

논문 2009-46TC-7-1

다중 코드북을 이용한 랜덤 빔 형성 기법

(Random beamforming applying codebook rotation)

강 지원*, 유 병 옥*, 서 정 태**, 이 충 용***

(Jiwon Kang, Byungwook Yoo, Jeong-Tae Seo, and Chungyong Lee)

요 약

랜덤 빔 형성 기법은 정적인 채널에서 다중 사용자 다이버시티를 얻게 하지만, 사용자수에 따른 성능의 제약이 있다. 이를 극복하기 위해 송신단에서 다중 랜덤 빔을 형성하는 기법들이 소개되었다. 특히 코드북에 기반을 둔 랜덤 빔 형성 기법은 적은 파일럿 수로 다중 랜덤 빔을 형성한다. 그러나 그 기법은 채널특성에 따른 빔 디자인의 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 다중 코드북을 교대로 이용하여 랜덤 빔을 형성하는 기법을 제안한다. 제안한 기법은 기존 기법에 비해 훨씬 용이하게 빔을 디자인하여 적은 파일럿을 이용하면서 다중 사용자 다이버시티 이득과 선택적 다이버시티 이득을 동시에 얻는다.

Abstract

Random beamforming exploits multiuser diversity gain in static channels. Since the gain is restricted by the user population, some extended works have been proposed. Among them, a codebook-based opportunistic beamforming technique forms multiple random beams with small pilots. The technique however has difficulty in designing beams flexibly by the channel statistics. In this paper, we propose a technique forming the multiple random beams by rotating codebooks. The proposed technique enables the flexible design of beams so that multiuser diversity and beam selection diversity are exploited simultaneously with small pilots robust to the channel statistics.

Keywords: 빔형성, 랜덤 빔형성, COBF, CBF-CR, 빔 디자인

I. 서 론

다중 안테나를 이용한 송수신 기법은 한정된 주파수 자원을 효율적으로 이용하기 위한 방법으로 주목받고 있다^[1]. 이러한 다중안테나 기법들은 일대일 통신뿐만 아니라 다중사용자 환경에서도 주파수 효율을 크게 증대시킬 수 있음이 증명되었다^[2]. 본 논문에서는 단일 셀의 downlink 시스템을 다룬다.

다중사용자 downlink에서는 각 사용자로부터의 적은 양의 feedback을 이용하여 높은 시스템 효율을 얻을 수 있다. 그것은 채널 상태가 상대적으로 좋은 사용자에게 우선적으로 자원을 할당함으로써 얻어지는 이득으로, 다중사용자 다이버시티 이득이라고 한다^[3].

다중사용자 다이버시티 이득은 정적인 채널환경에서 그 이득이 줄어든다^[4]. 이러한 결점을 보완하기 위해 opportunistic beamforming (OBF) 혹은 랜덤 빔형성 기법이라고 불리는 기법이 제안되었다^[4]. OBF는 정적인 채널에 무작위로 변하는 빔을 적용함으로써 채널이득을 더 빠르게 변화시킨다. 고정된 빔을 사용하는 경우보다 무작위 빔을 사용하는 경우가 우수한 시스템 용량을 보이고, 그 이득은 채널의 변화가 느릴수록 더 크다^[4].

이러한 OBF 기법은 사용자 수가 많지 않은 경우 이득이 제한적일 수밖에 없는데, 이를 극복하기 위해 multiple pilot based opportunistic beamforming (MOBF) 기법이 제안되었다^[5]. 이 MOBF 기법은 랜덤 빔을 여러 개 형성하여 파일럿으로 전송한 후 그에 따른 채널이득을 feedback 받아 가장 높은 채널 이득을 보이는 빔을 선택하여 전송한다. 이러한 빔 선택적 다이버시티 이득 덕분에 이 기법은 사용자 수가 적은 경우에 OBF 기법보다 뛰어난 성능을 보이나, 파일럿의

* 학생회원, *** 정회원, 연세대학교 전기전자공학부 (Yonsei University)

** 정회원, 충주대학교 정보통신공학부 (Chungju National University)

접수일자: 2009년5월11일, 수정완료일: 2009년7월11일

수가 랜덤 빔의 수와 일치하여 빔 수를 시스템에 맞추어 적응적으로 적용하여야 하고, 그에 따라 성능향상의 제약을 받는다^[6].

