

시변 레일리 페이딩 채널에서 이중 판정 궤환 방식을 이용한 STBC 검출 알고리즘

STBC Detection Algorithm Using Double-Decision-Feedback Scheme in Time-Varying Rayleigh-Fading Channel

박성준 · 허서원* · 이호경*

Sung-Joon Park · Seo Weon Heo* · Ho-Kyoung Lee*

요약

이 논문에서는 시변 레일리 페이딩 채널에서 STBC(Space Time Block Code)의 신호 검출 방법을 연구한다. 하나의 블록 내의 두 심볼 구간 동안 채널 환경이 변하는 경우, 채널 행렬의 직교성이 성립하지 않고 두 심볼 간에 간섭이 발생한다. 이러한 채널에서 수신 성능을 개선하기 위해서 joint ML 검출 방식이 제안되었으나, 계산 복잡도가 증가한다. 이를 줄이기 위해서 판정 궤환(decision feedback) 방식이 제안되었으나, joint ML 방식에 비해 수신 성능이 떨어진다. 이에 이 논문에서는 joint ML 검출 방법을 사용하는 경우에 비해 수신기의 복잡도를 줄이는 동시에 기존의 판정 궤환 방식에 비해 성능이 개선된 이중 판정 궤환 방식을 이용한 새로운 STBC 검출 알고리즘을 제안한다.

Abstract

In this paper, we study STBC(Space Time Block Code) detection scheme in time varying Rayleigh fading channel. When the channel is varying during the time duration of STBC, the channel matrix of orthogonal STBC is not orthogonal. To get the optimum reception performance in this channel, joint ML detection scheme may be used, however this scheme requires high computation complexity. Decision feedback scheme is proposed to reduce the computation complexity with less reception performance. In this paper, we propose a novel STBC detection algorithm using double decision feedback which is less complex than the joint ML scheme and outperforms the conventional decision feedback scheme.

Key words : Double-Decision-Feedback, Space-Time Block Code, Time-Varying Channels, Transmit Diversity

I. 서론

무선 이동 통신 시스템은 지상 및 위성 통신망이 통합된 멀티미디어 서비스를 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 서비스를 제공하기 위해서는 무엇보다도 높은 전송률과 낮은 오류율을 요구한다.

그러나 무선 이동 통신 채널에서의 신호는 AWGN(Addictive White Gaussian Noise) 잡음 외에도 수신기 주변 산란체들에 의해 채널 특성이 시간적으로 변하는 페이딩(fading)을 겪게 된다. 페이딩 채널에서 수신 성능을 향상시키기 위해서는 안테나 다이버시티 기법이 효과적이며, 특히 이 논문에서는 수신

「이 논문은 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-10101-0) 지원으로 수행되었습니다.」

홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic, Information & Communication Engineering, Hongik University)

*홍익대학교 전자전기공학부(Department of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University)

· 논문 번호 : 20070813-085

· 수정완료일자 : 2007년 11월 9일

기의 구조를 간단히 하기 위해 송신측에서 여러 개의 안테나를 사용하는 송신 다이버시티 기법을 고려한다.

Alamouti^[1]에 의해 소개된 STBC 방식은 수신단에서 간단한 선형처리로 ML(Maximum Likelihood) 복호가 가능하다는 장점이 있어 이와 관련한 여러 연구가 이루어졌다. Alamouti가 가정한 채널은 하나의 블록을 이루는 두 심볼 사이에 채널 특성이 변하지 않는다고 가정하였고, 이 경우, 채널 행렬(Channel Matrix) 직교 행렬이 되어 간단한 수신기로 ML 복호가 가능하다. 최근에 Vielmon^[2]은 두 심볼 사이에 채널 특성이 변하는 시변 레일리 페이딩 채널에서 STBC 수신기의 성능 열화에 대해서 분석하였고, 그러한 채널에 적용 가능한 여러 가지 수신 방법들을 제안하였다. 그 중, joint ML 방법은 수신 성능이 가장 좋지만 안테나 개수와 변조 레벨이 증가함에 따라 계산 복잡도가 지수적으로 증가하는 단점이 있고, 비교적 간단한 판정 궤환(decision feedback) 방법은 복잡도는 높지 않으나, 수신 성능이 joint ML 방법에 비해 현저히 떨어진다.

