

다중 안테나 양방향 릴레이를 위한 프리코딩 기법 및 용량 분석

성윤현* · 이종호*

*공주대학교

Precoding Algorithm and Capacity of Multifl Antennas Full-duplex Relay

Yun-Hyeon Seong* · Jong-ho Lee*

*Kongju National University

e-mail: {uryoni@kongju.ac.kr, jongholee}@kongju.ac.kr

요 약

본 논문에서는 다중 안테나를 갖는 릴레이 (relay)의 양방향 (full-duplex) 동작을 위한 프리코딩 (precoding) 기법을 제안한다. 양방향 릴레이는 기존의 반이중 (half-duplex) 릴레이와 달리 같은 주파수 대역에서 동일한 시간에 송수신을 수행하기 때문에, 릴레이의 송신 안테나로부터 수신 안테나로 유입되는 자기 간섭 (self interference)이 발생한다. 제안한 프리코딩 기법은 이러한 자기 간섭을 블록 대각화 (block diagonalization) 기법을 통해 제거하여 릴레이의 양방향 동작이 가능하도록 한다. 또한, 모의 실험을 통해 양방향 릴레이가 기존의 반이중 릴레이에 비해 향상된 채널 용량을 가짐을 증명한다.

ABSTRACT

In this paper, we suggest a precoding algorithm for full-duplex relay with multiple antennas. Because full-duplex relay performs transmission and reception at the same time in the same frequency band another existing half-duplex relay differently, self interference arise between transmit and receive antennas of relay. The proposed precoding algorithm eliminates self interference by block diagonalization algorithm and makes the relay perform full-duplex operation. Also we verify that full-duplex relay have improved channel capacity than existing half-duplex relay by computer simulation.

키워드

relay, block diagonalization, half-duplex, full-duplex, capacity

1. 서 론

차세대 통신 시스템에서 소수의 기지국으로도 더 넓은 지역에서 더 많은 단말국에 서비스를 제공할 수 있는 기술 중 하나로 릴레이를 이용한 다중홉 (multi-hop) 기술이 주목받고 있다. 릴레이는 기지국의 신호를 대신 수신하여 해당 단말국에 전달함으로써, 기지국으로부터의 신호 세기가 약한 단말국도 기지국과의 원활한 통신이 가능하도록 하는 역할을 수행한다. 지형적 장애물에 의해 기지국의 신호를 받지 못하는 음영

지역에 포함된 단말국에 릴레이를 통한 다중홉 기술을 적용함으로써, 기지국의 서비스 영역과 셀 용량을 동시에 향상시킬 수 있다 [1].

릴레이의 동작은 크게 반이중 방식과 양방향 방식으로 구분될 수 있다. 반이중 방식의 경우 기지국으로부터의 신호를 수신하는 과정과 해당 단말국에 신호를 전달하는 과정이 서로 다른 주파수 또는 시간에 이루어지기 때문에 구현이 매우 용이한 장점이 있다. 하지만, 릴레이의 송수신이 서로 다른 주파수 또는 시간에 이루어지기 때문에 자원 효율성이 감소되는 단점이 있다. 반면, 양방향 방식의 릴레이는 같은 주파수에서 같

은 시간에 기지국 신호의 수신 및 해당 단말로의 송신을 수행하기 때문에, 주파수나 시간의 구분이 필요 없으며 효율성도 극대화할 수 있다. 하지만, 릴레이의 송신 안테나에서 송신된 신호가 릴레이의 수신 안테나로 수신되기 때문에, 이는 기지국으로부터의 신호를 검출함에 있어 자기 간섭으로 작용하게 된다. [2]
 본 논문에서는 다중 안테나 양방향 릴레이의 자기 간섭을 제거하기 위한 블록 대각화 기반의 프리코딩 기법을 제안한다. 또한, 기존의 반이중 릴레이와 제안한 양방향 릴레이의 채널 용량을 분석하고, 모의 실험을 통해 제안한 양방향 릴레이 프리코딩 기법이 기존의 반이중 릴레이에 비해 향상된 채널 용량을 달성함을 증명하였다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같은 다중 안테나 릴레이 시스템을 가정한다. 기지국과 릴레이 및 사용자가 M개의 안테나를 가지고 있으며, 릴레이는 기지국으로부터 신호를 수신하여 사용자에게 decode-and-forward 방식으로 전달한다. 또한, 사용자는 기지국의 영역 밖에 위치해서 기지국으로부터의 신호를 받지 못한다고 가정한다. 이때, 사용자의 M×1 수신 신호 벡터 y_{User} 는 다음과 같다.

$$y_{User} = H_{User}^{RS} s_{RS} + n_{User} \quad (1)$$

위의 수식에서 H_{User}^{RS} 은 릴레이와 사용자 간의 M×M 채널 행렬이며, s_{RS} 은 릴레이의 M×1 송신 신호 벡터, n_{User} 은 AWGN 잡음 벡터이다.