최근, 이러한 성능제약을 이기기 위해 codebook based opportunistic beamforming (COBF) 기법이 제안되었다^[6]. COBF 기법은 송수신단에서 알고 있는 코드북과 시변 행렬을 이용하여 다중 랜덤 빔을 형성한다. 또한 채널 추정을 위한 고정된 수의 파일럿을 사용함으로써 수신단에서 다중 랜덤 빔에 따른 이득을 추정할 수 있게 한다. 이 COBF 기법은 MOBF 기법에 비해 파일럿의 수를 적게 사용하고, 또한 파일럿의 수가 빔의 수와 무관하게 고정이 되므로 빔 선택 다이버시티 이득을 제약 없이 얻을 수 있게 한다^[6].

랜덤 빔은 채널의 분포에 따라 디자인 되어야만 더 좋은 시스템 효율을 얻을 수 있다^[7]. 그러나 COBF 기법은 빔을 디자인 할 때 시변행렬과 코드북을 동시에 고려해야 하므로 그 디자인이 어렵다^[7].

따라서 본 논문에서는 시변행렬과 코드북을 이용하는 대신에, 다중 코드북을 이용하여 COBF와 동일한 이득을 얻는 codebook based beamforming with code rotation (CBF-CR) 기법을 제안한다. 이 기법은 빔이 코드북만으로 형성이 되므로 채널 분포에 따라 빔을 쉽게 디자인할 수 있다.

II. CBF-CR 기법

1. 시스템 구조

기지국에는 M_t 개의 송신 안테나가 있고, 한 개의 수신안테나가 있는 총 K 명의 사용자가 있는 시스템을 생각하자. 주파수 flat fading을 가정하면, 시간 t 에서의 기지국과 사용자 k 의 채널은 $M_t \times 1$ 채널 벡터 $h_k(t)$ 로 나타낼 수 있다. 시간 t 에서의 $M_t \times 1$ 빔 벡터를 $x(t)$, 데이터를 $d(t)$, 사용자 k 의 수신신호와 잡음신호를 각각 $y_k(t)$ 와 $z_k(t)$ 라고 하면, 시스템은 (1)과 같이 모델링 된다.

$$y_k(t) = h_k(t)^T x(t) d(t) + n_k(t). \quad (1)$$

제안하는 CBF-CR 기법의 구조는 그림 1과 같다. 파일럿 부에서는 N_p 개의 파일럿 p_1, p_2, \dots, p_{N_p} 을 전송한다. 이 파일럿 신호들은 각 사용자가 자신의 채널 $h_k(t)$ 을 추정하기 위해 사용한다. 예를 들어, n 번째 파

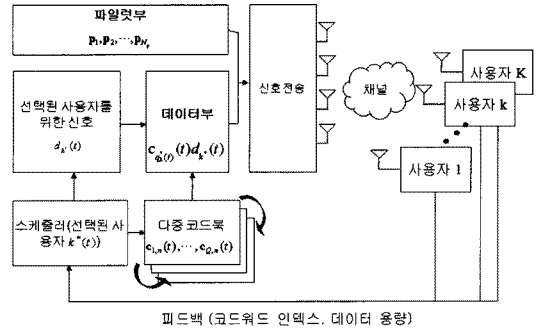


그림 1. 제안하는 CBF-CR 기법의 시스템 구조도
Fig. 1. System structure of proposed CBF-CR technique.

일럿을 n 번째 원소만 1이고 나머지 원소들은 0인 단위 벡터로 설정하면 채널벡터 $h_k(t)$ 의 n 번째 원소를 추정할 수 있다^[6]. 이런 방식으로 파일럿은 최대 M_t 개가 필요하다. 즉, $N_p \leq M_t$ 이다. 그것은, 우리가 극복하고자 하는 채널이 정적인 채널이므로 한번 추정된 채널을 반복적으로 사용할 수 있기 때문이다^[6].

