다중경로 페이딩 환경에서 와이브로 스마트 안테나 시스템의 적응 빔포밍 기술 연구

AN ADAPTIVE BEAMFORMING TECHNIQUE FOR WiBro SMART ANTENNA SYSTEM IN MULTIPATH FADING CHANNEL

조 용 진*, 오 태 열, 정 재 호, 최 승 원
(Yongjn Jo , Taeyoul Oh , Jaeho Chung and Seungwon Choi)

Abstract : Multiple antenna technology, such as multiple input multiple output (MIMO), beamforming is one of the most promising technology for broadband wireless communication. In OFDM environment, we found that as the number of paths is increased, smart antenna system cannot fully exploit beamforming gain. In this paper, we propose a beamforming scheme and analyze the performance of the proposed beamforming scheme in WiBro smart antenna system. WiBro is an OFDMA-based multiple access service for wireless broadband multimedia environment. The proposed beamforming technique for WiBro smart antenna system can effectively improve the performance of the systems in multipath fading environment.

Keywords: Smart antenna, Beamforming

I. 서론

차세대 이동통신 시스템에서는 현재 서비스 중인 음성 신호 뿐 아니라, 영상 및 기타 데이터를 높은 신뢰도로 송수신해야 한다. 이와 같이 다양한 서비스를 제공하기 위하여, 각 가입자당 현재보다 훨씬 넓은 대역폭을 차지할 수밖에 없는데, 전체 시스템의 할당 주파수가 한정되어 있으므로 통신용량이 현저히 줄어 들 수밖에 없다. 따라서 한정된 전파 자원에서 기지국 용량을 증가시키기 위한 방법들이 많이 연구되어 지고 있다. 그 중에서 가장 각광받고 있는 연구가 바로 스마트 안테나 시스템으로 기지국의 용량을 증가시키는 방법이다. 스마트 안테나 시스템은 셀 내의 각 가입자들에게 최적의 빔을 설정해 줌으로써 간섭 파워를 줄여 결과적으로 통신용량 증대와 통신의 신뢰도 향상을 이루게 하는 혁신적인 기술이다. 또한 고속의 data 서비스 지원이 가능한 OFDM 기술과 스마트 안테나 시스템이 결합된 방법들에 대한 연구가 많이 이루어졌다.

OFDM 방식은 사용하고자 하는 주파수 대역을 여러 개의 작은 주파수 대역(부채널)으로 분할하여 데이터를 전송하는 주파수 분할 다중화(FDM : Frequency Division Multiplexing) 방식의 일종으로 볼 수 있다. 즉, 전송하고자 하는 일련의 데이터 시퀀스를 부 채널의 수만큼 병렬화하고 각각의 병렬 데이터로 각 부 채널에 해당하는 부 반송파를 변조시키는데 각 부 채널은 직교성을 갖는 부 반송파로 분리되게 된다. OFDM 방식은 상대적으로 ISI에 강하고, Frequency Selective fading의 영향을 적게 받으며, 기존 FDM방식에 비해 효율적인 대역폭 사용이 가능한 장점을 가지고 있다.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2008. 7. 19., 채택확정 : 2008. 7. 31.
최승원 : 한양대학교 전자통신컴퓨터대학원
(choi@dsplab.hanyang.ac.kr)
※ 본 연구는 대학 IT 연구센터 육성지원사업의 연구결과로써 HY-SDR연구센터의 연구비 지원으로 수행되었음.

본 논문은 OFDM 기반의 스마트 안테나 시스템 빔포밍 기술에 대하여 살펴보았다. 현재 차세대 이동 통신의 새로운 표준으로 대두되고 있는 OFDMA에 기반한 WiBro/WiMAX Uplink PUSC(Partial Usage of Subchannel) 환경에서 스마트 안테나 시스템 빔포밍 기술에 대하여 적용하고 분석해보았다. WiBro(Wireless Broadband)는 IEEE 802.16-2004[2]와 802.16e-2005[3]를 기반으로 해서 한국에서 채택된 2.3GHz 대역의 이동 통신 표준이며, 최근에 세계 최초로 상용화에 성공하여, 현재 대중에게 서비스되고 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 스마트 안테나 시스템에 대해 알아보고, 스마트 안테나 시스템의 기술인 적응 빔포밍 기술에 대해 살펴본다. 3장에서는 스마트 안테나 시스템이 적용된 WiBro/WiMAX 상향링크환경에 대해 살펴보고, 4장에서는 이를 근거로 한 시뮬레이션 결과를 살펴본다. 5장에서 본 논문의 결론으로 마무리 한다.

