

공간변조 시스템에서 채널 용량 기반 송신 안테나 선택 기술

임한영¹ · 정방철^{2*}

Transmit Antenna Selection Technique Based on Channel Capacity for Spatial Modulation Systems

Han Young Yim¹ · Bang Chul Jung^{2*}

¹ KAIST Institute for Information Technology Convergence, KAIST, Daejeon, 305-701, Korea

² Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, 650-160, Korea

요 약

본 논문에서는 공간변조 (Spatial Modulation, SM) 시스템에서 다중안테나 채널 용량을 고려한 송신 안테나 선택 기술을 제안하고 그 성능을 분석한다. 각 송신 안테나에서 수신안테나까지의 채널 벡터의 크기에 기반하여 안테나를 선택하는 기존 기술과 비교할 때, 제안하는 기술은 채널용량 자체를 계산하여 전체적인 공간변조 시스템의 용량 증가를 가져온다. 전체 안테나 중 사용할 안테나의 집합을 선택하는 모든 경우를 비교하여 최적의 안테나 집합을 선택하는 최적 방법 (Optimal)을 제시하고, 추가적으로 계산 복잡도를 줄이면서 최적 성능과 유사한 성능을 제공하는 Sub-Optimal 기술을 함께 제시한다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 안테나 선택 방법이 기존의 안테나 선택 방법에 비하여 bit error rate(BER) 측면에서 월등한 성능을 제공함을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, a novel spatial modulation (SM) with transmit antenna selection (TAS) based on maximizing channel capacity is proposed. Comparing to the conventional TAS technique, the proposed TAS considers the channel capacity of the MIMO channel with antenna selection. The optimal antenna set selection is applied to SM by taking account of the all possible sets, and then, a sub-optimal antenna set selection is also proposed for reducing the computational complexity of the optimal method. Computer simulations show that the proposed TAS significantly outperforms the existing SM scheme based on the magnitude of the channel vectors in terms of bit error rate (BER) in various environments.

키워드 : 공간변조시스템, 다중안테나, 송신 안테나 선택, 채널 용량, 계산복잡도

Key word : Spatial modulation, multiple antennas, transmit antenna selection, channel capacity, computational complexity

접수일자 : 2013. 09. 23 심사완료일자 : 2013. 11. 05 게재확정일자 : 2013. 11. 10

* **Corresponding Author** Bang Chul Jung(E-mail:bcjung@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9171)

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2013.17.11.2521>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

다중 안테나 (multiple input multiple output, MIMO) 기술은 단일 안테나 기술에 비교하여 동일한 시간 및 주파수 자원을 사용하면서도 더 높은 전송 용량을 제공할 수 있다. Space time coding (STC) 기술은 다이버시티 이득을 통하여 비트 오류 감소를 통하여 전송 용량을 증대시킬 수 있고, V-BLAST 등의 spatial multiplexing 기술들은 복수개의 데이터 스트림을 다중안테나를 이용하여 동시에 전송함으로써 이론적 상한치에 근접하는 높은 전송 용량을 달성할 수 있다고 알려져 있다. 그러나 이런 기술들을 실제 구현하기 위해서는 송수신단 각각에 안테나 수와 일치하는 RF 소자가 필요한데, 안테나의 수가 많은 경우에는 RF 소자의 비용이 매우 커지게 되는 단점이 있다 [1].

최근 송수신 안테나의 수와 관계 없이 단일 RF 소자를 이용하여 구현 가능하며, 비트 오류 (bit error rate, BER) 측면에서도 좋은 성능을 얻을 수 있는 공간변조 (spatial modulation, SM) 기술이 제안되었다 [1]. 공간변조 기술은 송신단의 안테나와 신호 변조의 constellation에 송신단 정보를 매핑하여 전송하는 기술이다. 정보 매핑 과정은 2단계로 구성되어 있는데, 먼저 송신단의 안테나를 2진수의 값으로 구분하고 데이터를 그 값에 매핑한다. 그 후 이어지는 데이터를 2진수의 값으로 구분된 신호 변조 방식에 따른 constellation 값에 매핑한다. 이렇게 생성된 공간변조 신호는 다수개의 안테나 중 매핑된 하나의 안테나를 통하여 수신단에 전달된다 [2]-[3].