송수신단에서는 N_c 개의 코드북을 갖고 있다. 여기서 n 번째 코드북 C_n 은 Q 개의 $M_t \times 1$ 코드워드 벡터로 이루어진다.

$$C_n = \{c_{1,n}, c_{2,n}, \dots, c_{Q,n}\}. \quad (2)$$

주어진 다중 코드북은 시간에 따라 반복적으로 사용된다. 즉, 시간 t 에 적용되는 코드북은 $C_{t \pmod{N_c}}$ 이다. 여기서, $t \pmod{N_c}$ 은 t 를 N_c 로 나누었을 때의 나머지를 뜻한다. 편의상 시간 t 에 적용되는 코드북을 $C(t) = C_{t \pmod{N_c}}$, 그 코드북에 해당하는 코드워드들을 $c_q(t) = c_{q, t \pmod{N_c}}$, $q = 1, \dots, Q$ 이라고 정의하자.

수신단에서는 파일럿 부에서 추정된 채널 $h_k(t)$ 을 이용하여, 시간 t 에 적용 가능한 Q 개의 빔들에 대한 채널이득 $h_k(t)c_q(t)$, $q = 1, \dots, Q$,을 추정할 수 있다. 따라서 각 수신단에서 시간 t 에서 최대의 이득을 갖는 빔을 다음과 같이 선택한다.

$$q_k(t) = \arg \max_{q=1, \dots, Q} \|h_k(t)c_q(t)\|^2, \quad (3)$$

여기서, $q_k(t)$ 은 사용자 k 의 시간 t 에서의 코드워드 인덱스로 이 코드워드 인덱스와 그에 해당하는 채널이득 $\|h_k(t)c_{q_k(t)}(t)\|^2$ 혹은 그에 관련된 SNR, 데이터

용량 등의 channel quality information (CQI)가 각 사용자로부터 기지국으로 피드백 된다.

각 사용자들로부터의 피드백 되어진 데이터에 기반하여, 송신단에서는 최적의 사용자 한 명을 선택하게 된다. 본 논문에서는 이 과정에서 기존의 다른 기법들과 같이 proportional fair (PF) 스케줄링 알고리즘을 사용한다. PF 스케줄링 알고리즘은 최대의 CQI를 갖는 사용자를 골라서 다중사용자 다이버시티 이득을 얻을 뿐만 아니라 사용자들 간에 데이터 할당에 있어서의 fairness를 동시에 고려한다^[4]. PF 스케줄링 알고리즘을 적용하면 다음과 같이 시간 t 에서의 최적의 사용자를 선택한다.

$$k^*(t) = \arg \max_{k=1, \dots, K} \frac{R_k(t)}{R_k^{av}(t)}, \quad (4)$$

여기서, $R_k(t)$ 는 $\|h_k(t)c_{q_k(t)}(t)\|^2$ 값의 함수인 채널 용량 혹은 데이터 용량으로 사용자 k 에 해당하는 순시적인 CQI값을 의미하고, $R_k^{av}(t)$ 는 사용자 k 가 시간 t 까지 할당받은 평균적인 CQI값을 의미한다^[4].

위와 같이 선택된 사용자 $k^*(t)$ 의 최대 코드워드 인덱스를 $q_k^*(t)$ 라고 하면, 송신단에서의 시간 t 에서의 최종적인 빔은 $c_{q_k^*(t)}^*(t)$ 과 같이 형성되고, 이 빔에 선택된 사용자가 원하는 데이터 $d_{k^*}(t)$ 을 실어 보낸다.

