

두 유저 MISO 간섭 채널에서 불완전한 채널 정보에 기반한 빔포밍 게임

이정훈¹ · 이진² · 류종열^{3*}

Beamforming Games with Quantized CSI in Two-user MISO ICs

Jung Hoon Lee¹ · Jin Lee² · Jong Yeol Ryu^{3*}

¹Department of Electronics Engineering, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin 17035, Korea

²Samsung Electronics, Suwon 16677, Korea

^{3*}Department of Information and Communications Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

요 약

본 논문에서는 다중 안테나를 사용하는 두 개의 송신단이 각각 하나의 안테나를 가지고 있는 수신단을 서비스 할 때 구성되는 두 유저 간섭 채널에서 불완전한 채널 정보를 사용하는 송신단들의 빔포밍 게임을 고려한다. 빔포밍 게임에서는 송신단(i.e., 플레이어)이 자신들의 전송률(i.e., 보상)을 높이기 위해서 경쟁을 하고, 빔포밍 기법을 위해서는 완전한 채널 상황에서 최적이라고 알려진 maximum ratio transmission (MRT) 기법과 zero forcing (ZF) 빔포밍 기법을 선형으로 결합하는 기법(i.e., 전략)을 사용한다. 우리가 제안하는 게임에서는 송신단이 불완전한 채널 정보를 사용하므로, 최적의 전략을 찾더라도 그 전략이 유효하지 않을 수 있다. 본 논문에서는 불완전한 채널 정보로부터 양자화 오차의 영향을 고려한 송신단의 효율적인 빔포밍 전략을 제안한다.

ABSTRACT

In this paper, we consider a beamforming game between the transmitters in a two-user multiple-input single-output interference channel using limited feedback and investigate how each transmitter is able to find a modified strategy from the quantized channel state information (CSI). In the beamforming game, each of the transmitters (i.e., a player) tries to maximize the achievable rate (i.e., a payoff function) via a proper beamforming strategy. In our case, each transmitter's beamforming strategy is represented by a linear combining factor between the maximum ratio transmission (MRT) and the zero forcing (ZF) beamforming vectors, which is the Pareto optimal achieving strategy. With the quantized CSI, the transmitters' strategies may not be valid because of the quantization errors. We propose a modified solution, which takes into account the effects of the quantization errors.

키워드 : 빔포밍, 내쉬 협상, 불완전한 채널 피드백, 다중 안테나, 간섭 채널

Key word : Beamforming, Nash bargaining, limited feedback, multiple-input single-output, interference channels

Received 05 May 2017, Revised 11 May 2017, Accepted 22 May 2017

* Corresponding Author Jong Yeol Ryu (E-mail: jonyeol_ryu@gnu.ac.kr, Tel: +82-55-772-9173)

Department of Information and Communications Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.7.1299>

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

게임 이론은 이익이 충돌하는 플레이어들의 행동을 분석하는 수학 분야중 하나이다[1]. 게임이론은 경제학에서 널리 사용되기 시작하였으며, 지금은 정치학, 생물학 컴퓨터 공학 등 다양한 분야에서 이익이 상충하는 당사자들 간의 행동을 분석하는데 널리 사용되고 있다. 게임이론에서 게임은 플레이어, 전략, 보상 의 세 가지 요소로 구성 되는데, 무선 통신 시스템에서도 유저들 간의 행동을 분석하기 위해서 게임이론이 널리 사용되어 왔다[2-5].

무선 통신 시스템의 성능은 송신단이 채널 정보를 알고, 그 채널 상황에 적응함으로써 크게 향상될 수 있다. 많은 무선 통신 시스템이 상향 링크와 하향 링크의 채널이 다른 frequency division duplexing(FDD) 방식인데, FDD 시스템에서는 송신 단이 채널 정보를 얻기 위해서 제한된 용량을 사용하는 피드백 기법이 널리 사용된다. 이 기법에서는 수신단이 일정 크기의 채널 코드북을 사용하여 채널을 양자화 하고, 코드북 안에 해당하는 코드워드의 인덱스를 보낸다. 이 때 송신단이 양자화 오차를 가진 불완전한 채널 정보를 가지므로 완전한 채널 정보를 가졌을 때보다 성능이 열화되는데, 코드북 크기에 따른 성능 열화 정도는 점대점 다중안테나 채널, 다중 사용자 다중 안테나 채널 등 다양한 환경에서 활발하게 연구되어 왔다[6,7].

