

두 홉 릴레이 채널에서 끝 노드 Zero-Forcing 빔포밍 방식의 소스 노드 전력분배

김향란[°]

Source Power Allocation on End-Node Zero-Forcing Beamforming in Two-Hop Relay Channel

Xianglan Jin[°]

요약

소스 노드와 목적 노드 사이에 직접 연결된 채널이 없거나 심층 쇠퇴가 존재하는 경우에 릴레이 노드를 사용함으로써 데이터 전송률의 증가 및 시스템 오류 성능 개선 두 가지 측면의 이득을 본다. 본 논문에서는 소스 노드에서 zero-forcing 빔포밍 기술을 사용하여 여러 개의 릴레이 노드로 서로 다른 신호를 간섭 없이 전송하고, 릴레이 노드들은 각각 특정한 신호만 복호하고 목적 노드로 전달하는 시스템을 고려한다. 이런 다중 릴레이들의 부분 복호 후 전달 시스템에서 소스-릴레이 노드 채널 정보와 릴레이-목적 노드 채널 정보를 이용하여 데이터 전송률을 최대화하는 소스 전력분배 기법을 제안하고 기존에 잘 알려져 있던 소스-릴레이 채널만 고려하는 water-filling 알고리즘보다 높은 전송률을 얻는다는 것을 보여 준다.

Key Words : MIMO, optimization, power allocation, throughput improvement, relay

ABSTRACT

Relay technology greatly improves spectral efficiency and link reliability. In this paper, a multi-relay system with zero-forcing beamforming at source and destination is considered. The relays decode parts of the signals and deliver them to the destination. In this partial decode-forward relay system, I propose an optimal source power allocation algorithm that maximizes overall throughput and compare it with a water-filling algorithm that considers only the source-relay channel. Both analytical and numerical results show the significant improvement.

I. 서론

최근 통신 영역 확대와 스펙트럼 효율의 개선을 위한 릴레이 기반 협력 통신 기술에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 소스 노드와 목적 노드 사이에 직접 연결된 채널이 없거나 큰 쇠퇴가 존재하는 경우에 릴레이 노드를 사용함으로써 데이터 전송률의 증가^[1-3]

및 시스템 오류 성능 개선^[4-10] 두 가지 측면의 이득을 본다. 또한, 간섭을 제거하는 zero-forcing 빔포밍 기술은 다중 사용자 방송 채널에서 송수신 시 많이 사용하고 있다^[11,12]. 릴레이 시스템에서도 위와 같은 zero-forcing 빔포밍 기술을 릴레이 노드의 수신 및 송신 시 사용가능하다^[13-16]. 릴레이 노드에서 zero-forcing 빔포밍을 사용함에 있어서 한 가지 목적

※ 이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(과제번호 : NRF-2017R1D1A1A09000565)

[°] First and Corresponding Author : Pusan National University, Department of Electrical and Computer Engineering, jinxl77@gmail.com, 중신회원

논문번호 : KICS2017-02-040, Received February 14, 2017; Revised April 25, 2017; Accepted May 16, 2017

은 반 이중 (half-duplex) 릴레이 네트워크에서 유저 신호들의 간섭을 없애기 위함이고^[13,14], 다른 한 가지 목적은 전 이중 (full duplex) 릴레이 채널의 자기 간섭을 줄이기 위함이다^[15,16]. 하지만 릴레이 노드에서 zero-forcing 수신 및 송신을 진행하기 위하여 릴레이 노드에서의 다중 안테나의 장착은 불가피해지고 신호 처리 부담이 크게 되며 통신의 지연도 초래할 수 있다. 차세대 통신시스템에서는 전송률과 오류 성능의 개선을 위하여 송수신을 진행하고 있지 않는 모든 노드들의 릴레이 역할 담당이 필요로 하게 되기 때문에 각 릴레이 노드들의 부피를 줄이고 처리 과정을 신속화 하는 것이 중요하다.