2. 성능 및 파라미터 디자인

제안된 CBF-CR 기법은 기존의 OBF 기법에 다중 빔 선택적 다이버시티를 부여함으로써 MOBF 기법이나 COBF 기법과 같이 사용자수가 충분치 않을 경우에도 성능 향상을 보인다. 특히 MOBF 기법은 빔 선택적 다이버시티이득이 파일럿의 수에 의해 제한되는데 반해, CBF-CR 기법은 COBF 기법과 같이 고정된 파일럿이 채널추정을 위해서 사용되므로 빔 선택적 다이버시티를 파일럿 수에 의한 제약을 받지 않고 자유롭게 늘릴 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때, CBF-CR 기법은 COBF 기법과 거의 동일한 시스템 throughput을 보이게 될 것이므로 이 두 기법은 MOBF 기법이나 OBF 기법보다 뛰어난 성능을 보인다^[6]. CBF-CR 기법과 COBF 기법의 차이는 전자는 코드북을 여러 개 생성하여 바뀌가며 사용하는데 반해 후자는 코드북을 한 개만 생성하고 랜덤 행렬을 통하여 순시적인 코드분 변환의

효과를 준다는 점이다. 이러한 두 방식의 차이는 코드북을 여러 개 생성해야한다는 점에서 전자가 좀 더 많은 메모리를 요구한다는 단점이 있으나, 적용하는 빔이 단순히 코드워드와 동일하므로 채널에 따른 빔 디자인이 용이하다는 장점이 있다.

예를 들어 [7]에서와 같이 kappa-factor 채널 모델을 고려하면, 채널과 matched되는 빔을 형성하기 위해서는 다음과 같이 단순히 채널의 분포와 동일하게 코드북의 코드워드들을 생성하면 된다. 즉, 빔벡터 $c_q(t)$ 의 m 번째 원소를 $c_{m,q}(t)$ 라고 하면,

$$c_{m,q}(t) = \sqrt{\frac{1}{K+1}} c_{m,q}^{unc}(t) + \sqrt{\frac{K}{K+1}} c_{m,q}^{cor}(t), \quad (5)$$

여기서 K 는 kappa-factor, $c_{m,q}^{unc}(t)$ 는 m 과 q 에 대해 독립적으로 발생하는 랜덤변수로서 $CN(0, 1/M_t)$ 분포를 가지며, $c_{m,q}^{cor}(t)$ 는 angle of departure (AoD)의 분포를 따르는 랜덤변수 $\phi_q(t)$ 에 의해 아래와 같이 결정된다.

$$c_{m,q}^{cor}(t) = \frac{1}{\sqrt{M_t}} \exp\left(j(m-1) \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \phi_q(t)\right), \quad (6)$$

여기서 d 는 안테나간의 간격, λ 는 파장을 뜻한다.

위의 디자인은 단순히 채널모델에 따라 코드워드를 랜덤하게 발생시킨 것에 불과하다. 위와 비슷한 방식으로 MOBF 기법과 OBF 기법의 빔도 쉽게 디자인 할 수 있다^[7]. 그러나 COBF 기법에서의 빔은 랜덤 행렬과 코드북이 곱해져서 형성되므로, 그 빔의 디자인이 다른 기법들 보다 매우 복잡하다. 일례로 위 kappa-factor 채널 모델에서도 AoD의 분포가 uniform하지 않은 경우에는 [7]에서 제안된 파라미터 디자인을 적용하더라도 빔의 위상분포를 정확하게 맞추기가 힘들다^[7].

더군다나 실제의 모바일환경에서 적용되는 채널은 일반적으로 kappa-factor 모델보다 복잡하다. 이러한 채널환경에서는 COBF는 그 파라미터 디자인이 훨씬 어려워지고 복잡해짐에 비해, CBF-CR은 채널모델을 세운 후 그 채널의 분포와 동일하게 코드워드들을 디자인함으로써 채널과 matched 되는 빔을 자연스럽게 형성할 수 있는 좋은 장점을 갖고 있다.

III. 실험 결과

본 장에서는 제안한 CBF-CR기법의 성능을 실험을

통해 평가하였다. 비교를 위해 실험환경은 [7]에서의 실험환경과 동일한 환경을 택하였다. 채널은 κ -factor 모델로 생성하고, 단말기의 속도는 1km/h인 채널을 가정하였다. 사용자들의 DoA의 분포는 uniform하다고 가정하였다. 송신단의 안테나 수는 4개이고, 총 사용자수는 10명이고, 3 비트 코드북($Q=8$)을 사용하였다. 또한 하나의 타임슬롯 중에서 하나의 파일럿이 차지하는 비율을 3.7%로 가정하였고, COBF 기법과 CBF-CR 기법에서 필요한 최대의 파일럿인 매 타임슬롯마다 송신안테나 수만큼의 파일럿 수를 가정하였다. 주목할 점은 채널 변화가 느린 환경에서는 추정된 채널을 반복적으로 사용함으로써 제안된 CBF-CR 기법과 COBF 기법에서 필요한 파일럿의 수가 더 줄어들 수 있다는 것이다^[6].