공간변조 기술은 기존의 일반적인 다중 안테나 기술과 비교할 때, 데이터 스트림이 직접적으로 안테나에 전달되지 않고, 데이터 스트림의 값에 따라 공간적으로 신호가 실릴 안테나가 선택되는 특징이 있다. 공간 변조를 통해 송신된 신호는 수신단에서 SIMO (single input multi output) 채널 환경에서 사용 가능한 MF (matched filter) 또는 ML (maximum likelihood) 등의 수신 기술을 통하여 복호된다. [4]에서는 수신단에서 채널 정보를 활용하여 MF 방법의 수신기를 통하여 공간변조된 신호의 복호 성능을 도출하였다. 도출된 결과에 따르면, 기존의 MIMO 전송 방식을 사용하는 경우에 비하여 공간변조 방식이 더 좋은 성능을 제공할 수 있음을 확인할 수 있다. [2]에서는 ML 수신 기법을 이용

하여 공간변조 방식의 성능을 도출하였다. ML기반의 수신 기법은 MF방법에 비교하여 성능이 매우 우수하지만, 수신단의 계산복잡도가 증가하는 단점이 이어, 실제 구현 관점에서는 MF와 ML중 적절한 선택이 필요하다.

한편, 최근의 다중 안테나 기술은 송수신단의 안테나 수가 매우 많은 환경을 고려하는 Massive MIMO 환경을 고려하고 있는데, 앞서 언급한 기본적인 공간변조 기법은 안테나 수가 증가함에 따른 성능 이득의 증가를 보장하지 않는다. 즉, 송수신 안테나가 많은 경우에 있어서는 모든 안테나를 활용하여 공간변조를 동작시키는 것이 효과적이지 않다는 것이다. 따라서, 안테나가 더욱 많은 환경에서는 송신단에서 다수개의 안테나 중 실제 데이터 전송에 사용할 안테나 집합을 선택하여 선택 이득을 얻고, 이후 선택된 소수의 안테나 집합을 이용하여 공간변조를 동작시키는 것이 더욱 좋은 방법이 될 수 있다 [5].

안테나 선택 방법으로는 특정한 송신 안테나로부터 다수 개의 수신 안테나로 형성된 채널 벡터의 크기가 큰 순서대로 선택하는 기법이 사용될 수 있다 [5]. 안테나 선택 기술을 적용한 공간변조 기술의 BER 성능은 안테나 선택이 없는 경우에 비하여 뛰어나다. 하지만, 송신 채널 벡터 크기 기반의 안테나 선택 기술은 전체 MIMO 채널에서 사용할 안테나 집합의 각 채널 간의 상호 관계를 고려하지 않고, SIMO 채널로 단순화 시켜 안테나 선택을 하는 것으로 볼 수 있다. 이에, 위 기술은 안테나 선택에 있어서 이득을 더욱 극대화 할 수 있는 여지가 있다.

본 논문에서는 MIMO 환경의 안테나 선택의 이득을 극대화하는 방법으로 선택된 송신안테나 집합과 수신 안테나로 구성된 MIMO 채널의 용량에 기반한 새로운 송신안테나 선택 기법을 제안한다. 제안 기술을 통하여, 송신단에서 기존 채널 벡터의 크기에 기반한 안테나 선택 알고리즘보다 효과적인 안테나 선택 기법을 적용하여 공간변조 시스템의 성능을 크게 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 시스템 모델을 설명하고, 3장에서는 제안된 안테나 선택 기술의 구체적인 방안을 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 결과를 보이고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 장에서는 제안 기술이 제안된 시스템 모델에 대하여 설명한다. 송신단은 N_t 개의 안테나, 수신단은 N_r 개의 안테나를 가지며, 송수신단 MIMO 채널행렬의 각 원소는 각각 독립인 circularly symmetric complex Gaussian 랜덤 변수를 가정한다. 위의 가정에 따라서 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$Y = HX + N,$$

여기서 $Y \in C^{N_r \times 1}$ 는 수신단의 수신 신호벡터를 표현하며, $H \in C^{N_r \times N_t}$ 는 송수신단의 채널 행렬이며, $X \in C^{N_t \times 1}$ 는 송신단의 송신 신호 벡터를 표현한다. $N \in C^{N_r \times 1}$ 은 수신단의 잡음 벡터를 표현하며, 각각의 원소는 $CN(0, N_0)$ 을 따르며, N_0 는 수신 잡음의 전력을 나타낸다.

