

다중사용자 다중안테나 시스템에서 두 단계 피드백 및 스케줄링의 적응형 최적화

민 문 식*

An Adaptive Optimization of Two-Stage Feedback and Scheduling in Mu-Mimo Systems

Moonsik Min*

요 약

본 논문은 다중안테나 하향링크 채널에서 제안된 바 있는 두 단계 피드백 및 스케줄링 기법의 최적화를 연구한다. 기존의 두 단계 기법이 가지는 문제점을 분석하고, 이를 극복할 수 있는 실용적인 접근법을 고안한다. 이 과정에서 수학적 근거를 제시하여 제안하는 기법의 실용성을 뒷받침한다.

Key Words : MU-MIMO, CSI, scheduling, limited feedback, spectral efficiency

ABSTRACT

This letter considers an optimization of the two-stage feedback and scheduling method in multiple-input/multiple-output broadcast channels. This letter focuses on the realistic limitation of the two-stage method. To overcome the limitation, an adaptive method is proposed based on mathematical analysis.

1. 서 론

다중사용자 다중안테나(MU-MIMO)기법은 복수의 사용자들을 통해 가상의 MIMO채널을 형성하여 주파수 효율을 증가시킨다¹⁻³⁾. 이때, 수신부 협력이 불가능하

므로 충분한 성능을 얻기 위해 송신부가 채널상태정보(CSI)필요로 한다. 특히, 기지국이 직접 CSI를 확보하기 어려운 환경에서는 수신부로부터 채널정보를 전달 받는 제한된 피드백(limited feedback)기법이 주로 활용 된다^{2,3)}. 제한된 피드백은 효율적으로 CSI정보를 피드백 하지만, 전체 피드백양이 사용자 수에 선형 비례하는 단점이 있다.

피드백 양을 효율적으로 줄이기 위해, 부직교 사용자 선택(SUS)을 기반으로 두 단계 피드백 및 스케줄링(OTFS) 기법이 제안된 바 있다⁴⁾. 하지만 최적의 임계치를 찾는 과정에서 채널 품질 표시기(CQI)의 확률분포를 요구하는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해, 본 논문에서는 OTFS기법의 평균 피드백 양이 단일 최소치를 가지는 컨벡스(convex) 함수로 근사됨을 보이고, 이를 활용하여 최적의 임계치에 수렴하는 적응형 피드백 기법을 제안한다.

II. 시스템 모델

하나의 기지국이 M 개의 송신안테나를 통해 K 명의 사용자와 동시에 통신하는 시스템을 고려한다. 각 사용자의 수신신호는

$$y_k = \mathbf{h}_k^H \sum_{i \in S} \mathbf{w}_i s_i + n_k \quad (1)$$

가 되고, 여기서 \mathbf{h}_k 는 사용자 k 와 기지국 사이의 채널 벡터이며, 각 원소가 독립적인 평균 0, 분산 1의 complex Gaussian분포를 가진다. n_k 는 complex additive Gaussian noise를 나타내며, 평균과 분산은 각각 0과 1이다. 빔포밍 벡터 \mathbf{w}_i 는 zero-forcing 빔포밍을 통해 얻어지며, s_i 는 사용자 i 에게 준비된 송신 신호이다. 집합 S 는 송신을 위해 선택된 사용자 집합이다. 송신 파워는 $E\{\|\mathbf{x}\|^2\} = P$ 로 제한되고, 파워는 각 사용자에게 동일하게 분배된다. 송신부의 빔포밍을 돕기 위해 각 사용자는 자신의 채널을 2^B 사이저의 코드북을 통해 양자화하여 피드백한다^{2,3)}. 즉, 각 사용자는 B 비트를 CSI피드백에 사용한다.