그림 2에서는 MOBF, COBF, CBF-CR, OBF 기법 등의 시스템 용량을 κ -factor의 변화에 따라 측정 한 것이다. Quantized codebook이라고 표시된 선은 제안된 CBF-CR 기법에서 코드북 교환을 하지 않고 하나의 코드북만을 고정하여 사용한 시스템, 즉 $N_c = 1$ 인 경우의 성능을 보인다. 점선과 쇠선으로 표시된 성능은 빔을 i.i.d. complex Gaussian 형태로 디자인 한 경우와 반대로 coherent beam 형태로 디자인하여 매 시간 바꿔 사용한 MOBF 기법의 성능이다. 그림 2는 시스템 용량 계산 시 파일럿을 고려하지 않은 경우의 성능이고, 그림 3은 파일럿에 의한 성능저하를 고려한 성능이다.

[7]에서 제안한 κ -factor에 따른 빔 디자인을 적용한 경우, i.i.d. complex Gaussian 형태로 빔을 디자인 한 경우나 coherent beam 형태로 빔을 디자인한 경우보다 성능이 항상 우수하다. 참고로 공간적 상관도가 매우 약한 경우에 최적의 빔은 i.i.d. complex Gaussian 형태를 갖고, 공간적 상관도가 높은 경우에는 coherent beam 형태를 가지므로 양 극단에서는 각각의 성능과 접하는 특징을 보여준다^[7].

그림 2와 그림 3에서 COBF 기법의 성능과 CBF-CR 기법의 성능이 유사함을 확인할 수 있다. MOBF 기법의 경우, 파일럿 부를 제외한 그림 2에서의 성능은 위 두 기법과 성능이 동일하나, 파일럿에 의한 손실이 크므로 최종적인 성능인 그림 3에서의 성능은 뒤쳐진다. 고정된 코드북을 사용한 시스템은 CBF-CR 기법 혹은 COBF 기법에 비해 랜덤 빔형성 효과를 얻지 못하므로, 성능이 떨어진다. 또한, OBF 기법은 다중빔의 선택적 다이버시티가 없으므로, 시스템 용량이 더 작다. 실험

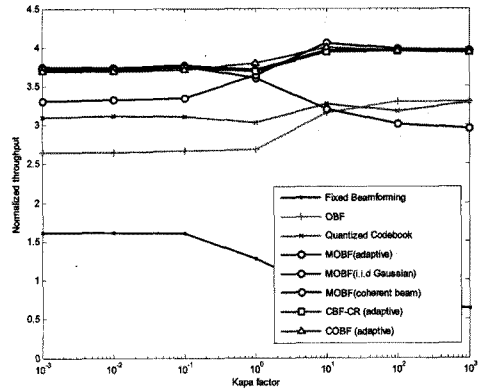


그림 2. κ -factor에 따른 시스템 용량 (파일럿 손실을 고려안함)

Fig. 2. System throughput according to κ -factor (Not considering pilot overhead in throughput).

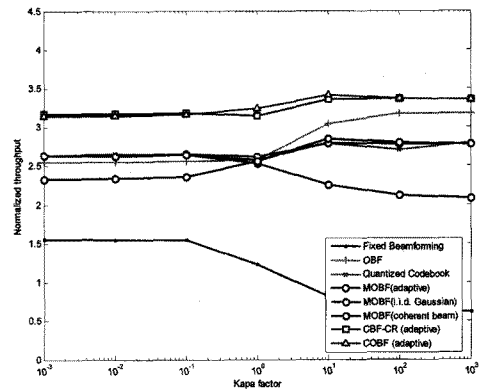


그림 3. κ -factor에 따른 시스템 용량

Fig. 3. System throughput according to κ -factor.