II. 적응 빔포밍 기술

a. 스마트 안테나

일반적으로 이동통신 시스템의 기지국 안테나는 전방향 안테나(Omnidirectional Antenna)가 사용되어 방향에 상관없이 일정한 이득을 주도록 제작한다. 이럴 경우 안테나에 송수신되는 모든 신호들은 기지국의 송수신 안테나와의 거리에 따라 Power의 정도를 달리하여 송수신되며 송수신 희망 신호에 간섭의 영향을 미친다. 따라서 이 기지국 안테나는 선택적으로 신호에 이득을 주어 송수신할 수 없다. 이러한 간섭의 영향을 줄이기 위해 셀을 여러 섹터로 나누어 여러 개의 안테나를 사용하는 방법이 있는데, 가령 셀을 3개의 섹터로 나누어 3개의 안테나를 사용하여 각 안테나가 120도를 담당하도록 한다면 간섭의 영향을 1/3로 줄일 수 있다.

간섭의 영향을 줄일 수 있는 방법으로 여러 안테나 소자로 구성된 어레이를 사용하는 것이다. 스마트 안테나 시스템이란 배열된 안테나의 위상을 제어하여 특정 신호(원하는 방향

의 신호)를 선택적으로 송수신하고 간섭 신호의 영향을 최소화시킴으로써 가입자 상호간의 간섭을 대폭 감쇠시킨 것이다. 즉 셀 내의 각 단말기에 독립된 빔을 송수신간에 제공하고 원하는 단말기 방향으로 이득을 극대화되도록 빔형성 시킴으로서 여타의 단말기 방향에 전파량을 극소화할 수 있다. 그러므로 수신 신호의 잡음을 대폭 감쇠시킨다.

스마트 안테나 시스템은 통화 채널 간 간섭을 최소화하여 통화 품질을 향상시키고 가입자 수를 증가시킬 수 있는 시스템이며 원하는 방향으로 전파가 집중되어 각 단말기는 저전력으로 통화가 가능하므로 배터리 수명을 획기적으로 연장할 수 있는 기술이다. 결국 스마트 안테나 시스템이란 각 단말기 방향으로 최적의 빔패턴을 제공하여 통신 용량을 증대시키고 통신 품질을 대폭 개선할 수 있는 지능형 기지국을 실현하는 기술이다.

b. 시스템 모델

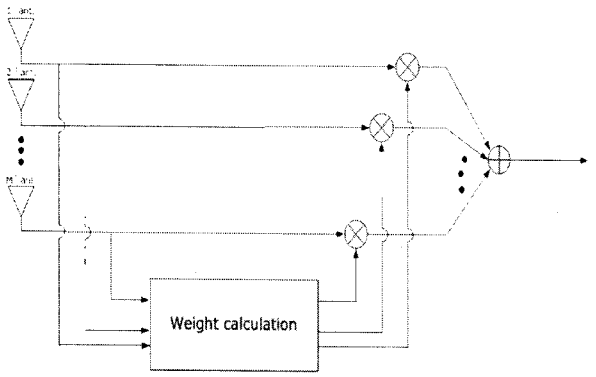


그림 1. 스마트 안테나 시스템의 블록다이어그램

기지국은 M개의 배열 안테나가 반파장의 간격을 두고 떨어져 있으며, 각 안테나는 전방향으로 일정한 이득을 주도록 제작되었다라고 고려하자. 상향링크 채널에서 jh 단말기에서 기지국으로 전송될 baseband 신호를 $s_i(t)$ 라고 명명하자. 채널은 K개의 시간 지연된 경로에 의해 표현된다고 한다. 이때, 수신 신호 y(t)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y(t)=\sum_{k=1}^{K} s_k(t-\tau_k)h_k(t)a_k(\theta_k)+n(t) \qquad (1)$$