이 논문에서는 시간적으로 변하는 채널 환경^[5]에서 Vielmon이 제안한 수신 방법들 중의 하나인 판정 궤환 방법을 개선하여 성능을 향상시킨 이중 판정 궤환 방법을 제안하고, 전산 모의 실험을 통하여 이의 성능을 검증한다. 제안된 방식은 기존의 joint ML 방식처럼 변조 레벨에 따라 지수적으로 복잡도가 증가하지 않고, 종래의 판정 궤환 방식보다 뛰어난 수신 성능을 보여 준다.

이하 이 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 II장에서 STBC 시스템에 대한 간략한 설명과 이 논문에서 고려하는 채널 모델에 대해서 알아보고, III장에서는 기존의 판정 궤환 수신 방법을 간략히 설명하고, 제안된 이중 판정 궤환 수신기의 동작 방법에 대해서 설명한다. 그리고 IV장에서는 제안된 수신기의 성능을 몇 가지 채널 상관 계수에 대해서 전산 모의 실험을 통해서 검증하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. STBC 방식과 채널 모델

이 장에서는 먼저 Alamouti가 제안한 STBC 방식

에 대해서 간단히 설명하고, 이 논문이 고려하는 채널 모델에 대해서 설명한다. STBC 방식에서 송신기는 두 신호 구간 동안에 두 개의 안테나로 쌍으로 된 심볼(pair of symbols)들을 전송한다. 첫 번째 신호 구간 동안 첫 번째와 두 번째 안테나로 각각 서로 다른 심볼 x_1 과 x_2 를 전송하며, 두 번째 신호 구간 동안 $-x_2^*$ 와 x_1^* 를 전송한다. 채널 계수 $h_i(k)$ 가 k 번째 신호 구간에서 i 번째 송신 안테나와 수신기 사이의 채널 상태를 나타낸다고 하면 두 신호 구간 동안에 수신되는 신호 r_1, r_2 는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(1) & h_2(1) \\ h_1^*(2) & -h_2^*(2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

혹은 행렬식으로는 다음과 같이 표시된다.

$$r = Hx + n \quad (2)$$

여기서, n_1, n_2 는 각각 평균이 0이고, 분산이 $N_0/2$ 이며, 원형 대칭성(circular symmetric)이 있는 복소 백색 가우시안 잡음(AWGN)이고, 채널 계수 $h_i(k)$ 들은 평균이 0이고, 분산이 1이며, 원형 대칭성이 있는 복소 가우시안 확률 변수로 모델링 된다. 이 논문에서는 두 개의 전송 안테나 사이의 거리가 충분히 떨어진 경우를 가정하여 $h_1(k)$ 과 $h_2(k)$ 는 서로 독립적이지만, Alamouti가 가정한 것과는 달리 두 신호 구간 동안 채널 특성이 변할 수 있는 시변 채널 환경을 가정하므로 $h_i(1)$ 과 $h_i(2)$ 는 다음과 같이 상관성을 가진 확률 벡터로 모델링된다.

$$E[h_1(1)h_1^*(2)] = E[h_2(1)h_2^*(2)] = \rho \quad (3)$$

식 (3)에서 상관 계수 ρ 가 1인 경우는 두 채널이 완벽하게 상관성을 가진 경우로 quasi-static하다고 하고, Alamouti가 가정한 채널과 동일하다. 상관 계수 (ρ)가 1보다 작을수록 시간에 따른 변화가 큰 채널 환경을 의미한다. 실제로 상관 계수는 수신기나 주변 산란체들의 이동 속도 혹은 도플러 확산(doppler spread)과 관련이 있으며, Jakes 채널 모델^[3]에 대해서는 아래 식 (4)로부터 구할 수 있다.

$$\rho = J_0(2\pi f_d T) \quad (4)$$

여기서 $J_0(\cdot)$ 은 제1종 0차 베셀 함수이고, T 는 심볼 주기이며, f_d 는 도플러 주파수이다^{[4],[5]}.

