

다중사용자 MIMO 하향링크 채널 환경에서 시스템 용량 향상을 위한 프리코딩 기법

Precoding Method for Increasing System Capacity in Multiuser MIMO Downlink Channels

김광윤*, 이종식**, 구성완*, 양재수***, 김진영*

(Kwang-yoon Kim *, Jong-Sik Lee **, Sung-Wan Koo *, Jea-Su Yang ***, and Jin-Young Kim *)

Abstract : In this paper, we study precoding techniques for co-channel interference suppression in multiuser MIMO systems. DPC is optimal techniques to achieve the system capacity of multiuser MIMO downlink channels. DPC is not proper in practical wireless systems because complexity is very high. So block diagonal precoding for multiuser MIMO downlink channel is studied. The block diagonal precoding is used to suppress co-channel interference between multiuser. Block diagonal precoding method, whose complexity is reduced by modified null space operation, change multiuser MIMO channel to multiple single-user MIMO channel. We also use V-BLAST decoder in receiver. V-BLAST decoder can achieve increased system capacity in proportion to the number of users. We show improved system performance by using computer simulation.

Keywords: multiuser MIMO, V-BLAST, block diagonalization, co-channel interference

I. 서론

차세대 무선 통신 시스템에서는 다수의 사용자에게 멀티미디어 서비스를 제공하기 위해 높은 시스템 용량 (capacity) 과 전송 신뢰도를 보장하면서 사용자 별로 특화된 정보를 제공하는 시스템을 요구한다. 이를 위해 송신단과 수신단에 여러 개의 안테나를 사용해 주파수 효율과 시스템 성능을 증가시키는 MIMO (multiple-input multiple-output) 시스템에 대한 연구가 활발하다.

초기의 MIMO 시스템 연구는 한 명의 사용자를 위한 단일 사용자 MIMO 시스템에 관한 연구가 이루어 졌으나, 최근에는 다수의 안테나를 가진 기지국에서 다수의 안테나를 가진 다중사용자에게 정보를 전송하는 다중사용자 MIMO 시스템에 관한 연구가 진행 중이다. 특히 다중사용자 MIMO 시스템의 하향링크 (downlink) 채널에는 동일 채널간 간섭 (co-channel interference) 문제가 존재하는데 이를 해결하여 전체 시스템 용량을 크게 증가시킬 수 있는 프리코딩 (precoding) 기법에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다 [1-4].

다중사용자 MIMO 시스템의 하향링크 환경에서 동일 채널 간섭 문제를 해결해 전체 시스템 용량을 증가시키는 방안으로 DPC (dirty paper coding), THP (tomlinson harashima precoder) 와 블록 대각화 (block diagonal) 기법 등의 프리코딩 기법이 연구되었다.

DPC 기법은 다중사용자의 전송 정보와 채널 정보를 사용해 사용자간의 동일 채널 간섭을 알고 있다는 가정하에 사용자들의 간섭 문제를 해결하는 기법으로 전체 시스템 용량은

높지만 송신단과 수신단의 복잡도가 높아 실제 시스템에 적용하기 어렵다는 단점이 있다. THP 기법은 DPC의 복잡도를 낮춘 기법이다. 블록 대각화 기법은 송신단이 수신단으로부터 하향링크 채널 정보를 획득하여 다중사용자간의 신호가 다른 사용자의 신호에 간섭을 주지 않도록 채널을 블록 대각화 시키는 프리코딩을 수행하는 방식으로, 각 사용자의 신호가 다른 사용자 채널의 영공간에 존재하게 된다. 이 방식은 DPC 방식에 비해 복잡도가 낮아 실제 시스템에 적용이 가능하며, 다중사용자 MIMO 하향 채널이 블록 대각화 형태로 변화되어 사용자간의 동일 채널 간섭 문제를 해결하지만 프리코딩에 의해 송신 신호가 제한되면서 전체 시스템 용량은 감소하게 된다 [5-9].

본 논문에서는 프리코딩 과정에서 영공간 연산 과정의 복잡도를 낮추는 영공간 계산 방법을 사용해 송신단의 복잡도를 낮추고 [10], 수신단에서 단일사용자 MIMO 기법인 V-BLAST (vertical bell labs layered space time) ZF (zero forcing) 와 MMSE (minimum mean square error) 기법을 사용하여 전체 시스템 용량을 증가시키는 방법을 제안하였다 [11-12].