송신단에서 공간변조 과정을 거치게 되면, 전송 신호를 어떤 안테나로 전송을 할 것인지와 어떤 변조 신호를 보낼 것인가에 따라서, 송신 신호 벡터 X 는 다른 값을 가지게 된다. 예를 들어, 송신 안테나 4개 중 1번째 안테나가 데이터에 따라 결정되고, BPSK 변조 신호 중 +1가 데이터에 따라 결정된 경우 X 는 다음과 같은 값을 가지게 된다.

$$X = (+1, 0, 0, 0)$$

위 값을 데이터 수열로부터 매핑시키기 위해서는 4 개의 안테나를 구분할 수 있는 $\log_2 4 = 2$ bits와 BPSK의 변조 신호를 구분할 수 있는 $\log_2 2 = 1$ bits가 필요하다. 라서 일반적인 관점에서, 한 개의 공간 변조 신호를 이루는 bits수는 아래와 같이 표현할 수 있으며,

$$\log_2 N_t + \log_2 M,$$

여기서 M 은 사용할 신호의 성상 (constellation) 전체의 수이다.

III. 채널 용량 기반 송신 안테나 선택 기술

공간 변조 시스템을 통하여 신호를 송신하기 위하여 송신단의 모든 안테나를 활용하여 전송하는 것은 성능

측면에서 항상 좋은 결과를 제공하지 않는다. 이것은 각각의 안테나간 생성된 채널 값이 변동하기 때문인데, 채널 값에 기반하여 미리 공간변조에 사용할 안테나를 선택하는 방법은 전체적인 SM 송수신의 성능 향상을 꾀할 수 있는 좋은 방법이다. 본 장에서는 기존에 제안된 채널 벡터의 크기 기반 안테나 선택 기법 [5]을 먼저 소개하고 채널 용량기반 최적 안테나 선택 알고리즘과 최적 알고리즘의 복잡도를 줄이는 Sub-optimal 안테나 선택 기법을 제안 한다.

송신단에 총 N_t 개의 안테나가 존재하고 공간변조에 실제 사용할 N_s 개의 안테나를 선택하는 경우, 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$Y = H_s X_s + N,$$

여기서 $H_s \in C^{N_r \times N_s}$ 는 전체 채널 행렬 H 에서 공간 변조 신호 송신을 위하여 선택된 안테나 집합에 의하여 생성된 채널행렬이며, $X_s \in C^{N_s \times 1}$ 는 공간변조에 실제 사용할 안테나 숫자와 같은 수의 행을 갖는 송신 신호 벡터이다.

a) 채널 벡터 크기 기반 송신 안테나 선택 기법

낮은 복잡도를 가지는 안테나 선택 기법중 하나는 전체 채널 행렬 중에서 열벡터의 크기가 가장 큰 순서대로 안테나를 선택하는 것이다. 이것은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$H_s = [\overline{h_1}, \dots, \overline{h_{N_s}}],$$

$$\|\overline{h_1}\|^2 > \dots > \|\overline{h_{N_s}}\|^2 > \|\overline{h_{N_s+1}}\|^2 > \dots > \|\overline{h_{N_t}}\|^2.$$

위의 식에서 $\overline{h_i}$ 는 i 번째 송신 안테나에서 수신 안테나들에 도착하는 채널 벡터를 의미한다. 위 방법에 따르면, 전체 채널 행렬 중 특정 송신안테나에서 수신단에 도착하는 채널의 크기가 큰 안테나를 s 개 선택하여 이 안테나들을 이용하여 공간변조신호를 전송하게 된다. 하지만, 앞선 설명한 바와 같이 수신단에서는 각 채널의 크기 뿐 아니라 각 채널벡터들 사이의 상관도도 복호 성능에 영향을 준다. 따라서, 채널의 크기 뿐만 아니라 각 채널의 상관도를 고려한 안테나 선택 방법이 공간변조 시스템의 성능 개선에 효과적일 수 있다.