III. STBC 검출 알고리즘

두 신호 구간 사이에 채널 특성이 변할 수 있는 시변 채널을 가정하였기 때문에 식 (2)의 채널 행렬 H 는 직교 행렬이 아니며 따라서 Alamouti가 유도한 것처럼 수신기에서 선형 변환 후 심볼 단위의 검출을 하는 구조로 간략화 되지 않는다. Vielmon은 참고 문헌 [2]에서 이러한 시변 채널에 적용이 가능한 세 가지 검출 방법을 제안하였으며, 그 중 이 논문에서는 joint ML 방법과 판정 궤환(decision feedback) 방법을 고려하여 Joint ML 방법보다 복잡도를 줄이며 판정 궤환 방법보다 성능을 향상시키는 이중 판정 궤환 방식에 대해서 설명한다.

먼저 joint ML 검출 방법은 다음 식과 같다.

$$\arg \min_x |r - Hx|^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 알 수 있듯이, 채널 행렬 H 가 직교성을 갖지 않으므로 joint ML 방식에서는 변조 심볼 레벨이 M 이고 전송 안테나의 개수가 2라면 수신 신호와 M^2 개의 모든 심볼 조합과의 유클리드 거리(Euclidean distance)를 계산해야 한다.

판정 궤환 검출 방법은 첫 번째 전송 안테나에서 보내지는 신호를 검출하고 그 검출된 신호를 이용하여 두 번째 전송 안테나에서 보내진 신호를 검출하는 방법으로 그림 1의 step 1에 해당한다. 그러나 step 1의 결정된 신호 \hat{x}_1 의 오류율이 상당히 크므로 iteration 개념을 도입하여 이중 판정 궤환 방식을 생각하게 되었다. 따라서 이중 판정 궤환 방식은 기존의 판정 궤환 방식을 확장한 방법으로 그림의 step 2 단계가 첨가된다. 본 논문에서 제안하는 이중 판정 궤환 방식은 우선 그림 1의 step 1 단계로 $H^H H = G^H G$ 을 만족하는 하 삼각(lower triangular) 행렬 G 를 얻는다. 여기서 $(\cdot)^H$ 은 행렬의 hermitian을 의미한다. $H^H H$ 행렬이 hermitian 행렬이므로 Cholesky 분해 과정을 거쳐 하 삼각 행렬 G 를 구할 수 있다^[2]. 수신 신호에 unitary 행렬 $(G^H)^{-1} H^H$ 곱하면 결과적으로 위의 행렬 식 (1)은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = G \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서, $w_i (i=1,2)$ 는 복소 백색 가우시안 잡음이며, 그 평균과 분산은 n_i 와 같고, 행렬 G 는 다음과 같이 표시된다.

$$G = \begin{pmatrix} g_1 & 0 \\ g_2 & g_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{|h_1(2)|^2 + |h_2(1)|^2}} \times \begin{pmatrix} |h_1(1)h_1^*(2) + h_2(1)h_2^*(2)| & 0 \\ h_1(1)h_2^*(1) - h_1(2)h_2^*(2) & |h_1(2)|^2 + |h_2(1)|^2 \end{pmatrix}$$

식 (6)에서 보듯이 변환된 수신 신호 z_1 은 첫 번째 전송 심볼 x_1 에만 의존하므로 다음 식에 의해서 먼저 첫 번째 심볼 값을 잠정적으로 판정한다(실제로 제안된 방식에서는 뒤에서 설명할 이중 판정 궤환을 적용하므로 아직 최종 판정은 아니다).

