

ML검출 기반 공간다중화 MIMO 시스템의 UEP 프리코더 선정기술

박재영*, 김재권^o

UEP Precoder Selection Technique for ML Detected SM MIMO Systems

Jaeyoung Park*, Jaekwon Kim^o

요약

본 논문에서는 maximum-likelihood (ML) 신호검출을 사용하는 공간다중화 multiple-input multiple-output (MIMO) 시스템을 위한 새로운 unequal error protection (UEP) 프리코더 선정기술을 제안한다. 기존 프리코더 선정기술들은 UEP를 고려하지 않고 설계되었으나, 제안된 기술은 다중안테나 UEP를 고려한다. 모의실험을 통해 제안된 기술의 적용에 따른 향상된 다중안테나 UEP 성능을 확인한다.

Key Words : Unequal error protection (UEP), Precoder selection, Spatially multiplexed MIMO, Maximum likelihood detection (MLD)

ABSTRACT

In this paper, we propose a novel precoder selection technique for maximum-likelihood (ML) detected spatially multiplexed multiple-input multiple-output (MIMO) systems. Previous precoder selection techniques were designed without considering UEP, however the proposed technique is designed considering multi-antenna unequal error protection (UEP). Simulations demonstrate the

improved multi-antenna UEP performance by the proposed technique.

I. 서론

Unequal error protection (UEP) 기술을 활용하면 추가적인 통신 자원을 사용하지 않고 멀티미디어 서비스의 품질을 향상시킬 수 있다^[1]. 최근 maximum-likelihood (ML) 신호검출을 사용하는 공간다중화 MIMO 시스템에서 차등화 된 송신안테나 신뢰도를 활용한 다중안테나 UEP 기술이 제안되었다^[2].

한편 공간다중화 MIMO 시스템에서 코드북 기반 프리코딩 기술은 오류 성능을 향상시킨다^[3]. 그러나 기존 프리코더 선정기술은 UEP 성능을 고려하지 않고 모든 안테나의 평균적인 오류성능을 향상시키도록 설계되었다.

본 논문에서는 송신부에서는 프리코딩을 이용하고, 수신부에서는 ML 검출을 사용하는 공간다중화 MIMO 시스템을 고려한다. 이 시스템에 대해 다중안테나 UEP 성능의 기준을 수학적으로 명시하고, 이 기준에 따라 UEP 성능을 향상시키는 새로운 프리코더 선정기술을 제안한다.

II. 프리코딩 기반 공간다중화 MIMO 시스템

본 논문에서는 채널용량관점 대신 실용적인 오류성능 관점의 프리코더 선정기술만을 고려한다.

송신안테나와 수신안테나가 각각 N_t 개와 N_r 개이고, 프리코딩을 이용하는 다중안테나 시스템의 송수신 관계를 식 (1)로 표현한다.

$$\mathbf{y} = \frac{1}{\sqrt{N_t P_\Omega}} \mathbf{H} \mathbf{F} \mathbf{x} + \mathbf{z} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{N_t}]^T$ 는 각 원소의 전력이 P_Ω 인 송신벡터이고, $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{N_r}]^T$ 는 수신벡터이고, \mathbf{H} 는 $N_r \times N_t$ 크기의 채널행렬이다. 벡터 $\mathbf{z} = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_{N_r}]^T$ 는 각 원소가 평균이 0이고 분산이 σ_z^2 인 Gaussian 잡음벡터이고, 송수신단이 코드북 $F =$

* 본 연구는 한국연구재단 BK21PLUS 사업, 스마트 자동차를 위한 ICT 융합기술 개발팀의 지원 및 한국연구재단 글로벌박사양성사업 (NRF-2013H1A2A1032531) 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : Computer and Telecommun. Engineering, Yonsei University, Wonju, rtyua@hanmail.net, 학생회원

o Corresponding Author : Computer and Telecommun. Engineering, Yonsei University, Wonju, jaekwon@yonsei.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2017-03-060, Received March 1, 2017; Revised March 24, 2017; Accepted April 19, 2017

$\{\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_L\}$ 을 공유한다.