b) 채널 용량 기반 최적(Optimal) 안테나 선택 기법

본 절에서는 선택된 송신 안테나 집합과 수신단 사이의 채널 용량에 기반한 안테나 선택 기법을 제안한다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 채널의 크기 뿐 아니라 각 안테나간 상관도를 함께 고려하기 위해 일반적인 MIMO 채널의 용량에 기반하여 송신단 안테나를 선택할 수 있다.

일반적으로 MIMO 채널 용량은 채널 행렬의 열벡터의 크기가 클 뿐만 아니라 채널행렬의 열벡터들 사이의 상관도가 낮을수록 높은 채널 용량이 도출되는 것으로 알려져 있다. 따라서 전체 안테나에서 공간변조에 사용할 안테나를 선택하는 경우, 선택한 안테나 집합으로 형성되는 채널의 용량을 가장 크게 만드는 안테나의 집합을 선택할 수 있다. 이것을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$H_s = \operatorname{argmax} \left(\log_2 \det \left(I + \frac{\sigma}{N_s} H_s H_s^H \right) \right),$$

$$H_s = [\overline{h_1}, \dots, \overline{h_{N_s}}],$$

위 식에 따르면, H_s 는 특정 안테나 집합을 선택할 때의 송수신 채널을 의미하며, 전체 채널 중 채널의 용량 값이 가장 채널을 선택하도록 목표하고 있다. 이에 따라서, SM에 사용되는 채널 자체의 크기가 크고, 각 채널간의 상관도는 비교적 작게 선택하도록 하여, 전체적인 SM 송수신의 성능 이득을 목표하고 있다.

한편, 전체 채널에서 H_s 를 선택할 때의 계산 복잡도를 고려하면, 전체 송신 안테나의 수가 커짐에 따라서 최적의 H_s 를 계산하기에 필요한 연산 횟수가 매우 커지게 된다. 전체 N_t 개의 송신 안테나 중 N_s 개의 안테나를 선택하는 경우, 최대로 필요한 연산 횟수는 $\binom{N_t}{N_s}$ 가 된다. 실제적인 구현 관점에서, 이 값은 매우 큰 값이 될 수 있으므로 practical한 관점의 안테나 선택 방법이 필요할 수 있다.

c) 송신단 복잡도를 줄이는 Sub-optimal 안테나 선택 기법

본 절에서는 실제적인(practical) 관점의 안테나 선택 기법을 적용한 SM 방법을 제안하였다. 앞 절에 따르면, 안테나 선택에 대한 모든 경우의 수를 비교하는 것은

전체 안테나 수의 증가에 따라 복잡도가 매우 증가하기 때문에, 복잡도가 낮으면서 안테나 선택의 성능은 좋은 방법을 사용하고자 한다.

[6]에 따르면, 일반적인 MIMO 채널 환경에서 안테나 선택을 통한 subset 채널의 용량을 극대화 할 수 있는 방안을 제시하였다. 간략히 설명하면, 특정 채널을 전체 채널에서 제거 할 경우의 남은 채널의 용량을 계산하여 그 값이 전체 채널의 용량과 비교할 때 가장 적게 차이가 나는 채널을 선택하여 제거하게 된다. 이 방법의 의미는, 전체 채널 중 가장 채널 용량에 덜 영향을 미치는 채널을 선택하여 제거하는 목적을 가지고 있다.

위 방법을 안테나 선택 방법에 적용하면, 전체 채널 중 N_t 중 N_s 개의 안테나를 선택하고자 하는 경우, $N_t - N_s$ 개의 안테나를 제거함으로써 결과적으로 N_s 개의 안테나를 선택할 수 있다.