$$\hat{x}_1 = \arg \min_{x_1} |z_1 - g_1 x_1|^2 \quad (7)$$

수신 신호 z_2 에는 두 번째 전송 심볼에 의한 신호 이외에, 첫 번째 전송 심볼로 인한 간섭 신호가 존재한다. 판정 궤환 방법에서는 먼저, 식 (7)에 의해서 판정된 신호 \hat{x}_1 이 전송 심볼 x_1 과 동일하다고 가정하고 z_2 로부터 간섭 신호를 다음과 같이 제거한다.

$$\tilde{z}_2 = z_2 - g_2 \hat{x}_1 \approx g_3 x_2 + w_2 \quad (8)$$

이제 두 번째 심볼의 판정은 첫 번째 심볼의 판정 과정과 동일하게 다음 식에 의해서 결정된다.

$$\tilde{x}_2 = \arg \min_{x_2} |\tilde{z}_2 - g_3 x_2|^2 \quad (9)$$

채널 상관 계수 ρ 가 0 이면, 즉 두 신호 구간 사이의 채널 특성이 독립적이라고 가정하면, 이 논문에서 가정하는 채널은 일반적으로 MIMO(Multi Inut

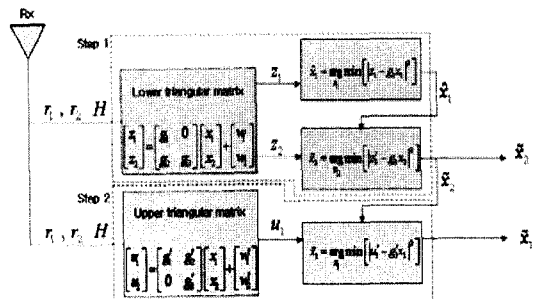


그림 1. 이중 판정 궤환 수신기
Fig. 1. Double-decision feedback receiver.

Multi Output) 채널에서 가정하는 채널 모델과 동일하고, 앞에서 기술된 판정 제한 방법은 SIC(Serial Interference Cancellation) 방법과 동일하다. 일반적으로 SIC 방법의 경우, 첫 번째 심볼과 두 번째 심볼의 판정에 있어서 얻을 수 있는 다이버시티 이득이 다르며, 결과적으로 낮은 다이버시티를 가진 심볼의 판정 오류에 의해서 전체 오류 판정이 결정되는 것이 알려져 있고^{[6][7]}, 실제로 이 논문에서 가정한 채널에 대해 실험한 결과도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 이 논문에서는 첫 번째 심볼의 판정 오류를 개선하기 위해서 다음에 기술하는 이중 판정 제한 방식을 제안한다. 먼저 식 (6)부터 (9)까지 기술된 판정에 의해서 두 번째 심볼을 판정하여 \tilde{x}_2 를 구한다. 반면 첫 번째 안테나에서 보내진 신호 x_1 을 결정하기 위해서는 식 (7)의 결과를 사용하지 않고 신호 x_2 를 판정하는 것과 비슷한 방법을 사용한다. 위 그림의 step 2에서처럼 이중 판정 제한 방식을 통해 신호 x_1 을 결정하기 위해서는 판정 제한 검출 방법에서 사용했던 Cholesky 분해 과정을 이용하지만 이 경우에는 $H^H H = G'^H G'$ 행렬을 만족하는 상 삼각(upper triangular) 행렬 G' 을 얻는다. 수신 신호에 unitary 행렬 $(G'^H)^{-1} H^H$ 곱하면 위의 행렬 식 (1)은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = G' \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w'_1 \\ w'_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

여기서, w'_i 은 n_i 와 평균과 분산이 같은 복소 백색 가우시안 잡음이며, G' 는 다음과 같이 표시된다.

$$G' = \begin{pmatrix} g'_{11} & g'_{12} \\ 0 & g'_{22} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{|h_1(1)|^2 + |h_2(2)|^2}} \times \begin{pmatrix} |h_1(1)|^2 + |h_2(2)|^2 & h_1^*(1)h_2(1) - h_1^*(2)h_2(2) \\ 0 & |h_1(1)h_1^*(2) + h_2(1)h_2^*(2)| \end{pmatrix}$$