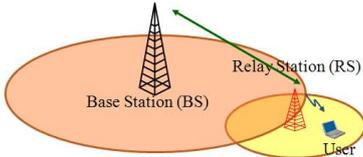


그림 1. 릴레이 시스템 모델

반이중 릴레이의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{RS} = H_{RS}^{BS} s_{BS} + n_{RS} \quad (2)$$

위의 수식에서 H_{RS}^{BS} 은 기지국과 릴레이 간의 M×M 채널 행렬이며, s_{BS} 은 기지국의 M×1 송신 신호 벡터이다. 반면, 양방향 릴레이는 기지국으로부터의 신호를 수신하는 동시에 사용자에게 신호를 전달하므로, 다음과 같이 자기 간섭이 포함된 수신 신호를 받게 된다.

$$y_{RS} = H_{RS}^{BS} s_{BS} + H_{RS}^{RS} s_{RS} + n_{RS} \quad (3)$$

위의 수식에서 H_{RS}^{RS} 는 릴레이의 송수신 안테나 간 M×M 채널 행렬이며, $H_{RS}^{RS} s_{RS}$ 가 양방향 릴레이의 자기 간섭이 된다.

본 논문에서는 기지국과 릴레이의 총 송신 전력을 각각 P_T^{BS} 와 P_T^{RS} 로 가정하고, 또한 기지국과 릴레이, 릴레이와 사용자 및 릴레이의 송수신 안테나 간의 채널 정보를 기지국이 모두 알고 있다고 가정한다.

III. 반이중 릴레이의 채널 용량

수식 (1)에서 기지국과 릴레이 간 채널 용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{BS:RS}^{HD} = \sum_{m=1}^M \log_2(1 + P_m^{BS} \lambda_{BS:RS}^2(m)) \quad (4)$$

위의 수식에서 $\lambda_{BS:RS}(m)$ 은 $H_{BS:RS}^{BS}$ 의 m번째 singular value이며,

$$\sum_{m=1}^M P_m^{BS} = P_T^{BS} \quad (5)$$

의 제한 조건 하에서 용량을 최대화하는 P_m^{BS} 는 water-filling을 통해 계산할 수 있다. 또한, 릴레이와 사용자 간의 채널 용량은 다음과 같다.

$$C_{RS:User}^{HD} = \sum_{m=1}^M \log_2(1 + P_m^{RS} \lambda_{RS:User}^2(m)) \quad (6)$$

위의 수식에서 $\lambda_{RS:User}(m)$ 은 $H_{RS:User}^{RS}$ 의 m번째 singular value이며,

$$\sum_{m=1}^M P_m^{RS} = P_T^{RS} \quad (7)$$

를 만족하는 P_m^{RS} 또한 water-filling으로 얻을 수 있다.

이때, 반이중 릴레이의 송수신이 서로 다른 시간에 이루어지며, 기준 시간 구간의 t 부분 동안은 송신, (1-t) 부분 동안은 수신에 할당한다고 가정한다. 릴레이가 수신한 모든 데이터를 모두 사용자에게 전달한다고 가정하면, 송신과 수신 채널 용량은 동일해야 하므로 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$(1-t)C_{BS:RS}^{HD} = tC_{RS:User}^{HD} \quad (8)$$

위의 수식을 만족하는 t는

$$t = \frac{C_{BS:RS}^{HD}}{C_{BS:RS}^{HD} + C_{RS:User}^{HD}} \quad (9)$$

이며, 반이중 릴레이는 다음과 같은 채널 용량을 갖게 됨을 알 수 있다.

$$C^{HD} = \frac{C_{BS:RS}^{HD} C_{RS:User}^{HD}}{C_{BS:RS}^{HD} + C_{RS:User}^{HD}} \quad (10)$$

IV. 양방향 릴레이를 위한 프리코딩 기법 및 채널 용량

본 장에서는 양방향 릴레이의 자기 간섭을 제거하기 위한 프리코딩 기법을 제안하고, 이를 바탕으로 한 양방향 릴레이의 채널 용량을 분석한다.