결과에서 이러한 랜덤 빔형성 효과와 빔 선택적 다이버시티의 시너지 효과가 크기 때문에, CBF-CR 기법과 COBF 기법의 성능이 다른 기법들에 비해 우수함을 알 수 있다.

본 실험결과에서는 [7]에서 COBF 기법의 파라미터 디자인이 완성된 채널모델인 κ -factor 채널모델을 적용하였기 때문에, CBF-CR 기법의 성능은 COBF 기법의 성능과 유사하게 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이, 단일 채널모델이 복잡한 경우, COBF 기법은 파라미터 디자인 자체가 어려울 수 있고, 이 경우 채널모델에 따라 빔을 디자인한 CBF-CR 기법보다 성능이 좋지 못할 것임을 유추할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 OBF 기법에 빔 선택적 다이버시티를 추가함으로써 이득을 얻는 CBF-CR 기법을 제안한다. CBF-CR 기법은 빔 선택적 다이버시티를 파일럿의 수와 관계없이 증가시킬 수 있어 MOBF 기법에 비해 시스템 용량을 크게 증가시킬 수 있다. 또한, COBF 기법에 비해 빔의 디자인이 자유로워서 채널모델에 관계없이 빔 선택적 다이버시티 및 랜덤 빔형성에 의한 성능 향상을 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

[1] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas", *Bell Labs Technical Journal*, pp. 41-59, Oct. 1996.

[2] S. Vishwanath, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Duality, Achievable Rates, and Sum-rate Capacity of MIMO Broadcast Channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2658-2668, Oct. 2003.

[3] R. W. Heath Jr., M. Airy, and A. J. Paulraj, "Multiuser Diversity for MIMO Wireless Systems with Linear Receivers," *Proc. of Signals, Systems and Computers 2001*, vol. 2, pp. 1194-1199, Nov. 2001.

[4] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic Beamforming Using Dumb Antennas," *IEEE Trans. Information Theory*, pp. 1277-1294, June 2002.

[5] I. M. Kim, S. C. Hong, S. S. Ghassemzadeh, and V. Tarokh, "Opportunistic Beamforming Based on Multiple Weighting Vectors," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 6, no. 6, pp. 2683-2687, Nov. 2005.

[6] J. Kang, I. C. Choi, D. S. Kwon, and C. Lee, "An Opportunistic Beamforming Technique Using a Quantized Codebook," *IEEE Veh Technol. Conf. 2007 spring*, pp. 1647-1651, Apr. 2007.

[7] 강지원, 권동승, 이충용, 황영수, "Kappa-factor 모델에 기반을 둔 최적의 코드북 기반 Opportunistic Beamformer 파라미터 디자인," 전자공학회논문지, 제45권 TC편, 제23호, 20-25쪽, 2008년 12월

저 자 소 개



강 지 원(학생회원)
2003년 연세대학교 전기전자공학 학사 졸업.
2005년 연세대학교 전기전자공학 석사 졸업.
2005년~현재 연세대학교 전기전자공학부 박사과정 재학

<주관심분야 : 통신신호처리>



유 병 옥(학생회원)
2004년 연세대학교 전기전자공학 학사 졸업.
2006년 연세대학교 전기전자공학 석사 졸업.
2006년~현재 연세대학교 전기전자공학부 박사과정 재학

<주관심분야 : 통신신호처리>



서 정 태(정회원)
1985년 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.
1987년 연세대학교 전자공학과 석사 졸업.
1988년~1990년 삼성전자 주임연구원

1990년~1995년 연세대학교 전자공학과 박사 졸업

2003년 Virginia Polytechnic Institute and State University Visiting Scholar

1995년~현재 충주대학교 정보제어공학과 교수
<주관심분야 : 통신신호처리>



이 충 용(정회원)
1987년 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.
1989년 연세대학교 전자공학과 석사 졸업.
1995년 Georgia Tech. 전자공학과 박사 졸업.

1996년~1997년 삼성전자 선임연구원

1997년~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수
<주관심분야 : 통신신호처리>