만약 송신단에서 양자화된 채널을 가지고 있는 경우, 송신단들의 게임은 부정확한 정보에 기반해서 이루어지게 된다. 양자화된 정보로는 각 송신단이 정확한 전송량을 알 수 없기 때문에 양자화 된 정보로부터 찾아낸 빔포밍 전략 또한 유효하지 않게 된다. 이러한 양자화된 채널 정보를 이용하는 불완전한 피드백 기법은 무선 통신 시스템에서 널리 사용되지만, 불완전한 피드백 기법에 기반한 무선 노드들의 게임은 아직 정확히 연구되지 않았다. 따라서 부정확한 채널 정보가 송신단 간의 게임에 어떠한 영향을 끼치는지, 그리고 부정확한 정보로부터 각 송신단이 어떻게 전략을 찾아야 하는지에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 불완전한 피드백을 사용하는 두 사용자 간섭채널에서 송신단 간의 빔포밍 게임을 연구한다. 각 사용자가 각 채널의 방향 정보를 B 비트로 피드백하여 송신단에게 보내주고, 송신단은 B 비트로 양자화

된 채널 정보들을 공유한다. 빔포밍을 위해서는 각 송신단이 maximum ratio transmission (MRT) 빔포밍 벡터와 zero-forcing (ZF) 빔포밍 벡터를 조합하여 사용하는데, 이는 이 기법이 두 사용자 MISO 간섭 채널에서 최적이기 때문이다. 같은 모델에서 완벽한 채널 정보를 알 때의 빔포밍 게임이 [2]에서 고려되었고, 채널 분포를 완벽히 알 경우의 빔포밍 게임은 [3]에서 고려되었다. 이들 논문과 본 논문의 차이점은 송신 단이 코드북으로 양자화 된 채널 정보를 이용하고, 양자화 오차에 맞추어 빔포밍 전략을 개선한다는 점이다.

본 논문에서는 먼저 비협동 게임에서 양자화된 채널 정보를 사용할 경우 얻어지는 내쉬 평형점 (Nash equilibrium)이 양자화의 정확도와 상관없이 일정하게 얻어진다는 것을 보인다. 그 다음으로는 송신단들의 협력 게임을 고려하여 내쉬 협상 해를 찾는다. 이 경우 불완전한 정보를 그대로 믿는 기존 방법과 달리, 제안하는 기법에서는 양자화 오차를 고려하여 전략을 찾는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 환경은 그림 1에 나타나 있다. 두 사용자 MISO 간섭 채널에서 각 송신단이 M 개의 안테나를 가지고 있고, 한 개의 안테나를 가진 유저를 각각 서비스 한다. 이 때 i 번째 유저에서 받는 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$y_i = \mathbf{h}_{ii}^\dagger \mathbf{x}_i + \mathbf{h}_{ji}^\dagger \mathbf{x}_j + n_i. \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{h}_{ij} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 i 번째 송신단부터 j 번째 유저까지의 벡터 채널, $(\cdot)^\dagger$ 는 켈레 전치 벡터를 나타내고, $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 i 번째 송신단에서 보낸 신호, 그리고 $n_i \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ 는 평균이 0 분산이 1인 백색 가우시안 노이즈이다. (1)에서 $\mathbf{h}_{ji}^\dagger \mathbf{x}_j$ 와 $\mathbf{h}_{ii}^\dagger \mathbf{x}_i$ 는 각각 i 번째 유저에서 원하는 신호와 간섭 신호가 된다.

송신단은 선형 빔포밍 기법을 사용하는데, i 번째 송신단에서 보내는 신호 \mathbf{x}_i 는 다음과 같은 형태를 따른다.