두 행렬 \mathbf{H} 와 \mathbf{F}_l 이 주어졌을 때, 수신 신호의 최소 유클리드 거리는 식(2)와 같다.

$$d_{\min}^2(\mathbf{H}\mathbf{F}) = \min_{\substack{\mathbf{x}_p, \mathbf{x}_q \in \Omega^N \\ \mathbf{x}_p \neq \mathbf{x}_q}} \|\mathbf{H}\mathbf{F}_l(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_q)\|^2 \quad (2)$$

여기서 Ω 는 정상도를 의미한다. 식(2)로부터 식(3)과 같이 프리코더를 선정할 수 있다³⁾.

$$\mathbf{F}^{\text{ERR-opt}} = \arg \max_{\mathbf{F}_l \in \mathcal{F}} d_{\min}^2(\mathbf{H}\mathbf{F}_l) \quad (3)$$

ML 신호검출을 이용할 경우, 식(3)의 프리코더 선정 기술은 전체 안테나의 평균 오류 성능을 최적화 한다³⁾. 그러나 기존의 최적 및 식(3)을 기반으로 하는 다양한 준 최적 프리코더 선정 기술들은 전체 안테나의 평균오류 성능만 고려하고 UEP를 고려하지 않았다.

III. 다중안테나 UEP 기술

수신단에서 ML 조인트 신호검출을 사용할 경우에도 식(4)에 표현된 선형 zero-forcing (ZF) 기반의 post-equalized-SNR을 이용해 송신 안테나의 신뢰도 순서를 결정할 수 있다²⁾.

$$\text{SNR}_i^{\text{post}}(\mathbf{H}) = \frac{1/(N_i \sigma_z^2)}{\|\mathbf{e}_i^T \mathbf{H}^+\|^2}, i = 1, 2, \dots, N_i \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{e}_i^T = [0 \dots 0_{i-1} \ 1 \ 0_{i+1} \dots 0_{N_i}]$ 이며, $(\cdot)^+$ 는 유사역행렬을 의미한다. 특정 송신안테나가 p 번째로 큰 post-equalized-SNR 값을 가진다면, 해당 안테나는 p 번째로 높은 신뢰도를 가지게 된다.

기존의 다양한 준최적 프리코더 선정 기술을 이용하더라도, 프리코더를 결정한 후 선정된 그 프리코더 \mathbf{F}_l 를 반영하여 식(4)에서 $\text{SNR}_i^{\text{post}}(\mathbf{H})$ 대신 $\text{SNR}_i^{\text{post}}(\mathbf{H}\mathbf{F}_l)$ 을 사용하면 다중안테나 UEP를 구현할 수 있다.

IV. 다중안테나 UEP를 위한 제안된 프리코더 선정 기술

본 절에서는 프리코딩 된 MIMO 시스템에 대해 다중안테나 UEP 성능의 기준을 제시하고, 이를 기반으로 하는 새로운 프리코더 선정 기술을 제안한다.

다중안테나 UEP 성능 기준 : 달성하고자 하는 비트 오류율을 BER_T 로 표현한다. 식(1)로부터 채널 SNR 은 $1/\sigma_z^2$ 이다. 특정 프리코더 \mathbf{F}_l 을 가정했을 때 채널 SNR $1/\sigma_z^2$ 에서 BER_T 를 달성하는 송신안테나의 개수를 식(5)로 표현한다.

$$N(1/\sigma_z^2, \mathbf{F}_l) \in \{0, 1, 2, \dots, N_i\} \quad (5)$$

예를 들어 모든 송신 안테나가 목표 오류율 BER_T 를 달성하지 못하면 $N(1/\sigma_z^2, \mathbf{F}_l) = 0$ 이고, 모든 송신 안테나의 비트 오류율이 BER_T 를 달성하면 $N(1/\sigma_z^2, \mathbf{F}_l) = N_i$ 이다. 식(5)의 $N(1/\sigma_z^2, \mathbf{F}_l)$ 값이 클수록 프리코더행렬 \mathbf{F}_l 이 더 높은 다중안테나 UEP 성능을 달성하는 것으로 판단한다.