본 논문은 릴레이 노드에서 zero-forcing 빔포밍 기술을 사용하는 기존 연구와 달리, 릴레이 노드는 단일 안테나를 사용하고 소스 노드와 목적 노드에서 다중 안테나를 사용하여 zero-forcing 빔포밍 수신 및 송신을 진행한다. 즉 소스 노드에서 zero-forcing 빔포밍 기술을 사용하여 여러 개의 릴레이 노드로 서로 다른 신호를 간섭 없이 전송하고, 릴레이 노드들은 각각 특정한 신호만 복호하고 전달하며, 목적 노드에서는 다시 zero-forcing 빔포밍 수신기를 사용하여 간섭 없이 모든 신호를 받는다. 이런 방식은 릴레이 노드들이 모든 신호를 복호하고 다시 전달하는 복호 후 전달 (decode-forward) 방식과 달리 부분 복호 후 전달 (partial decode-forward) 방식에 속한다. 이 시스템에서 릴레이 노드는 최대한 간략화 되어 있고 소스 노드에서 보내주는 수신 SNR (신호 대 잡음비) 만 알고 있고 소스-릴레이 및 릴레이-목적 노드 사이의 채널 정보를 모른다고 가정한다. 이런 가정 하에서 기존 연구와 달리 릴레이 노드의 전력 분배는 고려하지 않고 소스 노드에서 보내는 신호들의 전력 분배 문제만 고려하게 된다. 쉽게 생각 가능한 분배 방식은 소스-릴레이 링크만을 고려하여 소스-릴레이 링크의 전송률을 최대화하는 전력 분배 방식이다. 그러나 이런 전력 분배 방식은 소스-릴레이 채널 정보만 고려하고 릴레이-목적 채널 정보는 이용하지 않기 때문에, 본 논문이 고려하고 있는 두 홉 채널에서 최적이지 아니다. 본 논문은 이런 두 홉 채널의 총 전송률 수식을 유도하고 이를 최대화하는 최적의 소스 전력 분배 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델을 살펴보고, III장에서는 시스템의 전력분배 알고리즘을 제안한다. IV장에서는 실험 결과를 보여 주고 V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문이 고려하고 있는 시스템은 그림 1과 같이, 소스 노드가 K 개의 단일-안테나 릴레이 노드를 통하여 신호를 목적 노드로 전송하는 채널모델이다.

첫 시간 슬롯에서는 소스 노드가 zero-forcing 빔포밍 기술을 사용하여 K 개의 독립적인 신호 $u = [u_1, \dots, u_K]^T$ 를 K 개의 릴레이 노드로 전송하는데 i 번째 릴레이 노드에서의 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_{R_i} = H_{SR_i} V u + z_{R_i} \quad (1)$$

위 식에서 u 의 성분 u_i 은 평균이 0이고 분산이 1인 복소수 가우시안 분포를 가지고, H_{SR_i} 는 크기가 M ($M \geq K$) 인 행벡터이며 소스 노드와 i 번째 릴레이 노드사이의 채널을 나타내고, z_{R_i} 는 i 번째 릴레이 노드에서의 잡음 값을 나타내는데 이는 평균이 0이고 분산이 1인 복소수 가우시안 분포를 가진다. 소스 노드와 K 개의 릴레이 노드 사이의 채널을

$$H_{SR} = \begin{bmatrix} H_{SR_1} \\ \vdots \\ H_{SR_K} \end{bmatrix} \text{로 표시하면 소스 노드에서의 zero-forcing 빔포밍 행렬은 다음과 같이 나타낸다.}$$

$$V = H_{SR}^H (H_{SR} H_{SR}^H)^{-1} \text{diag}(\sqrt{\rho_1}, \dots, \sqrt{\rho_K}) \quad (2)$$

소스 노드가 총 전력 P 를 이용하여 신호를 전송하기 때문에 ρ_1, \dots, ρ_K 는 다음과 같은 조건을 만족한다.