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{v}_i s_i \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{v}_i \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 은 송신단 i 에서의 빔포밍 벡터로서 $\|\mathbf{v}_i\|^2 = 1$ 을 만족한다. 또한 $s_i \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ 는 송신단 i 가 자신의 수신기에게 보내는 심볼로서 최대 송신 파워가

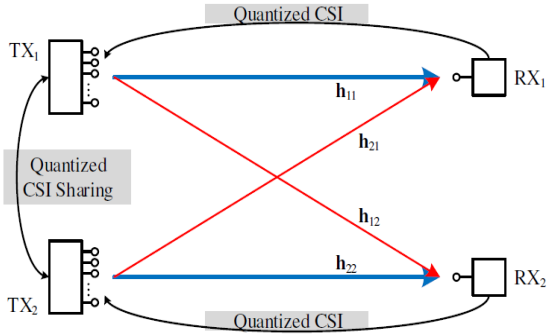


Fig. 1 System model.

P일때 $E[|s_i|^2] \leq P$ 를 만족한다.

실제 많은 시스템에서 완벽한 채널 정보를 송신단에서 알기가 불가능하기 때문에, 본 논문에서는 제한된 피드백 링크를 통해 수신단이 송신단에게 양자화 된 채널 정보를 알려주는 환경을 고려하였다. 분석의 용이성을 위하여 본 논문에서는 수신단이 각 링크의 채널의 방향을 B비트로 양자화 하여 보내주며, 채널의 크기는 완벽히 알 수 있다고 가정한다. 이는 많은 논문들에서 널리 쓰이는 가정으로서 M차원 채널의 방향이 2M개의 스칼라 값으로 표현되는 반면, 채널의 크기는 차원과 관계없이 한 개의 스칼라 값으로 표현되기 때문이다. 채널의 크기를 양자화 하여 보내주는 경우 별도의 채널 크기 코드북을 사용하는 환경을 고려함으로써 쉽게 확장될 수 있다.

모든 i, j 에 대해 송신단 j 는 채널 \mathbf{h}_{ij} 를 다음과 같은 과정을 통하여 양자화 된 채널 $\hat{\mathbf{h}}_{ij}$ 로 양자화 해낸다.

$$\hat{\mathbf{h}}_{ij} := q_{ij}(\tilde{\mathbf{h}}_{ij}) = \operatorname{argmax}_{\mathbf{w} \in W_{ij}} |\mathbf{w}^H \tilde{\mathbf{h}}_{ij}|^2 \quad (3)$$

이때 $\tilde{\mathbf{h}}_{ij}$ 는 $\tilde{\mathbf{h}}_{ij} = \mathbf{h}_{ij} / \|\mathbf{h}_{ij}\|$ 로서 채널 방향을 나타내며, $q_{ij}: C^{M \times 1} \rightarrow W_{ij}$ 는 단위 벡터 2^B 개로 이루어진 B비트 코드북 W_{ij} 를 사용하는 벡터 양자화기를 나타낸다. 이 경우 채널 방향 $\hat{\mathbf{h}}_{ij}$ 는 다음과 같이 표현이 가능한데,

$$\hat{\mathbf{h}}_{ij} = \sqrt{1-Z_{ij}} \tilde{\mathbf{h}}_{ij} + \sqrt{Z_{ij}} \mathbf{e}_{ij} \quad (4)$$

여기서 $Z_{ij} \in [0, 1]$ 은 채널 방향 양자화 오차로서 다음과 같이 정의된다[6].

$$Z_{ij} = \sin^2[\angle(\mathbf{h}_{ij}, \hat{\mathbf{h}}_{ij})] \quad (5)$$

또한 $\mathbf{e}_{ij} \in C^{M \times 1}$ 는 $\mathbf{e}_{ij} \perp \hat{\mathbf{h}}_{ij}$ 를 만족하는 채널 오차 방향 단위 벡터를 나타낸다.

피드백 과정 이후 송신단이 서로 양자화 된 채널 정보를 공유하면 모든 송신단은 다음과 같은 양자화 된 채널 정보를 가지게 된다.

$$\|\hat{\mathbf{h}}_{11}\| \hat{\mathbf{h}}_{11}, \quad \|\hat{\mathbf{h}}_{12}\| \hat{\mathbf{h}}_{12}, \quad \|\hat{\mathbf{h}}_{21}\| \hat{\mathbf{h}}_{21}, \quad \|\hat{\mathbf{h}}_{22}\| \hat{\mathbf{h}}_{22} \quad (6)$$

두 사용자 MISO 간섭 채널에서 얻을 수 있는 전송량 영역(achievable rate region)의 Pareto 경계선([2] 참고)은 각 송신단에서 최대의 전력과 함께, MRT 빔포밍 벡터와 ZF 빔포밍 벡터를 선형적으로 결합하여 사용하여 얻어 진다는 사실이 [8]에서 이미 밝혀졌다. 따라서 우리가 고려하는 빔포밍 방식은 완전한 채널 정보를 가질 때 최적적이다.