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델과 기존의 블록 대각화 프리코딩 기법에 대해 설명하고 III장에서는 송신단에서의 연산량이 감소된 영공간 계산 방식과 수신단의 V-BLAST 기법에 대해 설명하고, IV장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 사용해 기존 기법과의 성능 비교를 할 것이다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺을 것이다.

II. 시스템 모델과 기존 블록 대각화 기법

1. 시스템 모델

다중사용자 MIMO 하향링크 채널에서 K 명의 사용자가 존재하고, N_t 개의 안테나를 가지는 기지국과 i 번째 사용자는 $n_{i,r}$ 개의 안테나를 가지고 전체 사용자의 수신 안테나는 $N_r = \sum_{i=1}^K n_{i,r}$ 개로 나타낸다. i 번째 사용자에게 전송할

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. x. x., 채택확정 : 2008. x. xx.

김광윤 : 광운대학교 전파공학과

(kwangyoon@ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발 사업의 일환으로 수행하였음. [2007-S-029-02, 가정용/기업용 WiBro 시스템 기술개발]

$L_i \times 1$ 송신 벡터는 d_i 라 하고, $N_i \times L_i$ 프리코딩 행렬을 T_i 라 하자. i 번째 사용자의 채널은 $n_{i,r} \times N_i$ 행렬 H_i 라 하고, 채널의 각 원소들은 independently identically distributed (i.i.d.)이고 원소의 평균은 0, 분산은 1인 복소 가우시안 확률변수라 한다. i 번째 사용자가 수신한 $L_i \times 1$ 수신 벡터를 r_i 로 나타낸 전체 시스템 구조는 그림 1과 같다.

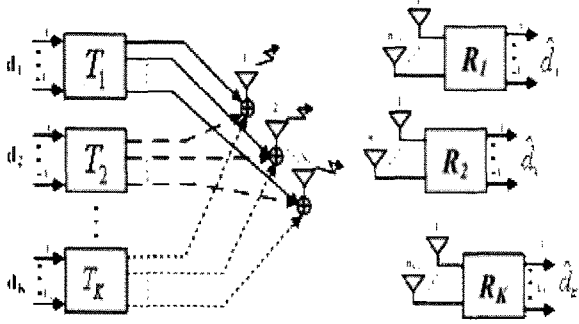


그림 1. 다중사용자 MIMO 시스템.
Fig. 1. Multiuser MIMO system.

이때 r_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_i &= H_i \sum_{k=1}^K T_k d_k + v_i \\ &= H_i T_i d_i + \sum_{k=1, k \neq i}^K H_i T_k d_k + v_i, \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $n_{i,r} \times 1$ 잡음 벡터 v_i 는 independently identically distributed (i.i.d.)이고 원소의 평균은 0, 분산은 σ^2 인 AWGN (additive gaussian white noise) 이다.

기지국의 송신 안테나 개수가 6, 사용자의 수가 3, 사용자 각각의 수신 안테나가 2인 시스템은 $\mathcal{Q}(2,2,2)$ 로 나타낸다.

2. 기존 블록 대각화 기법

다중사용자 MIMO 시스템의 하향링크 환경에서 사용자간의 동일 채널 간섭 문제를 해결하기 위해서는 식 (1)의

$$\sum_{k=1, k \neq i}^K H_i T_k d_k \text{ 이 0이 되어야 한다. 이를 만족하는 프리코딩 행렬 } T_i \text{ 의 조건은 아래와 같이 나타낼 수 있다.}$$

$$H_k T_i = 0, \quad i \neq k \quad (2)$$

식 (2)를 만족하기 위해서는 i 번째 사용자의 프리코딩 행렬 T_i 는 전송 정보 d_i 를 다른 $K-1$ 사용자 채널의 영공간에 존재하도록 해야 한다. 프리코딩 행렬을 만드는 방법과 같다.