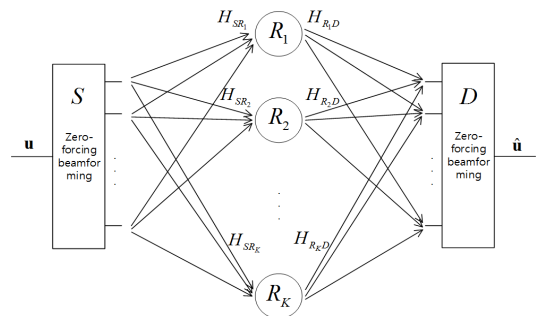


그림 1. 시스템 모델, S: 소스 노드, D: 목적 노드, R_i : i 번째 릴레이 노드
Fig. 1. System model, S: source node, D: destination node, R_i : i th relay node.

$$\begin{aligned}
 & \text{tr}(E[V_u u^H V^H]) \\
 &= \text{tr}(H_{SR}^H (H_{SR} H_{SR}^H)^{-1} \\
 & \quad \cdot \text{diag}(\rho_1, \dots, \rho_K) (H_{SR} H_{SR}^H)^{-1} H_{SR}) \\
 &= \text{tr}((H_{SR} H_{SR}^H)^{-1} \text{diag}(\rho_1, \dots, \rho_K)) \\
 &= \sum_{i=1}^K \rho_i [(H_{SR} H_{SR}^H)^{-1}]_i \leq P
 \end{aligned} \tag{3}$$

(2)번 식을 (1)번 식에 적용하면 K 개의 릴레이 노드에서의 수신 신호는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y_{R_1} \\ \vdots \\ y_{R_K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\rho_1} u_1 + z_{R_1} \\ \vdots \\ \sqrt{\rho_K} u_K + z_{R_K} \end{bmatrix} \tag{4}$$

즉 소스 노드에서 zero-forcing 빔포밍을 진행함으로 각 릴레이 노드는 간섭 없이 원하는 신호만 받게 된다. 또한, (4)번 식에서 z_{R_i} 는 평균이 0이고 분산이 1인 복소수 가우시안 분포를 가지기 때문에 i 번째 릴레이 노드에서의 수신 SNR은 $SNR_{SR_i} = \rho_i$ 이다.

두 번째 시간 슬롯에서는 릴레이 노드들이 수신 신호를 복호 후 다시 전력 P/K 를 사용하여 목적 노드로 전달하게 되는데 i 번째 릴레이 노드는 신호 u_i 를 복호 및 전달한다. i 번째 릴레이 노드와 목적 노드 사이의 채널을 크기가 N ($N \geq K$)인 열벡터 $H_{R_i D}$ 로 표현하며 전체 릴레이 노드와 목적 노드 사이의 채널을 $H_{RD} = [H_{R_1 D}, \dots, H_{R_K D}]$ 라고 한다. 목적 노드에서의 수신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_D = H_{RD} \sqrt{P/K} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_K \end{bmatrix} + Z_D \tag{5}$$

목적 노드에서 zero-forcing 수신기 $W = (H_{RD}^H H_{RD})^{-1} H_{RD}^H$ 를 사용하면 등가 수신 채널은 다음과 같다.

$$\widetilde{Y}_D = \sqrt{P/K} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_K \end{bmatrix} + (H_{RD}^H H_{RD})^{-1} H_{RD}^H Z_D \tag{6}$$

즉 두 번째 시간 슬롯에서는 zero-forcing 수신기를 이용하여 각 신호를 간섭 없이 분리하여 복호 할 수 있다. 목적 노드에서의 각 신호의 수신 SNR은 다음과 같이 표현된다.

$$SNR_{R_i D} = \frac{P/K}{[(H_{RD}^H H_{RD})^{-1}]_i}, \quad i = 1, \dots, K \tag{7}$$

III. 전력 분배 알고리즘

3.1 소스-릴레이 채널 및 릴레이-목적 채널의 Rate Region

소스-릴레이 채널만을 고려하면 i 번째 신호의 rate region은 다음과 같다.

$$R_i \leq \log(1 + \rho_i), \quad i = 1, \dots, K \tag{8}$$

$p_i = \rho_i [(H_{SR} H_{SR}^H)^{-1}]_i$ 라고 가정을 하면 (3)번 식의 전력 조건은 $\sum_{i=1}^K p_i \leq P$ 으로 되고 (8)번 식의 rate region 수식은 다음과 같이 바뀐다.

$$R_i \leq \log\left(1 + \frac{p_i}{[(H_{SR} H_{SR}^H)^{-1}]_i}\right), \quad i = 1, \dots, K \tag{9}$$