완벽한 채널 정보를 가질 때 첫 번째 송신단의 빔포밍 벡터는 다음과 같은 형태를 가진다.

$$\mathbf{v}_1^*(\eta_1) = \frac{(1-\eta_1)\mathbf{v}_1^{*MRT} + \eta_1\mathbf{v}_1^{*ZF}}{\|(1-\eta_1)\mathbf{v}_1^{*MRT} + \eta_1\mathbf{v}_1^{*ZF}\|} \quad (7)$$

여기서 $\eta_1 \in [0, 1]$ 은 첫 번째 송신단의 선형 결합 계수이고, $\mathbf{v}_1^{*MRT} \in M \times 1$ 은 $\mathbf{v}_1^{*MRT} := \tilde{\mathbf{h}}_1$ 로 주어지는 MRT 빔포밍 벡터, $\mathbf{v}_1^{*ZF} \in M \times 1$ 는 $\mathbf{v}_1^{*ZF} := \frac{(\mathbf{I}_M - \tilde{\mathbf{h}}_1 \tilde{\mathbf{h}}_1^H) \mathbf{h}_{11}}{\|(\mathbf{I}_M - \tilde{\mathbf{h}}_1 \tilde{\mathbf{h}}_1^H) \mathbf{h}_{11}\|}$ 로 주어지는 ZF 빔포밍 벡터이다. 마찬가지로 두 번째 송신단의 빔포밍 벡터는 다음과 같이 주어지는데,

$$\mathbf{v}_2^*(\eta_2) = \frac{(1-\eta_2)\mathbf{v}_2^{*MRT} + \eta_2\mathbf{v}_2^{*ZF}}{\|(1-\eta_2)\mathbf{v}_2^{*MRT} + \eta_2\mathbf{v}_2^{*ZF}\|} \quad (8)$$

여기서 $\eta_2 \in [0, 1]$ 은 두 번째 송신단의 선형 결합 계수이고, $\mathbf{v}_2^{*MRT} \in M \times 1$ 은 $\mathbf{v}_2^{*MRT} := \tilde{\mathbf{h}}_2$ 로 주어지는 MRT 빔

포밍 벡터, $\mathbf{v}_2^{*ZF} \in M \times 1$ 는 $\mathbf{v}_2^{*ZF} := \frac{(\mathbf{I}_M - \tilde{\mathbf{h}}_2 \tilde{\mathbf{h}}_2^H) \mathbf{h}_{22}}{\|(\mathbf{I}_M - \tilde{\mathbf{h}}_2 \tilde{\mathbf{h}}_2^H) \mathbf{h}_{22}\|}$ 로 주어지는 ZF 빔포밍 벡터이다. 따라서 송신 단들의 전략이 (η_1, η_2) 일때 완벽한 채널 정보로부터 송신 단이 얻는 전송량 $R_i^*(\eta_1, \eta_2)$ 은 다음과 같다.

$$R_i^*(\eta_1, \eta_2) = \log_2 \left(1 + \frac{P \|\mathbf{h}_{11}\|^2 |\hat{\mathbf{h}}_{11}^H \mathbf{v}_1^*(\eta_1)|^2}{1 + P \|\mathbf{h}_{21}\|^2 |\hat{\mathbf{h}}_{21}^H \mathbf{v}_2^*(\eta_2)|^2} \right) \quad (9)$$