먼저 사용자 i 의 채널은 제외한 $(K-1)n_{i,r} \times N_i$ 채널 행렬 \tilde{H}_i 를 아래와 같이 나타낸다.

$$\tilde{H}_i = [H_1^T \ \cdots \ H_{i-1}^T \ H_{i+1}^T \ \cdots \ H_K^T]^T \quad (3)$$

블록 대각화 기법을 만족하기 위해 채널 행렬 \tilde{H}_i 의 영공간을 구해야 하고, SVD (singular value decomposition) 연산을 통해 \tilde{H}_i 의 영공간을 찾을 수 있다. \tilde{H}_i 행렬의 SVD 연산의 결과가 다음과 같다.

$$\tilde{H}_i = \tilde{U}_i \tilde{\Lambda}_i [\tilde{V}_i^1 \tilde{V}_i^0]^* \quad (4)$$

여기서 \tilde{U}_i 는 $(K-1)n_{i,r} \times (K-1)n_{i,r}$ 단위 행렬이고 왼쪽 고유행렬을 의미 하고, $\tilde{\Lambda}_i$ 는 $(K-1)n_{i,r} \times (K-1)n_{i,r}$ 대각화 행렬이다. $[\tilde{V}_i^1 \ \tilde{V}_i^0]^*$ 는 $N_i \times N_i$ 단위 행렬이고 \tilde{V}_i^1 는 첫 \tilde{N}_i 오른쪽 고유행렬 이다. \tilde{V}_i^0 는 마지막 $N_i - \tilde{N}_i$ 오른쪽 고유행렬이고, \tilde{H}_i 의 영공간의 기저 행렬을 의미한다. 여기서 *은 hermitian 연산을 의미하고, \tilde{N}_i 는 \tilde{H}_i 행렬의 랭크를 나타낸다. 여기서 \tilde{V}_i^0 의 열의 길이인 $N_i - \tilde{N}_i$ 가 $n_{i,r}$ 보다 크게 되면 수신 단에서 검출 과정이 복잡해진다. 검출 과정의 복잡도를 낮추면서 시스템 용량을 최대화하기 위해 프리코딩 행렬의 차원을 $n_{i,r}$ 에 맞춘다. 이를 위해 아래와 같이 $\tilde{H}_i \tilde{V}_i^0$ 의 SVD 연산이 필요하다.

$$H_i \tilde{V}_i^0 = U_i [\Lambda_i \ 0] [V_i^1 \ V_i^0]^* \quad (5)$$

여기서 V_i^1 는 $H_i \tilde{V}_i^0$ 행렬의 첫 $n_{i,r}$ 오른쪽 고유행렬이다.

식 (4)와 식 (5)의 SVD 연산에 의해 구해진 \tilde{V}_i^0 과 V_i^1 을 사용해 $N_i \times n_{i,r}$ 프리코딩 행렬 T_i 를 구할 수 있다.

$$T_i = \tilde{V}_i^0 V_i^1 \quad (6)$$

식 (6)에 의해 구해진 프리코딩 행렬 T_i 는 식 (2)의 조건을 만족하게 된다.

시스템의 전체 채널 행렬 H 와 전체 프리코딩 행렬 T 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H &= [H_1^T \ H_2^T \ \cdots \ H_K^T]^T \\ T &= [T_1 \ T_2 \ \cdots \ T_K] \end{aligned} \quad (7)$$

d 가 전체 프리코딩 행렬 T 를 거친 후 N_i 개의 기지국 송신 안테나를 통해 동시에 송신이 된 후, 채널 행렬 H 를 통해서 각 사용자 단말에 수신된다. i 번째 사용자에게 수신되는 신호는 프리코딩 행렬 T 와 채널 행렬 H 의 연산을 통해 블록 대각화 채널을 통과하게 된다. 따라서 다른 사용자의 간섭 (동일 채널 간섭)이 없는 단일사용자 MIMO 형태가 된다. 각 사용자의 채널은 $n_{i,r} \times L_i$ 차원의 $H_i T_i$ 이 된다.

III. 제안하는 시스템 모델

1. 낮은 복잡도의 프리코딩 계산 방법

블록 대각화를 위해 프리코딩 T 결정 과정에서 영공간을 구하기 위해 SVD 연산을 수행한다. 일반적인 $m \times n$ 복소수 행렬의 영공간 연산량은 대략 $6(4m^2n + 8mn^2 + 9n^3)$ 이다 [10]. 이는 복소수 행렬 크기가 커질수록 연산량은 빠르게 증가하게 된다. 연산량의 증가는 기지국 시스템 복잡도를 증가시키고, 그로 인해 사용자수가 제한 되어 전체 시스템 용량이 감소하게 된다.

