Heath and A. Paulraj, "Switching Between Diversity and Multiplexing in MIMO Systems," *IEEE Transactions on Communications*, Vol.53, No.6, pp.962-968, June 2005.

김 경 철 (Kyungchul Kim)

준회원



2006년 8월 서울대학교 전기
공학부 졸업

2006년 9월~현재 서울대학교
전기컴퓨터공학부 석박통합과정
<관심분야> 이동 통신 시스템,
MIMO, 빔 형성, 모드 선택,
무선 네트워크 코딩

이 정 우 (Jungwoo Lee)

정회원



1988년 2월 서울대학교 전자공
학과 졸업

1990년 2월 Princeton Univ.
Electrical Engineering M.S.

1994년 2월 Princeton Univ.
Electrical Engineering Ph.D.

2002년 9월~현재 서울대학교
전기공학부 교수

<관심분야> 이동 통신 시스템, MIMO, 협력 통신,
무선 네트워크 코딩, 무선 멀티미디어