양자화 된 채널 정보를 가진 경우, 송신단은 양자화 된 정보로부터 불완전한 MRT 빔포밍 벡터와 ZF 빔포

밍 벡터를 결합하여 사용할 수밖에 없다. i 번째 송신단의 경우 양자화 된 채널 정보로부터 찾아낸 MRT 빔포밍 벡터, ZF 빔포밍 벡터는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{v}_i^{MRT} = \hat{\mathbf{h}}_{ii}, \quad \mathbf{v}_i^{ZF} = \frac{(\mathbf{I}_M - \hat{\mathbf{h}}_{ij} \hat{\mathbf{h}}_{ij}^\dagger) \hat{\mathbf{h}}_{ii}}{\|(\mathbf{I}_M - \hat{\mathbf{h}}_{ij} \hat{\mathbf{h}}_{ij}^\dagger) \hat{\mathbf{h}}_{ii}\|} \quad (10)$$

이때 선형 결합 계수 η_i 를 사용하여 다음과 같은 빔포밍 벡터를 사용하게 된다.

$$\mathbf{v}_i(\eta_i) = \frac{(1-\eta_i)\mathbf{v}_i^{MRT} + \eta_i\mathbf{v}_i^{ZF}}{\|(1-\eta_i)\mathbf{v}_i^{MRT} + \eta_i\mathbf{v}_i^{ZF}\|} \quad (11)$$

따라서 송신 단들의 전략이 (η_1, η_2) 일 때, 각 송신단이 얻는 전송량은 다음과 같다.

$$R_i(\eta_1, \eta_2) = \log_2 \left(1 + \frac{P \|\mathbf{h}_{i1}\|^2 |\hat{\mathbf{h}}_{i1}^\dagger \mathbf{v}_i(\eta_i)|^2}{1 + P \|\mathbf{h}_{21}\|^2 |\hat{\mathbf{h}}_{21}^\dagger \mathbf{v}_i(\eta_i)|^2} \right) \quad (12)$$

III. 기존 기법 및 제안하는 기법

3.1. 기존 기법: 불완전한 정보를 완벽하다고 간주

기존 기법의 경우 송신 단에서 양자화 된 채널정보를 완벽한 정보라 믿고 사용한다. 만약 두 사용자가 빔포밍 전략 (η_1, η_2) 를 사용할 때, 각 사용자는 자신이 얻을 수 있는 전송량 (12)를 정확 알 수 없다. 이는 (12) 역시 완벽한 채널정보 $\mathbf{h}_{11}, \mathbf{h}_{12}, \mathbf{h}_{22}, \mathbf{h}_{21}$ 를 포함하기 때문이다. 따라서 송신단 i 는 (12) 대신 자신이 가진 정보가 완벽하다고 믿고 빔포밍 전략 (η_1, η_2) 에 해당하는 자신의 전송량을 다음과 같이 예측한다.

$$\hat{R}_i(\eta_1, \eta_2) = \log_2 \left(1 + \frac{P \|\mathbf{h}_{i1}\|^2 |\hat{\mathbf{h}}_{i1}^\dagger \mathbf{v}_i(\eta_i)|^2}{1 + P \|\mathbf{h}_{21}\|^2 |\hat{\mathbf{h}}_{21}^\dagger \mathbf{v}_i(\eta_i)|^2} \right) \quad (13)$$

3.2. 제안하는 기법

제안하는 기법에서는 피드백 비트의 크기에 따른 양자화 오차의 영향을 고려하여 송신단들이 자신의 전송량을 예측한다. 분석의 용이성을 위해 각 유저가 B 비트로 구성된 랜덤 벡터 코드북으로 채널 방향을 양자화한다고 가정한다. B 비트 랜덤 벡터 코드북을 이용하여 M 차원 채널의 방향을 양자화 할 경우 (4)에서 양자화 오차 Z_{ij} 는 다음과 같은 특징을 가진다[6].

$$E[Z_{ij}] = 2^B \cdot \beta \left(2^B, \frac{M}{M-1} \right) \quad (14)$$

여기서 $\beta()$ 는 베타 함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\beta(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt \quad (15)$$

또한 베타 함수의 특성상 (14)에 정의된 채널 양자화 오차의 평균은 다음 조건을 만족하게 된다.

$$E[Z_{kk}] \leq 2^{-\frac{B}{M-1}} \quad (16)$$

먼저 (12)의 양자화 오차에 대한 평균의 아래계계를 다음과 같이 찾을 수 있다.