만약 $m_1 \times n$ 행렬 A_1 과 $m_2 \times n$ 행렬 A_2 가 있을 때 영공간 계산은 아래와 같다.

$$\text{null} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \text{null}(A_1) \cdot \text{null}(A_2 \cdot \text{null}(A_1)) \quad (8)$$

기존 방식의 연산량과 식(8)을 사용했을 때의 연산량을 표 1 에 나타내었다.

표 1. 영공간 연산량.

Table 1. Operations of null space.

	행렬	연산량
기존 방식	$A: (m_1 \ m_2) \times n$ 행렬	$64(m_1 \ m_2)^2 n^3 + 8(m_1 \ m_2) n^2 \cdot 9n^3$
식(8) 방식	$A_1: m_1 \times n$ 행렬 $A_2: m_2 \times n$ 행렬	$6(4m_1^2 n + 8m_1 n^2 \cdot 9n^3) + 4m_2^2 (n - m_2) + 8m_2 (n - m_2)^2 \cdot 9(n - m_2)^3$

표 2는 $m_1 = m_2$ 이고 $n = 3 \times m_1$ 일 때의 계산량을 보여준다. 즉 기존 방식과 식(8)방식의 계산량이 비슷함을 알 수 있다. 하지만 사용자수 K 가 3 이상일 때나 기지국에 접속한 사용자의 일부가 변경될 경우에 식(8) 방식은 이전에 구한 영공간을 이용해서 새로운 영공간을 구할 수 있어 계산량이 기존 방식보다 감소하게 되고 시스템의 복잡도를 낮출 수 있는 방식이다.

표 2. 연산량 비교.

Table 2. Operations comparison.

M	기존 방식	식(8) 방식
2	20880	21072
3	70470	71118
4	167040	168576
5	326250	329250

2. 수신단의 V-BLAST 기법

다중사용자 MIMO 하향링크 채널은 프리코딩 행렬 T 에 의해 블록 대각화가 되기 때문에 다수의 단일사용자 MIMO 채널이 형성되어 동일 채널 간섭 문제가 해결된다. 이때 i 번째 사용자 채널은 $H_i T_i$ 가 된다.

i 번째 사용자의 송신 신호를 복원하기 위해 수신단에서 V-BLAST 방식을 사용한다. V-BLAST 는 rich scattering 환경에서 다수의 안테나를 사용해 주파수 대역폭의 증가 없이 송신 안테나의 개수에 따라 선형적으로 채널 용량이 증가하게 된다. 채널 용량의 증가로 높은 데이터 처리량을 필요로 하는 시스템에 적합하다 [11].

다수의 수신안테나로 수신한 신호를 검출하여 송신 데이터를 복원하는 신호 처리 과정에는 ZF과 MMSE 과정 등이 있다 [12-13].

V-BLAST 신호 처리 과정은 아래와 같다.

1 단계: 추정 확률 결정(nulling 벡터 W_i^1 을 이용)

$$y_i^1 = (W_i^1)^T r_i^1, \quad (9)$$

여기서 nulling 벡터 W_i^1 는 $(W_i^1)^T (H_i T_i) = \delta_{ij}$ 조건을 만족해야 하고, δ_{ij} 는 Kronecker delta 이다.

2 단계: y_i^1 을 quantization 하여 검출 심벌 \hat{d}_i^1 구함

$$\hat{d}_i^1 = Q(y_i^1), \quad (10)$$

여기서 $Q(\cdot)$ 은 quantization(slicing) 동작을 의미한다.

3 단계: 검출 심벌 \hat{d}_i^1 와 전송 심벌 d_i^1 가 같다고 가정하고, i 번째 사용자의 수신 벡터 r_i^1 에서 빼주어 수정된 수신 벡터 r_i^2 를 구함

$$r_i^2 = r_i^1 - d_i^1 (H)_i. \quad (11)$$

검출 심벌 \hat{d}_i^1 를 전부 추정할 때까지 1 ~ 3 단계를 반복한다.

IV. 실험 결과

본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 방식의 성능 검증을 하였다. 채널은 rayleigh fading 이고, 성능 검증 시 기지국은 전체 채널 정보 H 를 알고, i 번째 사용자는 채널 정보 $H_i T_i$ 를 정확히 알고 있다는 가정 후 실험을 하였다.