4.1 프리코딩

수식 (1)과 (3)로부터 양방향 릴레이와 사용자의 수신 신호를 다음과 같은 행렬로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y_{RS} \\ y_{User} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} s_{BS} \\ s_{RS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{RS} \\ n_{User} \end{bmatrix} \quad (11)$$

위의 수식에서 $2M \times 2M$ 채널 행렬 H 는 다음과 같이 정의된다.

$$H = \begin{bmatrix} H_{RS}^{BS} & H_{RS}^{RS} \\ 0_{M \times M} & H_{User}^{RS} \end{bmatrix} \quad (12)$$

위의 수식에서 $0_{M \times M}$ 은 $M \times M$ 영행렬로 정의한다.

블록 대각화 [3] 기반의 프리코딩 행렬을 유도하기 위해 $H_1 = [H_1^{BS} \ H_1^{RS}]$ 의 SVD (singular value decomposition)를 계산하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_1 = U_1 A_1 [V_1^{(1)} \ V_1^{(0)}]^\dagger \quad (13)$$

위의 수식에서 $2M \times M$ 행렬 $V_1^{(0)}$ 는 H_1 의 영공간 (null space)이며

$$H_1 V_1^{(0)} = 0_{M \times M} \quad (14)$$

을 만족함을 알 수 있다. 여기서, 편의상 $V_1^{(0)}$ 를 다음과 같은 두 개의 $M \times M$ 행렬들로 표현한다.

$$V_1^{(0)} = \begin{bmatrix} V_{1:BS}^{(0)} \\ V_{1:RS}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

위와 같은 방법으로 $H_2 = [0_{M \times M} \ H_{User}^{RS}]$ 를 정의하고 SVD를 통해 $V_2^{(0)}$ 를 얻을 수 있다. 또한, $V_2^{(0)}$ 는 다음과 같은 형태가 됨을 알 수 있다.

$$V_2^{(0)} = \begin{bmatrix} V_{2:BS}^{(0)} \\ 0_{M \times M} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, $2M \times 2M$ 프리코딩 행렬 W 를

$$W = [V_2^{(0)} \ V_1^{(0)}] \quad (17)$$

로, 송신 신호 벡터를

$$\begin{bmatrix} s_{BS} \\ s_{RS} \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \end{bmatrix} \quad (18)$$

로 정의한다. \tilde{x} 는 릴레이가 x 를 수신하여 디코딩한 후 재생성한 신호로 정의하며, 릴레이의 디코딩에 의한 시간 지연을 반영한 것이다. 따라서, 기지국은 x 뿐만 아니라 \tilde{x} 에 대한 정보도 이미 가지고 있다. 수식 (15), (16)와 (17)을 통해

기지국과 릴레이의 송신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} s_{BS} &= V_{1:BS}^{(0)} x + V_{2:BS}^{(0)} \tilde{x} \\ s_{RS} &= V_{1:RS}^{(0)} \tilde{x} \end{aligned} \quad (19)$$

위의 수식에서 릴레이는 \tilde{x} 만을 알고 있으며, 릴레이의 송신 신호는 \tilde{x} 의 프리코딩 형태가 됨을 볼 수 있다.

4.2 채널 용량

수식 (17)을 수식 (10)에 대입하면 다음과 같은 유효 채널을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_{RS} \\ y_{User} \end{bmatrix} &= HW \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{RS} \\ n_{User} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \hat{H}_{RS}^{BS} & 0_{M \times M} \\ 0_{M \times M} & \hat{H}_{User}^{RS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{RS} \\ n_{User} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

위의 수식에서 보는 바와 같이 HW 가 블록 대각화되면서 자기 간섭이 제거됨을 확인할 수 있다. 여기서, 유효 채널 \hat{H}_{RS}^{BS} 와 \hat{H}_{User}^{RS} 를 통해 기지국과 릴레이 간 채널 용량 및 릴레이와 사용자 간 채널 용량을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{BS:RS}^{FD} &= \sum_{m=1}^M \log_2(1 + P_m^{BS} \hat{\lambda}_{BS:RS}^2(m)), \\ C_{RS:User}^{FD} &= \sum_{m=1}^M \log_2(1 + P_m^{RS} \hat{\lambda}_{RS:User}^2(m)) \end{aligned} \quad (21)$$

위의 수식에서 $\hat{\lambda}_{BS:RS}(m)$ 와 $\hat{\lambda}_{RS:User}(m)$ 은 \hat{H}_{RS}^{BS} 와 \hat{H}_{User}^{RS} 의 m 번째 singular value이며, 수식 (5)와 (7)을 만족하는 최적의