$$E[R_i(\eta_1, \eta_2)] = \log_2 \left(1 + \frac{P \|\mathbf{h}_{ii}\|^2 |\hat{\mathbf{h}}_{ii}^\dagger \mathbf{v}_i(\eta_i)|^2}{1 + P \|\mathbf{h}_{ji}\|^2 |\hat{\mathbf{h}}_{ji}^\dagger \mathbf{v}_j(\eta_j)|^2} \right) \quad (17)$$

$$\geq \log_2 \left(1 + \frac{P \|\mathbf{h}_{ii}\|^2 \mathbf{E}[|\hat{\mathbf{h}}_{ii}^\dagger \mathbf{v}_i(\eta_i)|^2]}{1 + P \|\mathbf{h}_{ji}\|^2 \mathbf{E}[|\hat{\mathbf{h}}_{ji}^\dagger \mathbf{v}_j(\eta_j)|^2]} \right) \quad (18)$$

이때 (4)와 (14)를 사용하여 분자에서 다음 관계를 찾을 수 있다.

$$\mathbf{E}[|\hat{\mathbf{h}}_{ii}^\dagger \mathbf{v}_i(\eta_i)|^2] \geq (1 - 2^{-B/(M-1)}) |\hat{\mathbf{h}}_{ii}^\dagger \mathbf{v}_i(\eta_i)|^2 \quad (19)$$

또한 비슷한 방법으로 분모에서 다음 관계를 찾아낼 수 있다.

$$\mathbf{E}[|\hat{\mathbf{h}}_{ji}^\dagger \mathbf{v}_j(\eta_j)|^2] \leq |\hat{\mathbf{h}}_{ji}^\dagger \mathbf{v}_j(\eta_j)|^2 + \frac{2^{-B/(M-1)}}{M-1} \quad (20)$$

따라서 (19)와 (20)을 (18)에 대입함으로써 i 번째 유저의 근사화 된 전송률 (21)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{R}_i(\eta_1, \eta_2) = & \log_2 \left(1 + \frac{P \|\mathbf{h}_{ii}\|^2 \cdot \left(1 - 2^{-\frac{B}{M-1}} \right) |\hat{\mathbf{h}}_{ii}^\dagger \mathbf{v}_i(\eta_i)|^2}{1 + P \|\mathbf{h}_{ji}\|^2 \left[|\hat{\mathbf{h}}_{ji}^\dagger \mathbf{v}_j(\eta_j)|^2 + \frac{2^{-\frac{B}{M-1}}}{M-1} \right]} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

전략을 찾을 때 송신단이 (13)을 사용하는 기존 기법과 달리 제안하는 기법에서는 송신단이 (21)을 사용한다.

IV. 여러 가지 게임의 해

4.1. 비협동 게임 (Non-cooperative games)

비협동 게임에서 각 유저들은 자신의 전송률만 고려하여 빔포밍을 한다. 이때 각 유저들은 자신의 신호대

잡음전력비 (SNR, signal-to-noise power ratio)를 최대화 하여야 하므로 MRT 빔포밍을 한다. 비협동 게임의 해는 내쉬 균형점(Nash equilibrium)으로 주어진다.

완벽한 채널 정보를 가졌을 때 SNR을 최대화 하기 위한 각 유저들의 해는 MRT 빔포밍 기법을 나타내는 $(\eta_1^{NE}, \eta_2^{NE}) = (0,0)$ 으로 주어진다. 불완전한 채널 정보의 경우의 비협동 게임의 해는 Theorem 1에서 구한다. Theorem 1. 송신단이 불완전한 채널 정보를 가진 경우 채널 정보의 정확도 (i.e., B) 와 상관없이 동일한 내쉬 균형점 $(\eta_1^{NE}, \eta_2^{NE}) = (0,0)$ 을 갖는다.