본 논문에서는 시스템의 피드백 효율을 최적화하기 위해 OTFS기법⁴⁾을 사용한다. OTFS는 시스템을 두

* 본 논문은 2017학년도 목포대학교 교내연구과제 지원에 의하여 연구되었음

• First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-1206-3805) Mokpo National University, Department of Electronics, Information and Communication Engineering, mnsk1min@mokpo.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2018-03-062, Received March19, 2018; Revised April 9, 2018; Accepted April 9, 2018

단계로 나눠 각 단계에서 CQI와 부직교성(semi-orthogonality)을 기회적으로 활용하여, SUS를 통해 스케줄링 될 가능성이 없는 사용자의 피드백을 사전에 배제한다. 즉, 첫 번째 단계에서는

$$T_1 = \{k \in \{1, \dots, K\} : \gamma_k > \gamma_T\} \quad (2)$$

와 같이 CQI γ_k 가 특정 임계치를 넘는 사용자들의 집합 T_1 을 정의하고 T_1 내의 사용자만 피드백이 허용된다. 두 번째 단계에서는 첫 단계에서 선택된 사용자와 일정이상의 부직교성을 유지하는 사용자만 피드백이 허용되며, 결과적으로 피드백 하는 사용자의 절대적인 수를 줄임으로써 시스템 전체의 평균 피드백 양을 효율적으로 줄일 수 있다. (2)에서 주어진 임계치 γ_T 는 시스템의 디자인 파라미터가 된다.

III. 제안하는 적응형 피드백 기법

OTFS사용하면 시스템의 평균 피드백 양 B_{avg} 는 다음과 같이 근사된다⁴⁾.

$$B_{avg} \approx K_1 B + \left(1 - \frac{K_1}{K}\right)^K \cdot KB + \sum_{i=1}^{M-1} \Pr(\varepsilon_i) \cdot (iB + Kt_i - K_1 t_i) \equiv \bar{B}(K_1), \quad (3)$$

여기서 ε_i 는 T_1 으로부터 (SUS를 통해) 스케줄링 되는 사용자 수가 i 와 일치하는 확률적 이벤트를 뜻하고, t_i 는 채널 방향벡터의 특성과 SUS알고리즘으로부터 결정되는 상수 값이다⁴⁾. 그리고 K_1 은 첫 번째 단계에서 피드백을 전송하는 사용자 수의 평균을 뜻하며, 즉, $K_1 = E[|T_1|]$ 로 정의 된다. 기존의 논문⁴⁾에서는 (3)의 근사 값을 통해 최적의 K_1 을 찾고, 최적의 K_1 값을 통해 최적의 임계치를 구한다:

$$\gamma_T = F_{\gamma_k}^{-1} \left(1 - \frac{K_1}{K}\right) \quad (4)$$

하지만 이 경우, CQI의 확률 분포가 주어져야 한다는 단점이 있으며 이는 OTFS의 실제 구현에 제약을 가져온다. 본 논문에서는 $\bar{B}(K_1)$ 가 컨벡스 함수로 근사됨을 보이고 항상 단일 최소치가 존재함을 밝힌다. 단일 최소치가 보장되면, 적응화(adaptation)를 통해 임의로 초기화된 임계치를 최적의 K_1 에 상응하는 임

계치로 비교 수렴시킬 수 있다.

함수 $\bar{B}(K_1)$ 의 컨벡스성을 보이기 위해 K_1 에 대한 미분을 고려한다. 이때, 문제를 단순화하기 위해 $\Pr(\varepsilon_i)$ 이 K_1 에 대해 상수라 가정한다. $\Pr(\varepsilon_i)$ 은 T_1 으로부터 스케줄링 되는 사용자 수가 i 인 확률을 뜻하기 때문에, T_1 내의 평균 사용자 수로 정의 되는 K_1 값에 의해 크게 영향을 받지 않는다. 이는 SUS의 부직교성 임계치가 비현실적으로 크지 않는 한 사용자 한 명이 추가로 스케줄링 되기 위해 필요한 새로운 사용자 수가 상대적으로 크기 때문이다. 이러한 가정 하에서 $\bar{B}(K_1)$ 의 도함수는

$$\frac{\partial}{\partial K_1} \bar{B}(K_1) = -KB \cdot \left(1 - \frac{K_1}{K}\right)^{K-1} + B - \sum_{i=1}^{M-1} t_i \Pr(\varepsilon_i) \quad (5)$$