이제, 변환된 수신 신호 u_1 에서 식 (9)에 의해서 판정된 신호 \tilde{x}_2 로부터의 간섭 신호를 다음과 같이 제거한다.

$$u'_1 = u_1 - g'_2 \tilde{x}_2 \approx g'_1 x_1 + w'_1 \quad (11)$$

마지막으로 전송 심볼 x_1 은 다음과 같이 최종적으로 판정한다.

$$\tilde{x}_1 = \arg \min_{x_1} |u'_1 - g'_1 x_1|^2 \quad (12)$$

IV. 모의 실험 결과

이 장에서는 식 (4)에서 정의한 여러 가지의 채널 상관 계수 ρ 에 대해 Joint-ML, 판정 제한, 이중 판정 제한 방식 수신기를 사용하는 각각의 STBC 시스템의 성능을 전산 모의 실험을 통해 알아본다. 실험에서 가정한 변조 방식은 QPSK와 8-PSK이고, 비트 오류율로 성능을 비교하였다. 그림 2에 QPSK 변조 방식에 대한 실험 결과를 나타내었고, 그림 3에 8-PSK 변조 방식에 대한 실험 결과를 나타내었다.

두 그림 모두에서 보여지듯이 채널 $h_1(1)$ 과 $h_1(2)$ 상관 계수(ρ)가 1인 경우, 즉 quasi-static 채널인 경우에는 joint ML, 판정 제한, 제안된 방식인 이중 판정 제한 수신기 모두 같은 성능을 보였다. 그 이유는 quasi-static 채널의 경우, 위 세 가지 수신기 모두 수식적으로 채널 행렬 H 가 직교성을 가지는 Alamouti code로 귀결되기 때문이다. 그러나 채널 상관 계수 ρ 가 1보다 작아지는 경우에는 세 가지 방식의 성능이 차이를 보인다.

그림 2로부터 채널이 시간적으로 빠르게 변하는 경우($\rho=0.5$), BER이 10^{-2} 보다 작은 경우에 제안된 방식이 기존의 판정 제한 방식보다 2 dB 이상의 성능 향상이 있음을 알 수 있다. 반면에 채널이 시간적

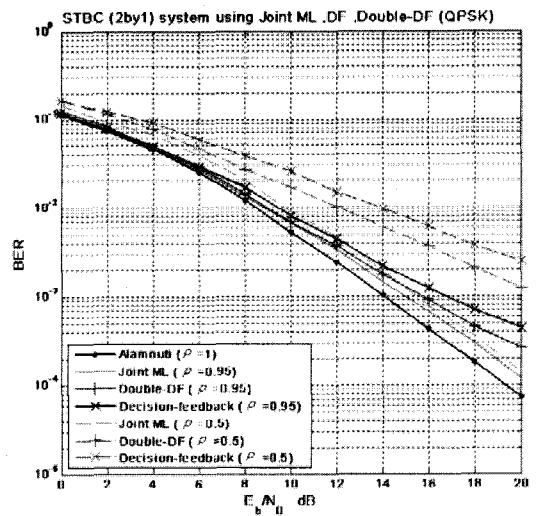


그림 2. 세 가지 수신기의 비트 오류율 곡선(QPSK)
Fig. 2. BER curve of the three detectors(QPSK).

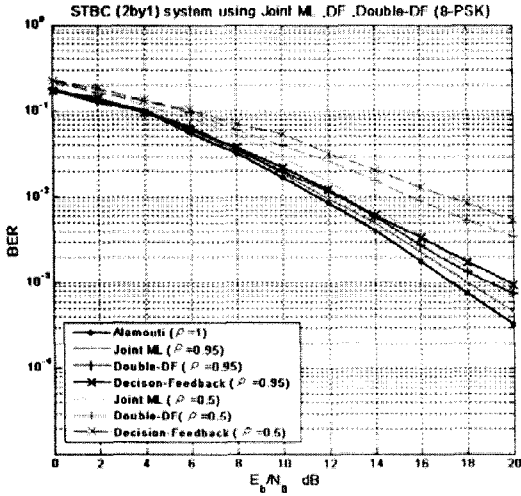


그림 3. 세 가지 수신기의 비트 오류율 곡선(8-PSK)
 Fig. 3. BER curve of the three detectors(8-PSK).