여기서, h_k 는 k번째 tap의 이산시간 채널 응답

$$\underline{\mathbf{n}}(t) \sim N_c(0,\sigma^2 \underline{\underline{\mathbf{I}}})$$

θ_k 는 수신 신호 s_k 의 입사각

$a_k(\theta_k)$는 k번째 채널의 방향벡터(steering vector)

OFDM에서 수신 신호는 Frequency-selective fading 채널을 겪게 된다. 따라서, Frequency-selective fading 채널의 주파수 응답을 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{H}(t)=\sum_{k=0}^{K} h_k(t)a_k(\theta) \qquad (2)$$

여기서, 최적의 웨이트 벡터는 $\tilde{H}_k^H(t)\tilde{H}_k(t)$ 의 최대 아이젠값에 해당하는 아이젠벡터가 되게 된다.

c. 적응 빔포밍 기술

채널의 covariance matrix를 다음과 같이 정의하자.

$$R_{\tilde{H}}=E\left[\tilde{H}^H(t)\tilde{H}\ (t)\right] \qquad (3)$$

여기서, $E[\bullet]$: expectation.

우리는 covariance matrix가 시간의 영향을 받지 않는다고 가정한다.

그러면 $R_{\tilde{H}}$ 의 eigendecomposition으로부터 실수이며 양수인 아이젠값과 orthogonal한 아이젠벡터를 얻을 수 있다.

$$R_{\tilde{H}}=E_k\Lambda_k E_k^H \qquad (4)$$

여기서, $E_k=[e_1 e_2 \ldots e_k]$

$$\Lambda_k=diag\{\lambda_i\}_{i=1}^{k}\ ,\ \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \ldots \geq \lambda_L \geq 0$$

따라서, 최적의 웨이트 벡터는 $R_{\tilde{H}}$ 의 최대 아이젠값에 해당하는 아이젠벡터인 e_1 이 된다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 최대 아이젠값에 해당하는 아이젠벡터를 웨이트벡터로 사용하여 적용한 경우 빔포밍 이득을 얻게 된다. 이때 N개의 배열 안테나가 얻을 수 있는 최대 SNR 이득은 $10\log(N)$ 가 된다. 그러므로, 배열 안테나 개수가 늘어남에 따라 빔포밍 이득은 증가해 성능이 좋아짐을 알 수가 있다.

그러나 다중경로 상황에서는 우리가 원하는 빔포밍 이득을 완전히 얻기가 힘들다. 왜냐하면 각 경로가 서로 다른 입사각을 통해 들어오게 되므로, 각 경로에 해당하는 웨이트 벡터가 서로 다르기 때문에 하나의 웨이트 벡터로는 모든 경로를 보상해 주기가 어렵기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 여러 개의 웨이트 벡터를 사용하여 빔포밍이득과 다이버시티이득을 함께 얻는 방법을 알아보고자 한다.

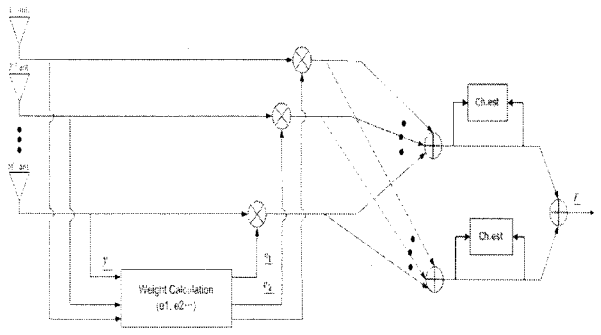


그림 2. 두 개의 아이젠벡터를 이용하는 빔포밍 기술의 블록 다이어그램

간단하게 그림 2에서와 같이 수신 단에서 웨이트벡터 2개를 이용한 시스템이라고 가정한다. 그렇다면, 수식 (1)에서 표현한 수신신호 $\underline{y}$ 를 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\underline{y} = s \cdot \underline{\tilde{H}} + \underline{n} \tag{5}$$

각각의 웨이트 벡터를 계산한 후 웨이트를 결합 후 채널 추정하여 구한 r 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r &= \underline{e_1^H} \cdot \hat{h}_1 \cdot \underline{y} + \underline{e_2^H} \cdot \hat{h}_2 \cdot \underline{y} \\ &= \left(\underline{e_1^H} \cdot \hat{h}_1 + \underline{e_2^H} \cdot \hat{h}_2\right) \cdot \underline{y} \\ &= \left(\underline{e_1^H} \cdot \hat{h}_1 + \underline{e_2^H} \cdot \hat{h}_2\right) \cdot \left(s \cdot \underline{\tilde{H}} + \underline{n}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $\hat{h}_1, \hat{h}_2$ 는 웨이트 결합 후 각각의 추정된 채널값이다.