로 계산된다. 여기서 K_1/K 가 값이 1보다 작은 증가함수이기 때문에, 도함수가 $0 \leq K_1 \leq K$ 의 범위에서 단조증가 함수이고, 이는 $\bar{B}(K_1)$ 가 컨벡스 함수임을 뜻한다. 또한, 도함수의 양 끝 값을 계산하면, $K_1 = 0$ 에서 $\frac{\partial}{\partial K_1} \bar{B}(0) = -(K-1)B - \sum_{i=1}^{M-1} t_i \Pr(\varepsilon_i) < 0$ 을 만족하고, $K_1 = 1$ 에서는

$$\frac{\partial}{\partial K_1} \bar{B}(1) = B - \sum_{i=1}^{M-1} t_i \Pr(\varepsilon_i) \quad (6)$$

로 주어진다. 기존의 논문⁴⁾에 주어진 t_i 의 정의를 활용하면 $\sum_{i=1}^{M-1} t_i \Pr(\varepsilon_i) < M-1$ 임을 알 수 있다. 따라서 $B \geq M-1$ 이면, $\bar{B}(K_1)$ 는 컨벡스 함수이며, 동시에 단일 최소값 K_1^* 이 항상 존재함을 알 수 있다.

또한, γ_k 는 모든 양수 값을 가질 수 있기 때문에, (4)로부터 임계치 γ_T 와 K_1 의 관계가 일대일 대응이 된다. 따라서 γ_k 의 CDF F_{γ_k} 를 알 수 없는 경우에도 적응화(adaptation)을 통해 K_1^* 에 수렴하는 최적의 γ_T 를 구할 수 있다. 예를 들어, 직관적으로, 집합 T_1 의 현재 사용자 수를 최적의 K_1 값과 비교해 그 값이 K_1 보다 크면 γ_T 를 증가시키고, 작으면 감소시키는 방법을 고려할 수 있다. 이전의 연구에서는 상기한 바와 같은 수학적 근거 없이 실험적(heuristic)으로 적응형 임계치가 제안된 바 있다⁵⁾. 본 논문에서는 임계치의 수렴성을 보장하기 위해 수정을 가해, 다음과 같은 적

응형 임계치를 제안한다.

$$\gamma_T(f+1) = \gamma_T(f) - \left(\frac{\gamma_T(f)}{a} \right) \frac{K_1^* - |T_1(f)|}{\max(K_1^*, |T_1(f)|)}, \quad (7)$$

여기서 f 는 프레임 인덱스이고 상수 $a > 1$ 는 제안하는 기법의 디자인 파라미터이다. a 가 클수록 수렴 속도는 늦어지지만 보다 정확한 값에 수렴한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 제안된 기법의 성능을 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 검증한다. 모든 결과는 $M = 4$, $B = 8$, $P = 10$ 을 가정하였다. 제안하는 기법은 OTFS기법을 기반으로 하고, 해당 기법의 임계치만을 (7)의 조건에 맞춰 갱신하는 기법이므로 주파수효율 측면에서는 기존의 OTFS와 동일한 성능을 보인다. 따라서 본 절에서는 피드백 비트 수에 초점을 맞춰 제안하는 기법의 성능을 기존의 방식과 비교한다.

그림 1은 섹션 III에서 수학적 분석을 위해 추가한 “Pr(ϵ_i)이 K_1 에 대해 상수” 가정을 검증한다. 그림 1에서 Analysis는 (5)를 그린 결과이고, Simulation은 Monte Carlo 시뮬레이션과 수치해석적 미분을 통해 시뮬레이션 한 값이다. 실험 결과를 통해 (5)가 B_{avg} 의 도함수를 적절히 근사함을 알 수 있다. Zero-crossing 주변에서 약간의 오차가 있지만 컨벡스성과 단일해의 존재여부에는 영향을 미치지 않는 정도이다.