결과적으로, 전체 채널의 용량에 적게 영향을 미치는 순서대로 안테나를 제거하고 남은 결과를 안테나 선택 방법으로 적용하여, 낮은 복잡도를 가지면서 채널 용량 관점에서 좋은 결과를 얻을 수 있다.

IV. 모의 실험 결과

본 절에서는, 제안 안테나 선택 방안들을 SM 송수신 과정에 적용한 성능 평가를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 평가하였다.

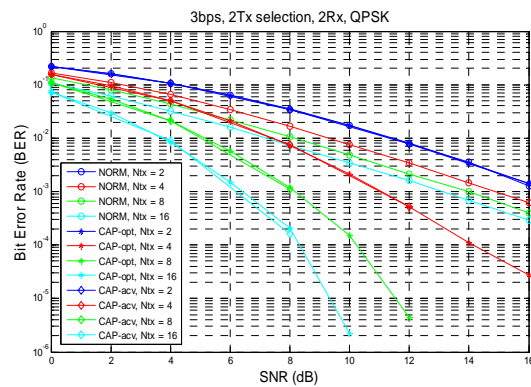


그림 1. 3 bps SM 환경의 평균 SNR 대비 비트 에러율
Fig. 1 Bit error rates per average signal to noise ratio (SNR) at 3 bps SM

그림 1은 3bps SM 송수신 환경의 bit error rates (BER) vs. SNR 결과를 보여주고 있다. 송신단에서는 2개의 안테나 선택 및 32QAM modulation을 통하여 신호를 송신하고 수신단에서는 2개의 안테나 및 ML receiver를 이용하여 수신한 결과를 도출하였다. 또한 안테나 선택을 위한 전체 안테나 수는 최대 16개 까지 증가시키도록 하였다.

‘NORM’ curve의 경우 안테나 선택 방법을 채널 vector의 크기를 이용하여 순차적으로 선택한 방법의 결과를 보여주고 있으며, ‘CAP-opt’ curve의 경우 2개 안테나를 선택할 때 채널 용량이 가장 큰 경우에 대한 capacity-optimal 경우의 결과를 보여주고 있다.

전체 안테나 수가 2개인 경우, 안테나 선택에 따른 결과 차이가 없기 때문에 동일한 성능이 도출됨을 확인할 수 있고, 안테나 수가 증가함에 따라, 두 방법 모두 전체적으로 BER 성능이 좋아짐을 확인할 수 있다. ‘CAP’의 경우 안테나 수가 증가함에 따른 BER 성능 매우 좋아짐을 확인할 수 있다. 안테나 선택을 하지 않는 경우 대비, BER = 10⁻³ 값 기준으로 약 10dB의 SNR 이득이 있음을 확인하였다.

‘CAP-acv’ curve의 경우 3-c)에서 설명한 capacity-achievable 안테나 선택 방법을 적용한 SM 송수신 결과를 보여주고 있는데, 전체 안테나 수가 다양한 모든 경우에 대하여 capacity-optimal과 거의 근접한 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

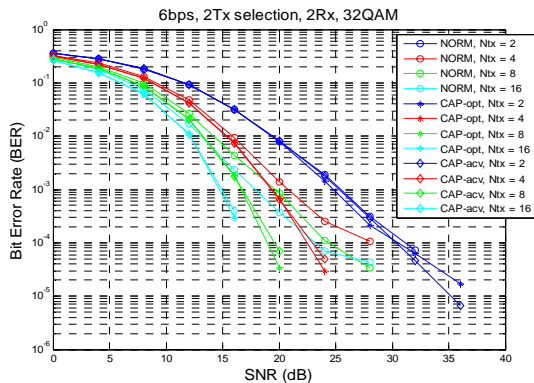


그림 2. 6 bps SM 환경의 평균 SNR 대비 비트 에러율
Fig. 2 Bit error rates per average signal to noise ratio (SNR) at 6 bps SM

그림 2는 6bps SM 송수신 환경의 bit error rates (BER) vs. SNR 결과를 보여주고 있다. 송신단에서는 2개의 안테나 선택 및 32QAM modulation을 통하여 신호를 송신하고 수신단에서는 2개의 안테나 및 ML receiver를 이용하여 수신한 결과를 도출하였다. 또한 안테나 선택을 위한 전체 안테나 수는 최대 16개 까지 증가시키도록 하였다.