제안된 프리코더 선정 기술 : 식(4)에 나타난 바와 같이 ML 검출된 MIMO 시스템에서 post-equalized-SNR의 크기를 기준으로 송신 안테나의 신뢰도를 순서대로 나열할 수 있다²⁾. 본 논문에서는 이를 기반으로 식(6)의 프리코더 선정을 제안한다.

$$\mathbf{F}_p^{\text{PESNR}} = \arg \max_{\mathbf{F}_l \in \mathcal{F}} \text{SNR}_{(p)}^{\text{post}}(\mathbf{H}\mathbf{F}_l) \quad (6)$$

여기서 $\text{SNR}_{(p)}^{\text{post}}(\mathbf{H}\mathbf{F}_l)$ 는 p 번째로 높은 신뢰도를 갖는 송신안테나의 post-equalized-SNR을 나타낸다. 식(6)으로 선택한 프리코더는 다른 프리코더들 보다도 p 개의 송신안테나(첫 번째부터 p 번째 신뢰도의 안테나)를 오류로부터 성공적으로 보호하여 $N(1/\sigma_z^2) = p$ 를 달성한다.

식(6)으로 프리코더를 선택하기 위해서는 알맞은 p 를 먼저 결정해야 하는 문제점이 있다. 식(6)의 p 를 결정하기 위해서 임계 채널 SNR $\text{SNR}_{\text{TH}, i}$, $i = 1, 2, \dots, N_i$ 를 이용한다. 여기서 $\text{SNR}_{\text{TH}, i}$ 는 고정된 i 에 대하여 $\mathbf{F}_i^{\text{PESNR}}$ 로 프리코더를 선정할 때 $N(1/\sigma_z^2, \mathbf{F}_i^{\text{PESNR}}) = i$ 를 만족하는 최소 채널 SNR을 나타낸다. 임계 채널 SNR은 모의실험을 통해 얻는다. 임계 채널 SNR $\text{SNR}_{\text{TH}, i}$, $i = 1, 2, \dots, N_i$ 이 가용하면, 식(1)의 채널 SNR $1/\sigma_z^2$ 이 $\text{SNR}_{\text{TH}, i} \leq 1/\sigma_z^2 < \text{SNR}_{\text{TH}, i+1}$ 을 만족하는 i 를 p 값으로 정한다.

단, BER_T 를 달성하는 안테나가 존재하지 않는 낮은 채널 SNR에서는 신뢰도가 가장 높은 안테나 한 개를 보호하기 위해서 $p=1$ 로 한다. 반면에 모든 안테나가 BER_T 을 달성하는 높은 SNR에서는 식(3)의

프리코더 선정기술을 사용한다.

V. 모의실험

성상도로 4-QAM을 사용하고, 4×4 공간다중화 MIMO 시스템 및 수신부의 ML 신호검출을 가정한다. 프리코딩을 위한 코드북은 LTE-A 시스템의 코드북을 이용하며 BER_T = 0.001 로 설정한다.

그림 1은 식(5)를 기준으로 다양한 프리코더 선정 기술의 UEP 성능을 비교한다. 프리코딩 없이 식(4)를 이용해 다중안테나 UEP를 구현하는 방식, 식(3)을 이용해 프리코더를 선택하고 식(4)에서 SNR_i^{post}(**H**) 대신 SNR_i^{post}(**H**F^{ERR-opt})을 사용해 UEP를 구현하는 방식, 그리고 IV절의 제안된 기술을 비교한다. 식(3)을 기반으로 하는 준최적 선택기술들은 식(3)을 직접 사용한 경우에 비해 열화된 성능을 달성하므로 본 논문에서는 고려하지 않는다.