먼저 그림 2 에서는 기지국에 접속한 사용자가 3 명, 각각의 수신 안테나 개수가 m , 기지국의 송신 안테나 수가 $3m$ 이라고 했을 때 프리코딩 T 연산시 필요한 영공간 계산량을 비교한 그래프이다. 그래프에서 보듯이 사용자별 수신 안테나가 증가해 채널 행렬 H 가 커질수록 기존 방식과 식(8) 방식의 연산량 차이가 커짐을 알 수 있다. 식(8)의 방식은 기존 방식 연산량의 76% 만을 사용해 영공간을 구할 수 있어 기지국의 복잡도가 감소하게 된다.

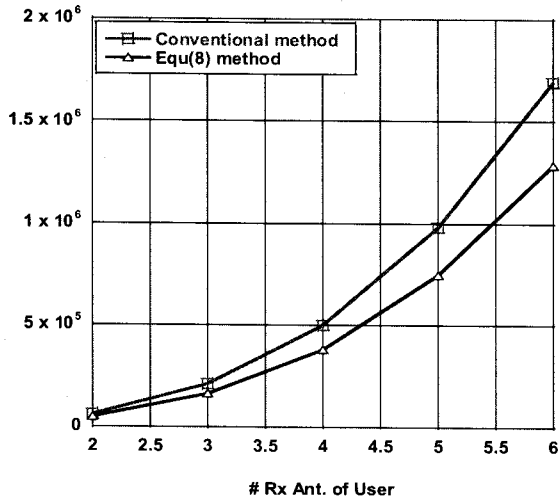


그림 2. 기존 방식과 식(8) 방식의 영공간 연산량 비교.
 Fig. 2. Null space operations comparison between conventional method and equation (8) method.

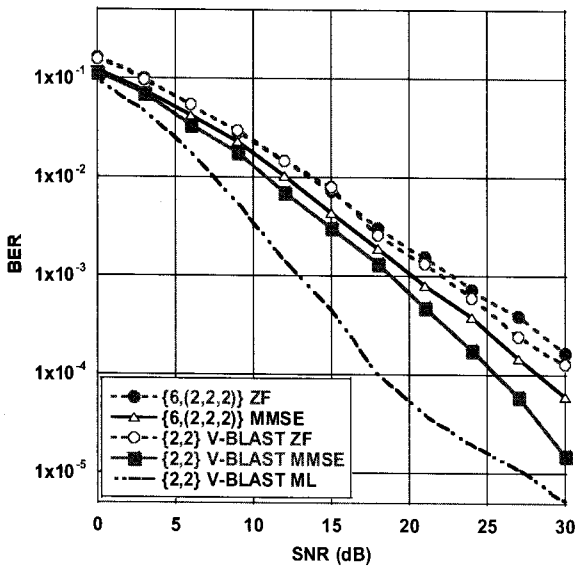


그림 3. 다중사용자 MIMO (블록 대각화) 시스템과 단일 사용자 MIMO 시스템 (V-BLAST)의 에러 성능.
 Fig. 3. Error performance of multiuser MIMO (block diagonalization) and single-user MIMO (V-BLAST).

그림 3에서는 수신단에서 V-BLAST 기법인 ZF, MMSE 방식을 사용해 다중사용자 MIMO 시스템과 단일사용자 MIMO 시스템의 에러 성능을 비교하였다. 그래프에서도 보듯이 단일사용자 MIMO 시스템의 성능이 다중사용자 MIMO 보다 좋음을 알 수 있다. 이는 다중사용자 MIMO 시스템 하향 링크 채널이 프리코딩 T에 의해 블록 대각화되고, 이로 인해 다중사용자 MIMO 시스템이 다수의 단일사용자 MIMO 시스템으로 변경된다. 이 과정을 통해 사용자간의 동일 채널 간섭은 억제되었지만, 프리코딩 T 도출 과정에서 단일사용자 채널간의 상관도가 증가하게 되어 에러 성능이 떨어지게 된다. 하지만 수신단에서 V-BLAST를 사용하면 사용자수와 비례해서 시스템 용량이 증가한다.

V. 결론

본 논문에서는 다중사용자 MIMO 시스템에서 동일 채널 간섭 문제를 해결하는 블록 대각화 프리코딩 방식에 대해 기술하였다. 송신단에서 시스템 채널을 블록 대각화 시키는 프리코딩을 사용함으로써 다중사용자 MIMO 채널은 다수의 단일사용자 MIMO 채널화 되고, 전체 시스템 용량이 증가하는 효과가 있다. 본 논문에서는 식(8)의 영공간 특성을 사용해 영공간 연산량이 감소됨을 보였고, 이로 인해 송신단의 복잡도가 감소한다. 또한 수신된 신호에서 전송 신호를 추정하기 위해 V-BLAST decoder 방식을 사용하였다. V-BLAST 방식 사용시 에러 성능은 다중사용자 MIMO 시스템이 기존 단일사용자 MIMO 시스템보다 조금 떨어지는 결과를 보였다. 이는 프리코딩 T를 도출하는 과정에서 채널 간 상관도가 증가했기 때문이다.