그림 2는 제안하는 적응형 기법을 사용하여 얻은 성능(Proposed)과 CDF를 통해 구한 최적 해를 사용한 기존의 논문^[4]의 성능(Conventional)을 비교한다. 임계치의 초기값은 $\max_{k=\{1, \dots, K\}} \gamma_k$ 로 가정하였고, (7)에서 $a = 2$ 이다. a 의 값이 상대적으로 작기 때문에 적응형 임계치가 최적값 주변에서 약간의 간격을 가

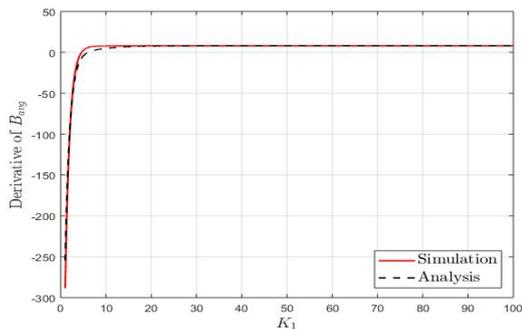


그림 1. 평균 비트수의 도함수 vs K_1 .
Fig. 1. Derivative of B_{avg} vs K_1 .

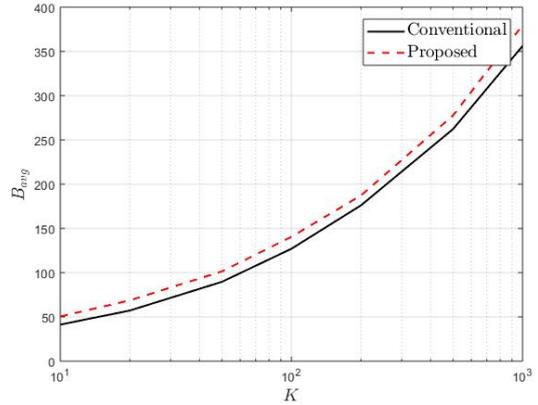


그림 2. 평균 비트 수 vs 사용자 수.
Fig. 2. B_{avg} vs the number of users.

지고 진동하게 되고, 따라서 제안하는 기법의 성능이 근소하게 떨어진다.

V. 결론

본 논문에서는 두 단계 피드백 및 스케줄링을 사용하는 다중안테나 시스템에 적용 가능한 적응형 최적화 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 첫 번째 단계의 피드백 사용자 수를 기반으로 임계치를 조절하며, 시스템의 CQI의 확률분포에 무관하게 활용 가능하므로 기존에 비해 실용성이 높다. 단, 본 논문의 연구 성과는 네트워크 내의 유저들의 채널방향정보(CDI)가 M 차원 복소 벡터 공간에서 독립적이고 등방형으로 (isotropic)분포하는 경우에 한하여 유도된 결과이다. 만약 이러한 가정이 만족되지 않으면(Rician 채널, 안테나 상관성이 존재하는 경우 등), (3)이 만족되지 않으므로 평균 피드백 수의 컨벡스성과 그에 따른 적응형기법의 수렴성이 보장되지 않을 수 있다. 따라서 채널분포가 i.i.d. zero-mean Gaussian이 아닌 경우에는 별도로 독립적인 연구가 필요하다.

References

- [1] T. Yoo and A. Goldsmith, “On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 528-541, Mar. 2006.
- [2] N. Jindal, “MIMO broadcast channels with finite-rate feedback,” *IEEE Trans. Inf. Theory*,

vol. 52, no. 11, pp. 5045-5060, Nov. 2006.

- [3] T. Yoo, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Multi-antenna downlink channels with limited feedback and user selection," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 7, pp. 1478-1491, Sept. 2007.
- [4] M. Min, D. Kim, and G. H. Im, "Opportunistic two-stage feedback and scheduling for MIMO downlink systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 1, pp. 312-324, Jan. 2013.
- [5] Y. J. Yoon, S. J. Kang, and M. Min, "Adaptive two-stage feedback and user selection for MIMO downlink channels," in *Proc. KICS Spring Conf. 2017*, pp. 61-63, Chosun Univ., Korea, Jun. 2017.