그림 1에서 $N(1/\sigma_z^2) = 1$ 를 만족시키기 위해 요구되는 최소의 채널 SNR은 제안된 프리코더 선택기술이 10.9dB로 가장 낮다는 것을 관찰할 수 있다. 이는 제안된 기술이 매우 낮은 채널 SNR에서 가장 중요한 데이터를 더 성공적으로 보호할 수 있음을 의미한다. 또한 모든 채널 SNR에서 제안된 기술이 달성하는 $N(1/\sigma_z^2)$ 값이 다른 두 기술보다 크거나 같다. 예를 들어 SNR 10.9dB 이상 12.8dB 미만에서는 제안된 기술로 달성하는 $N(1/\sigma_z^2)$ 이 식(3)을 이용한 경우보다 크며, 나머지 SNR 구간에서는 값이 동일하다. 따라서 제안된 기술은 세 가지 기술 중 가장 좋은 UEP 성능을 달성한다고 할 수 있다. 그림 1에는 나타나있지 않

지만 평균 BER성능 관점에서는 식(3)을 사용하는 기존 방법이 가장 우수하다. 채널 SNR이 12.5dB일 때 식(3)을 사용하는 기존 기술이 약 0.002, 식(6)을 사용하는 제안된 방식은 0.0035, 프리코딩을 사용하지 않는 방식은 0.005의 BER성능을 달성한다.

연산복잡도 관점에서는 프리코더를 사용하지 않을 경우가 가장 효율적이고, 식(6)을 이용하는 제안된 기술은 식(3)을 이용한 경우에 비해 대체적으로 연산복잡도가 낮다. 특히 안테나 수가 증가하고 성상도의 크기가 증가하면 (식(3) 연산을 위해 필요한) 식(2)에서 계산해야 하는 유클리드 거리의 계산횟수가 지수함수적으로 증가하나, 식(6)을 사용하는 제안된 방식의 복잡도는 변동이 없다. 따라서 UEP성능과 연산복잡도를 모두 고려할 때 제안된 기술은 우수한 프리코더 선택기술이다.

VI. 결론

본 논문에서는 ML 신호검출을 수행하는 공간다중화 MIMO 시스템에서 다중안테나 UEP 성능 향상을 위한 새로운 프리코더 선정기술을 제안하였다. 특정 프리코더를 가정했을 때 다중안테나 UEP 성능의 기준을 제시하였고, 이 기준을 적용하여 다중안테나 UEP 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 프리코더 선정 기술을 제안하였다. 모의실험을 통해 제안된 기술이 기존의 기술들 보다 가장 좋은 UEP 성능을 달성하며, 특히 낮은 SNR에서도 중요한 데이터를 성공적으로 보호할 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] J. Park and J. Kim, "APP-MAC-PHY cross-layer video streaming technique over wireless channels," *J. KICS*, vol. 39A, no. 07, pp. 398-400, Jul. 2014.
- [2] J. Park, J. Kim, and D. J. Love, "Antenna reliability ordering technique for unequal error protection in jointly detected MIMO systems," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 65, no. 9, pp. 7136-7148, Sept. 2016.
- [3] D. J. Love and R. W. Heath Jr., "Limited feedback unitary precoding for spatial multiplexing systems," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 8, pp. 2967-2976, Aug. 2005.

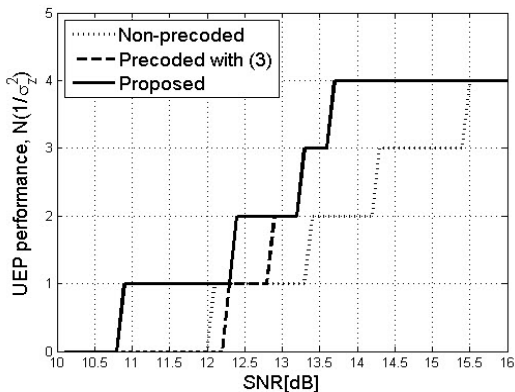


그림 1. 수신부에서 ML신호검출기를 갖는 공간다중화 MIMO 시스템의 다중안테나 UEP 성능비교
Fig. 1. Comparison of multi-antenna UEP performance of SM MIMO systems with MLD at the receiver