증명. 우리가 고려하는 시스템 모델이 대칭적이므로 $(\eta_1^{NE}, \eta_2^{NE}) = (0,0)$ 를 증명하기 위해서 $\eta_1^{NE} = 0$ 임을 보이면 된다. 불완전한 채널 정보를 가진 경우 (13)과 (21)에서 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$|\hat{\mathbf{h}}_{11}^\dagger \mathbf{v}_1(\eta_1)|^2 \leq |\hat{\mathbf{h}}_{11}^\dagger \mathbf{v}_1(0)|^2 = 1 \quad (22)$$

따라서 채널 정보의 정확도와 상관없이 모든 경우 η_1^{NE} 은 0 이고, $(\eta_1^{NE}, \eta_2^{NE}) = (0,0)$ 가 된다. ■

4.2. 협동 게임 (Cooperative games)

송신단들은 협동을 통해 얻을 수 있는 전송률을 추가적으로 높일 수 있다. 협동 없이 얻을 수 있는 전송률이 내쉬 평형점이라는 것을 알기 때문에, 송신단이 협동 후 내쉬 평형점보다 낮아지는 전송률을 가질 경우 협동은 실패하게 되고, 내쉬 평형점을 선택하여 전송한다. 이 논문에서 우리는 협동게임의 해로서 내쉬 협상을 고려한다. 내쉬 협상은 내쉬 곱 (Nash product)를 최대화 하는데, 우리의 경우 내쉬 곱은 협동하는 송신단들이 추가로 얻을 수 있는 보상(전송률)의 곱으로 정의된다.

완벽한 채널 정보를 가졌을 때의 내쉬 협상 해를 $(\eta_1^{NB*}, \eta_2^{NB*})$ 로 표기할 경우 다음과 같이 얻어진다.

$$(\eta_1^{NB*}, \eta_2^{NB*}) = \operatorname{argmax}_{(\eta_1, \eta_2)} \prod_{i=1}^2 [R_i^*(\eta_1, \eta_2) - R_i^*(\eta_1^{NE}, \eta_2^{NE})]$$

한편 불완전한 채널 정보를 가졌을 때, 기존 방법의 경우 내쉬 협상 해 $(\eta_1^{NB1}, \eta_2^{NB1})$ 와 제안하는 내쉬 협상 해 $(\eta_1^{NB2}, \eta_2^{NB2})$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$(\eta_1^{NB1}, \eta_2^{NB1}) = \operatorname{argmax}_{(\eta_1, \eta_2)} \prod_{i=1}^2 [\hat{R}_i(\eta_1, \eta_2) - \hat{R}_i(\eta_1^{NE}, \eta_2^{NE})]$$

$$(\eta_1^{NB2}, \eta_2^{NB2}) = \operatorname{argmax}_{(\eta_1, \eta_2)} \prod_{i=1}^2 [\bar{R}_i(\eta_1, \eta_2) - \bar{R}_i(\eta_1^{NE}, \eta_2^{NE})]$$

V. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 앞장에서 구한 내쉬 협상 해들의 성능을 비교한다. 시뮬레이션 환경을 위해 각 송신단이 4개의 안테나를 가지는 경우 (i.e., $M=4$) 를 고려하였고, SNR 은 10dB라고 가정하였다.

먼저 그림 2에서는 채널 정보의 정확도에 따라 얻을 수 있는 평균 내쉬 곱을 나타내었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 모든 채널 정확도에서 제안하는 기법이 기존 기법에 비해 협상으로 인한 이익이 더 커짐을 알 수 있다. 그림 3에서는 채널 정보의 정확도에 따라 얻어지는 내쉬 협상해가 얼마나 유효한지 비교하였다. 여기서 유효 확률은 송신단 1과 송신단 2의 전송율이 둘 다 증가할 확률을 말한다. 그림 3에서 관찰할 수 있듯이 제안한 기법은 기존 기법보다 협상 해의 유효성을 증가시킨다.