P_m^{BS} 와 P_m^{RS} 는 water-filling을 통해 계산할 수 있다. 수식 (21)을 통해 양방향 릴레이의 채널 용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C^{FD} = \min [C_{BS:RS}^{FD}, C_{RS:User}^{FD}] \quad (22)$$

V. 모의 실험

수식 (10)과 (22)에 주어진 반이중 및 양방향 릴레이의 채널 용량을 모의 실험을 통해 비교하였다. MIMO 채널의 각 원소들은 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 따르며, 릴레이와 사용자 간 채널 이득을 기준으로 기지국과 릴레이 간 채널은 G dB, 릴레이의 송수신 안테나 간 채널은 I dB 만큼 크다고 가정한다. 또한, $P_T^{BS} = 10$, $P_T^{RS} = 5$ 를 가정하였다.

그림 2는 $M=2$ 이고 $I=5$ 일 때 기지국과 릴레이 간 채널 이득 G에 대한 채널 용량을 도시한다. 그림에서 보는 바와 같이 G가 커질수록 반이중

릴레이에 대한 양방향 릴레이의 이득이 커짐을 확인할 수 있다.

그림 3은 $M=2$ 이고 $G=15$ 일 때, 릴레이의 송수신 안테나 간 채널 이득 I 에 대한 채널 용량의 변화를 보여준다. 반이중 릴레이의 경우 I 와 무관하게 같은 용량을 가지는 반면, 양방향 릴레이는 I 가 클수록 자기 간섭이 커지기 때문에 채널 용량이 감소함을 확인할 수 있다.

그림 4는 $G=15$, $I=5$ 일 경우 안테나 수 M 에 대한 채널 용량의 변화를 도시한다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 M 에 대해 양방향 릴레이가 반이중 릴레이보다 높은 채널 용량을 가지며, M 이 증가할수록 양방향 릴레이의 이득이 커짐을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 양방향 릴레이의 자기 간섭을 제거하기 위한 블록 대각화 기반의 프리코딩 기법을 제안하였다. 또한, 반이중 릴레이와 양방향 릴레이의 채널 용량을 분석하였으며, 모의 실험을 통해 양방향 릴레이가 반이중 릴레이에 비해 높은 채널 용량을 가짐을 확인하였다.

참고문헌

- [1] B. Wang, J. Zhang, and A. Host-Madsen, "On the capacity of MIMO relay channels, IEEE Trans. Info. Theory, vol. 51, pp. 29-43, Jan., 2005
- [2] D. Bliss, P. Parker, and A. Margetts, "Simultaneous transmission and reception for improved wireless network performance, " in Proc. IEEE Statistical signal processing workshop, Aug. 2007, pp. 478-482
- [3] Q. Spencer, A. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," IEEE Trans. Signal Process., vol. 52, pp. 461-471, Feb. 2004

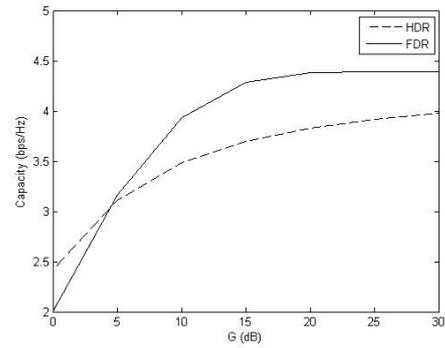


그림 2. G에 대한 채널 용량 비교

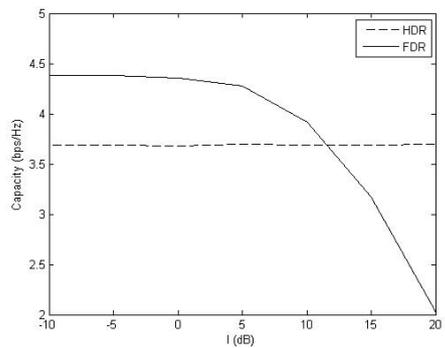


그림 3. I에 대한 채널 용량 비교

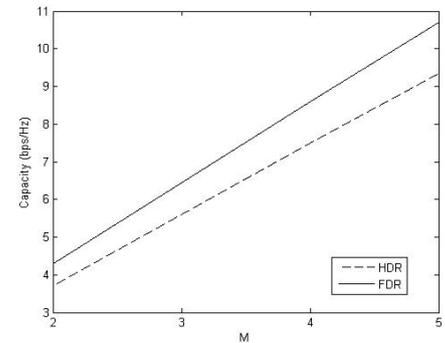


그림 4. M에 대한 채널 용량 비교