$\underline{\tilde{H}}$ 는 수식(2)에서 표현되었듯이 $(h_1 \cdot \underline{e_1} + h_2 \cdot \underline{e_2} + \cdots)$ 가 됨을 알 수 있다.

따라서 최종적으로 검출된 신호 r 는 다음과 같이 다이버시티 이득을 얻는 수식으로 표현될 수 있음을 알 수 있다.

$$r = \left(|h_1|^2 + |h_2|^2\right) \cdot s \tag{7}$$

우리는 수식(5)에서 (7)의 과정을 통해 여러 개의 아이젠벡터를 이용할 경우, 기본적으로 배열 안테나에 의한 빔포밍 이득 뿐만 아니라 다이버시티 이득을 얻음으로써 성능이 크게 향상될 수 있음을 알 수 있다.

III. WiBro/WiMAX 구조

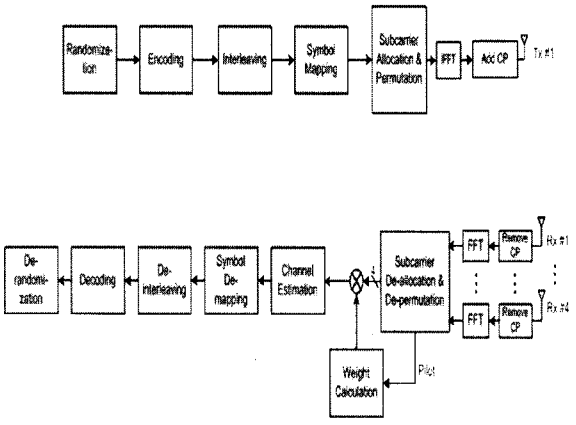


그림 3. WiBro/WiMAX 스마트 안테나 시스템의 상향링크 블록 다이어그램

이번 절에서는 OFDMA 기반 무선통신 표준인 WiBro/WiMAX의 구조에 대해 살펴본다.

그림 3은 WiBro/WiMAX 시스템에서 스마트 안테나 기술을 적용한 전체 시스템 구성도이다. 송신부에서는 MAC(Medium Acess Control)에서 FEC 블록에 맞게 나누는 Slot Concatenation을 한 후 Randomization, Encoding, Interleaving, Repetition을 하고 프레임 포맷에 맞게 파일럿을 삽입하고, Modulation, Permutation, IFFT를 거친 후 CP를 붙여 전송하게 된다. 수신 시에서는 송신과 반대과정을 거치게 된다. 다만 스마트 안테나의 경우, Subcarrier De-permutation후 웨이트 벡터를 구하여 곱하는 과정이 추가되며 이후에 채널 추정과정을 거치게 된다. 나머지 과정은 송신과 반대과정으로 진행되게 된다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 WiBro/WiMAX downlink 환경에서의 스마트 안테나 시스템이 적용된 시스템에 대하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터들은 표 1과 같다. 각각의 Scheme들을 SNR 대비 BER 관점에서 비교 분석한다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value
Permutation 모드	PUSC
반송파 주파수	2.3 GHz
채널 대역폭	8.75 MHz
FFT 사이즈	1024 point
데이터 부반송파 개수	720
파일럿 부반송파 개수	120
TDD 프레임 구간	5ms
CP(Cyclic Prefix) Ratio	1/8
도플러 주파수	127 Hz
변조 방식	QPSK
채널 코딩	Convolutional Coding(1/2)
송신 안테나 개수	3, 4, 5, 6
수신 안테나 개수	1
사용된 슬롯 개수	20