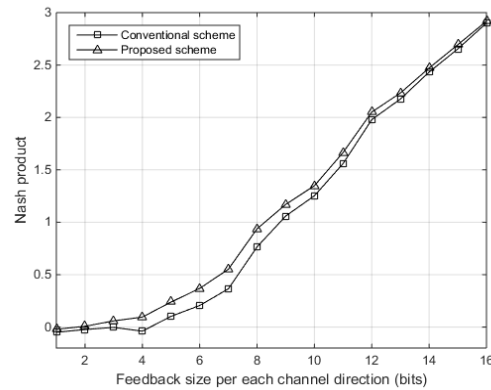


Fig. 2 Nash products with respect to feedback sizes

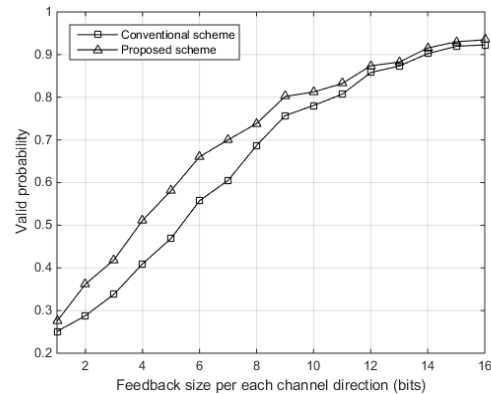


Fig. 3 Valid probabilities with respect to feedback sizes

VI. 결 론

본 논문에서는 두 유저 MISO 간섭 채널에서 불완전한 채널 정보를 가진 송신단들의 빔포밍 게임을 고려하였다. 송신단이 불완전한 채널 정보를 완벽하다고 믿고 사용하는 기존의 기법과 달리, 제안하는 기법에서는 송신단들이 양자화 오차를 고려하여 전략을 찾는다. 시뮬레이션 결과로 제안하는 방법이 협력게임에서 전략의 유효성을 높이고, 협력 이득을 높임을 보였다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Hankuk University of Foreign Studies Research Fund of 2016

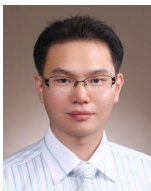
REFERENCES

- [1] R. B. Myerson, *Game Theory: Analysis of Conflict*. Cambridge, MA: Harvard Univ. Press, 1991.
- [2] E. G. Larsson and E. A. Jorswieck, "Competition versus cooperation on the MISO interference channel," *IEEE Journal of Selected Areas on Communications*, vol. 26, no. 7, pp. 1059-1069, Sep. 2008.
- [3] Z. K. M. Ho and D. Gesbert, "Balancing egoism and altruism on interference channel: The MIMO case," in *Proceeding of IEEE International Conference on Communications (ICC 2010)*, May 2010.
- [4] Q. Cao, Y. Jing, and H. V. Zhao, "Power allocation in multi-user wireless relay networks through bargaining," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 2870-2882, June 2013.
- [5] A. Mukherjee and A. L. Swindlehurst, "Jamming games in the MIMO wiretap channel with an active eavesdropper," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 1, pp. 82-91, Jan. 2013.
- [6] J. H. Lee and W. Choi, "Optimal feedback rate sharing strategy in zeroforcing MIMO broadcast channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 3000-3011, June 2013.
- [7] J. H. Lee and W. Choi, "Unified codebook design for vector channel quantization in MIMO broadcast channels," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 63, no. 10, pp. 2509-2519, May 2015.
- [8] E. A. Jorswieck, E. G. Larsson, and D. Danev, "Complete characterization of the Pareto boundary for the MISO interference channel," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 10, pp. 5292-5296, Oct. 2008.



이정훈(Jung Hoon Lee)

2006년 KAIST 전자전공 학사
 2008년 KAIST 공학 석사
 2013년 KAIST 전기및전자공학과 박사
 2013년~2014년 KAIST 박사후연구원
 2014년~2015년 미국 NCSU 박사후연구원
 2015년~2016년 국립제주대학교 전자공학과 조교수
 2016년~ 한국외국어대학교 전자공학과 조교수
 ※관심분야: 간섭 제어, 무선 채널 피드백 등



이진(Jin Lee)

2001년 KAIST 전기및전자공학과 학사
 2003년 KAIST 전기및전자공학과 석사
 2008년 KAIST 전기및전자공학과 박사
 2008년 ~ 2009년 KAIST 박사후 연구원
 2009년 ~ 삼성전자 수석 연구원
 ※관심분야: 유/무선 Connectivity, 무선 통신 MAC/Baseband, Network 등



류종열(Jong Yeol Ryu)

2008년 충남대학교 전기정보통신공학부 학사
2010년 KAIST 전기및전자공학과 석사
2014년 KAIST 전기및전자공학과 박사
2014년 ~2016년 싱가포르 SUTD 박사후 연구원
2016년 ~ 국립경상대학교 정보통신공학과 조교수
※관심분야 : 보안 통신 시스템, 사용자 릴레이 등