차후에는 채널 간 상관도의 증가가 발생하지 않는 블록 대각화 프리코딩 기법에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

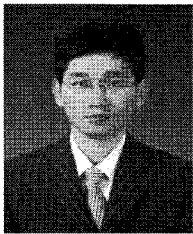
참고문헌

- [1] C. Windpassinger, R. F. H. Fischer, T. Vencel, and J. B. Huber, "Precoding in multi-antenna and multi-user communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 4, pp. 1305-1316, July 2004.
- [2] Q. H. Spencer, C. B. Peel, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "An introduction to the multi-user MIMO downlink," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 60-67, October 2004.
- [3] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 52, no. 2, pp. 461-471, February 1990.
- [4] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, "Capacity limits of MIMO channels," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 21, no. 5, pp. 684-702, June 2003.
- [5] L. U. Choi and R. D. Murch, "A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 1, pp. 20-24, January 2004.
- [6] V. Stankovic and M. Haardt, "Generalized design of multi-user MIMO precoding matrices," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 3, March 2008.
- [7] Z. Shen, R. Chen, J. G. Andrews, R. W. Heath, and B. L. Evans, "Sum capacity of multiuser MIMO broadcast channels with Block Diagonalization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 6, pp. 2040-2045, June 2007.
- [8] S. Shim, J. A. Kwak, R. W. Heath, and J. G. Andrews, "Downlink MIMO block diagonalization in the presence of other-cell interference," *IEEE GLOBECOM 07*, pp. 4354-4358, November 2007.
- [9] S. Lin, W. L. Ho, and Y. Liang, "MIMO broadcast communications using block-diagonal uniform channel decomposition (BD-UCD)," *IEEE Inter. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.*, pp. 1-5, September 2006.
- [10] 정진근, 이용훈, "다중 사용자 MIMO 시스템을 위한 순차적 영공간 계산," *한국통신학회논문지*, vol. 32, no. 12, pp. 1238-1243, December 2007.

[11] G. J. Foschini, "Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment when using Multi Element Antennas," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 2, pp. 41-59, August 1996.

[12] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates over the Rich-Scattering Wireless Channel," *Proc. IEEE ISSSE-98*, pp. 295-300, September 1998.

[13] M. Jankiraman, *Space-Time Codes and MIMO Systems*, Artech House Publishers, 2004



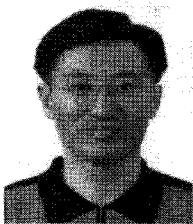
김 광 윤

2007년 광운대학교 전파공학과 (공학사). 2007년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 디지털 무선 통신, MIMO, OFDM.



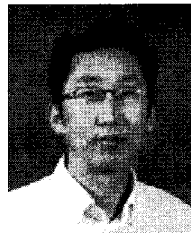
구 성 완

2008년 광운대학교 전파공학과 (공학사). 2008년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 디지털통신, VLC, OFDM, MIMO.



김 진 영

1998년 서울대 전자공학과 (공학박사). 1998년 ~2000년 미국 Princeton University, Research Associate. 2000년 ~2001년 SK텔레콤 네트워크 연구원 책임연구원. 2001년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 교수. 관심분야는 디지털 통신, 신호처리, 채널 부호화.



이 종 식

1996년 서울대학교 전기공학부 (공학사). 1998년 서울대학교 전기공학부 (공학석사). 1998년 ~ 현재 KT 인프라인연구소 책임연구원. 관심분야는 WiBro System 개발.



양 재 수

1981년 한국항공대학교 통신공학과 (공학사). 1985년 건국대학교 전자공학과 (공학석사). 1993년 미 NJIT 전기 및 컴퓨터공학 (공학박사). 1991년 서울대 MBA 수료. 2006년 ~ 현재 광운대학교 교수. 2007년 ~ 현재 경기도 정보화보좌관. 관심분야는 디지털통신, RFIDUSN, 차세대 이동통신.