으로 느리게 변하는 경우($\rho=0.95$)에도 제안된 방식이 기존 방식보다 성능이 뛰어나지만, 그 차이는 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다. 그림 3으로부터, 변조 방식이 8-PSK이고 채널이 빠르게 변하며 BER이 10^{-2} 보다 작은 경우, 제안된 방식이 기존 방식보다 2 dB 이상의 성능 향상을 보여 주고, 특히, 다이버시티의 증가로 인해 SNR이 증가할수록 그 차이가 계속 벌어짐을 알 수 있다.

V. 결 론

이 논문에서는 시간적으로 변하는 레일리 페이딩 채널 환경에서의 STBC 검출 방법에 대해서 연구하였다. 두 심볼 사이에 채널 상태가 변하는 경우, 채널 행렬의 직교성이 성립되지 않아서 ML 수신기가 간략화되지 않는다. 따라서, 이 채널에서 joint ML 방식을 적용할 경우에 연산 복잡도가 심볼 레벨에 지수적으로 증가하게 되고, 이를 줄이기 위한 판정 케환 방식은 성능이 ML 방식에 비해 성능이 떨어진다.

이에 본 논문에서는 joint ML 검출 방법을 사용하는 경우에 비해 수신기의 복잡도를 줄이는 동시에 기존의 판정 케환 방식에 비해 성능이 개선된 이중 판정 케환 방식을 이용한 새로운 STBC 검출 알고리즘을 제안한다. 전산 모의 실험 결과, 제안된 방식은 채널이 빠르게 변하는 경우 기존 방식 대비 상당한 성능 향상을 보여준다.

참 고 문 헌

- [1] S. Alamouti, "A simple transmitter diversity scheme for wireless communications", *IEEE Trans. JSAC.*, vol. 16, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [2] Antony Vielmon, Ye(Geoffrey) Li, and John R. Barry, "Performance of alamouti transmit diversity over time-varying rayleigh-fading channels", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 3, pp. 1369-1373, Sep. 2004.
- [3] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, New York: IEEE Press, 1974.
- [4] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th Ed. New York: McGraw-Hill, pp. 824-825, 2001.
- [5] Weifeng Su, Zoltan Safar, and K. J. Ray Liu, "Diversity analysis of space-time modulation over time-correlated Rayleigh-fading channels", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, pp. 1832-1839, Aug. 2004.
- [6] A. Lampe, J. B. Huber, "Iterative interference cancellation for DS-CDMA systems with high system loads using reliability-dependent feedback", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, pp. 445-452, May 2002.
- [7] Gang Wang Dandan, Wang Daoben Li, "An efficient ZF-SIC detection algorithm in MIMO CDMA system", *The 14th IEEE 2003 International Symposium on Personal*, vol. 2, pp. 1708-1711, Sep. 2003.

박 성 준



2006년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2006년 3월~현재: 홍익대학교 전파통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 채널 코딩, TCM, 이동통신, Space-Time Coding

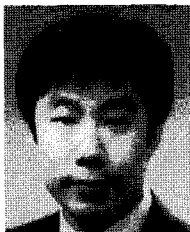
이 호 경



1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1987년 2월: Northrop Univ. 전자공학과 (공학석사)
1994년 8월: 미국 남가주대 전기공학과 박사 (공학박사)
1994년 8월~현재: 홍익대학교 전

자전기공학부 교수
[주 관심분야] 채널 코딩, TCM, Turbo TCM, 이동 통신, 위성통신

허 서 원



1990년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1992년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
2001년: Purdue Univ. 전자공학과 (공학박사)
2006년 9월~현재: 홍익대학교 전자

전기공학부 전임강사
[주 관심분야] 채널 코딩, 이동 통신, Space-Time Coding