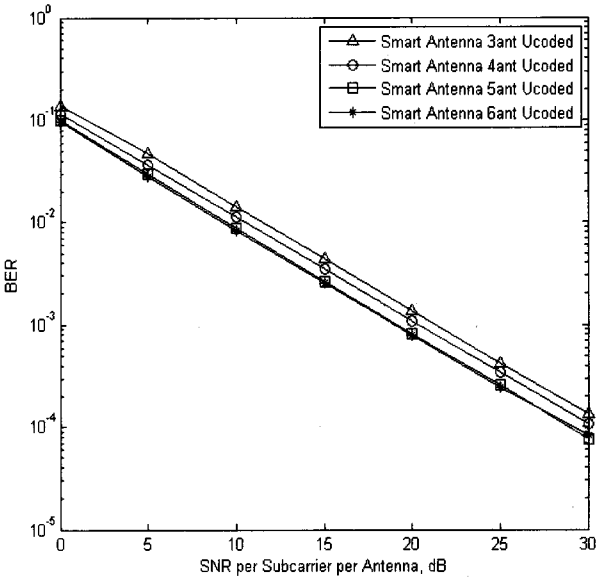


그림 4. 안테나 수 증가에 따른 스마트 안테나 시스템의 성능 그래프

그림 4는 스마트 안테나 시스템의 배열 안테나 개수가 늘어남에 따라 시스템의 성능그래프를 보여준다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이, 다중경로 페이딩 환경에서는 배열 안테나 수가 늘어난다고 해도 빔포밍 이득 증가의 차이가 별로 없다는 것을 알 수 있다.