전체적인 경향은 3bps SM 송수신 결과와 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있는데, ‘NORM’ curve의 경우 전체 안테나 수가 증가함에 따른 BER 성능 향상 폭이 작은 반면, ‘CAP-opt’ curve의 경우 BER 성능 향상 폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 안테나 선택을 하지 않는 경우 대비, BER = 10⁻³ 값 기준으로 약 10dB의 SNR 이득이 있음을 확인하였다. ‘CAP-acv’ curve의 경우 그림 1의 경우와 마찬가지로, 안테나 수가 다양한 모든 경우에 대하여 capacity-optimal과 거의 근접한 결과를 보임을 확인하였다.

V. 결론

우리는 채널 용량 극대화 기반 안테나 선택 기술을 적용한 spatial modulation 기법을 제안하였다. 기존의 채널 vector의 크기에 기반한 안테나 선택 방법과 비교하여, 채널의 크기 및 상관도를 함께 고려한 채널 용량에 기반한 안테나 선택 기술을 SM 송수신에 적용한 결과를 도출하여 BER 성능 측면에서 월등히 좋은 결과를 보여줌을 확인하였다. 또한 계산 복잡도 측면에서 exhaustive search에 기반한 optimal 방법과 비교하여 성능은 비슷하면서도 복잡도가 낮은 sub-optimal 안테나 선택 방법에 기반한 SM 송수신 결과를 함께 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 방송통신위원회의 방송 통신 인프라 원천 기술 개발 사업의 연구결과로 수행되었음 (KCA-2013-11-911-04-001).

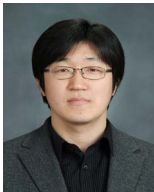
REFERENCES

- [1] M. Di Renzo, H. Haas, and P. M. Grant, "Spatial modulation for multiple antenna wireless systems—A survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 12, pp. 182 - 191, Dec. 2011.
- [2] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, and L. Szczecinski, "Spatial modulation: optimal detection and performance analysis," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 8, pp. 545-547, Aug. 2008.
- [3] R. Mesleh, H. Haas, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation - A new low complexity spectral efficiency enhancing technique," in *Proc. Conf. Comm. and Networking in China*, Oct. 2006.
- [4] R. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovi'c, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 2228 - 2241, July 2008.
- [5] R. Rajashekar, K. V. S. Hari, and L. Hanzo, "Antenna selection in spatial modulation systems", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 521 - 524, Mar. 2013.
- [6] A. Gorokhov, "Antenna Selection Algorithms for MEA Transmission Systems," *Proc. IEEE ICASSP, Orlando, FL*, May 2002, pp. 2875 - 60.
- [7] S. Sugiura, C. Xu, S. X. Ng, and L. Hanzo, "Reduced-complexity QAM-aided space-time shift keying," in *IEEE Global Telecommunications Conf.*, Dec. 2011, pp. 5 - 9, GLOBECOM '11.



임한영 (Han Young Yim)

2009년 8월 서울대학교 전기.컴퓨터 공학부 석사
2013년 8월 서울대학교 전자.정보공학부 박사 수료
2011년 12월 ~ 현재 KAIST IT융합연구소 연구원
※관심분야 : 차세대 이동통신 시스템(4G, Beyond 4G, and 5G), MIMO, 분산안테나 시스템



정방철(Bang Chul Jung)

2002년 2월 아주대학교 전자공학부 학사
2004년 8월 KAIST 전자전산학과 석사
2008년 2월 KAIST 전자전산학과 박사
2008년 3월 ~ 2009년 8월 KAIST IT 융합연구소 팀장
2009년 9월 ~ 2010년 2월 KAIST IT 융합연구소 연구교수
2010년 3월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수
※관심분야 : 이동통신, 신호처리, 협력 및 중계통신, Cognitive Radios, Compressed Sensing, 차세대 이동통신 시스템