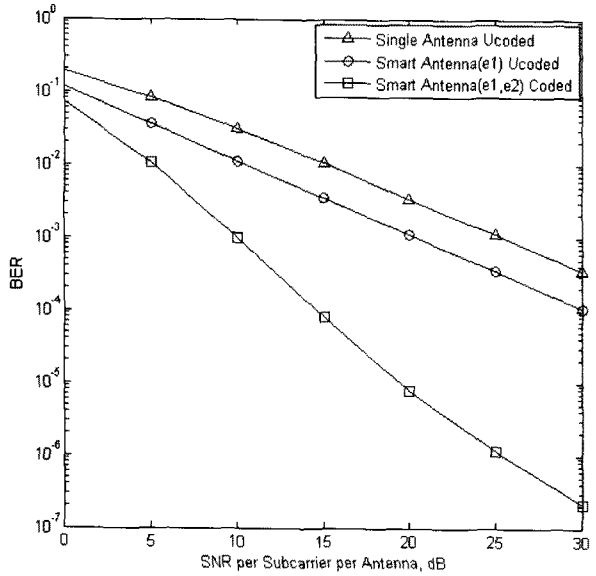


그림 5. 모바일이 이동 중인 상황에서 빔포밍 기술의 성능 그래프

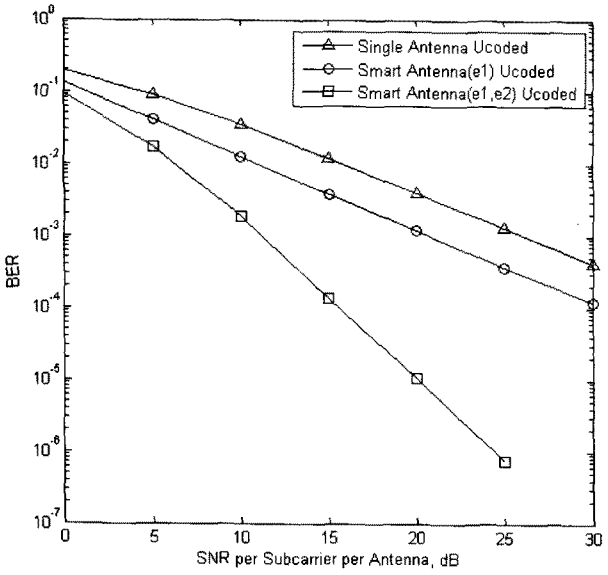


그림 6. 모바일이 정지 중인 상황에서 빔포밍 기술의 성능 그래프

그림 5와 6은 다중 경로 페이딩 환경에서 모바일이 이동중인 경우와 정지중인 상황에서 스마트 안테나 시스템의 빔포밍 기술에 대한 성능 그래프를 보여준다. 빔포밍 기술로는 하나의 아이젠벡터를 이용하는 경우와 두 개의 아이젠벡터를 이용하는 경우에 대한 성능 그래프를 비교한다.
시뮬리에션 결과에서 볼 수 있듯이, 두 개의 아이젠벡터를 이용하는 빔포밍 기술이 하나의 아이젠벡터를 이용하는 빔포밍 기술보다 모바일이 어떤 상황에서든 상관없이 성능이 크게 향상되는 것을 알 수 있다. 이것은 두 개의 아이젠벡터를 이용하여 수신단에서 MRC기법을 이용하기 때문에 다이버시티 이득을 얻어서 성능이 향상될 수 있는 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 다중안테나 OFDM전송기술 중 하나인 스마트 안테나 OFDM기술에 대하여 살펴보았고, 이를 Wi-Bro/WiMAX 상향링크 환경에 적용하여 성능을 확인해 보았다. 시뮬레이션 결과에서 보는 것처럼 스마트 안테나 시스템인 수신 단에 다중안테나를 사용하는 것이 일반적으로 송신단과 수신 단에 하나의 안테나를 사용하는 경우보다 성능이 좋은 것을 알 수 있었다. 하지만 실제 다중경로 페이딩 환경에서는 스마트 안테나 시스템의 빔포밍 이득을 완전히 얻기 힘들다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 여러 개의 웨이트 벡터를 이용하여 MRC하는 방법을 통해 빔포밍 이득과 다이버시티 이득을 얻음으로써 시스템 성능을 크게 향상시킬 수 있다는 것을 보았다.

현재까지 OFDM기반의 스마트 안테나 시스템의 빔포밍 알고리즘에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 따라서 본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 WiBro/WiMAX 환경에 빔포밍 기술을 적용해보고 성능을 분석해 보았다.

VI. 참고문헌

[1] J. Choi, S. R. Kim, In. Choi, " Statistical Eigen-Beamforming With Selection Diversity for Spatially Correlated OFDM Downlink", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 56, no. 5, Sep. 2007

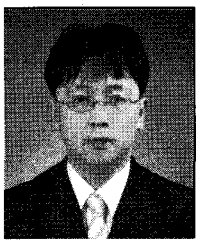
[2] IEEE 802.16-2004, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," October 2004.

[3] IEEE 802.16e-2005, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, Amendment 2:Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands", February 2006.

[4] S. Choi and D. Shim, "A novel adaptive beamforming algorithm for a smart antenna system in a CDMA mobile communication environment, " IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 49, no. 5, pp. 1793-1806, Sep. 2000

[5] John GProakis, Digital Communications 4thEdition., McGRAWHILL,2

[6] Richard Van Nee, Ramjee Pr asad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers, 2000.

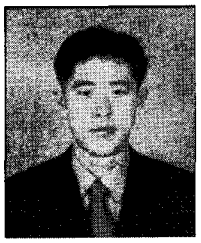


조 용 진

2006년 단국대학교 전자공학부 졸업
2007년~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터대학원 석사과정 재학중. 관심분야는 Smart antenna, OFDM, MIMO.

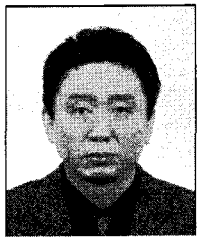
정 재 호

1994년 중앙대학교 전자공학과 졸업
1994년 1월~2001년 4월 (주) 데이콤
2001년 University of Minnesota at Twin Cities 전기 및 컴퓨터공학과 석사 졸업
2001년 8월~2005년 7월 삼성전자 디지털미디어연구소 책임연구원
2005년 8월~현재 KT 인프라연구소 책임연구원
2008년 2월~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 다중 안테나 기술 (MIMO, Beamforming), 통신시스템 설계, WiBro 및 3G/4G 기술.



오 태 열

2001년 대구대학교 정보통신공학과 졸업
2006년 한양대학교 전자통신컴퓨터대학원 석사 졸업
2006년~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 Smart Antenna, SDR, MIMO.



최 승 원

1980년 한양대학교 전자공학과(공학사). 1982년 서울대학교 전자공학과(공학석사). 1985년 Syracuse University(공학석사). 1988년 Syracuse University(공학박사). 1992년~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 Smart antenna, SDR, MIMO