이로써, 익숙한 채널 용량의 수식인 전력과 채널정보의 형태로 표현된다. 또한, (7)번 식의 릴레이-목적 노드 채널의 SNR 결과를 이용하면 두 번째 시간 슬롯에서의 해당 릴레이-목적 노드 채널의 rate region은 다음과 같다.

$$R_i \leq \log\left(1 + \frac{P/K}{[(H_{RD}^H H_{RD})^{-1}]_i}\right), \quad i = 1, \dots, K \tag{10}$$

다음 두 절에서는 이런 시스템의 전력 분배 알고리즘들을 살펴보며 그에 상응하는 전송률을 얻는다.

3.2 등가 균일 전력 분배 알고리즘

소스-릴레이 링크의 각 신호 전송률 (9)번 식에서 $p_i = P/K, i = 1, \dots, K$ 라는 제일 간단한 전력분배 방식을 고려한다. 이런 분배 방식을 사용하면 (9)번 식은 zero-forcing 수신기를 사용하는 릴레이-목적 노드 링크의 각 신호 전송률, 즉 (10)번 식과 비슷한 형식을 갖는다. 본 논문에서는 이런 전력 분배 방식을 등가 균일 분배 방식이라고 부른다. 이로써, 각 안테나의 전송 전력을 균일 분배하는 방식과 차별한다.

$$SNR_{i, \text{ev}} = \min\left\{ \frac{P/K}{[(H_{SR} H_{SR}^H)^{-1}]_i}, \frac{P/K}{[(H_{RD}^H H_{RD})^{-1}]_i} \right\}$$

를 가정하면 등가 균일 전력 분배 방식의 총 전송률은

다음과 같다.

$$R_{EU} = \sum_{i=1}^K \log(1 + SNR_{i_{EU}}) \quad (11)$$

즉 (9)번 식에 $p_i = P/K$ 를 넣고 두 홉에 해당하는 각 신호 당 전송률의 최솟값을 취하고 다시 모든 신호의 전송률을 합하면 위의 식을 얻을 수 있다.

3.3 소스-릴레이 채널만 고려하는 water-filling 알고리즘

소스 노드에서 릴레이-목적 노드 채널 정보를 고려하지 않고 소스-릴레이 채널만 고려하게 되면, 기존 싱글 홉 채널의 총 용량을 최대화하는 최적화 문제처럼 표 1과 같이 표현할 수 있다.

표 1의 최적화 전력 분배 문제는 water-filling 알고리즘으로 해결한다. 표 1에서 얻은 전력 분배 결과를 (9)번 식에 대입하고 (10)번의 릴레이-목적 노드 채널의 rate region과 중첩하면, 두 홉 부분 복호 후 전달 릴레이 채널의 rate region은 $i = 1, \dots, K$ 에 관하여 다음과 같다.

$$R_i \leq \log(1 + SNR_{i_{WF}}) \quad (12)$$

위 식에서

$$SNR_{i_{WF}} = \min \left\{ \frac{p_{i_{WF}}}{[(H_{SR} H_{SR}^H)^{-1}]_i}, \frac{P/K}{[(H_{RD}^H H_{RD})^{-1}]_i} \right\}$$

이다. 그래서 두 홉 릴레이 채널의 총 데이터 전송률은 (13)과 같다는 것을 알 수 있다.

$$R_{WF} = \sum_{i=1}^K \log(1 + SNR_{i_{WF}}) \quad (13)$$

표 1에서부터 알 수 있는 바와 같이 소스-릴레이

표 1. 소스-릴레이 채널만 고려하는 전력 분배 알고리즘
Table 1. Power allocation algorithm for the source-relay channel.

$\begin{aligned} &\text{maximize} && R_{SR} \\ &\text{over} && R_{SR} \geq 0, p_{1_{WF}} \geq 0, \dots, p_{K_{WF}} \geq 0 \\ &\text{subject to} && R_{SR} \leq \sum_{i=1}^K \log \left(1 + \frac{p_{i_{WF}}}{[(H_{SR} H_{SR}^H)^{-1}]_i} \right) \\ &&& \sum_{i=1}^K p_{i_{WF}} \leq P \end{aligned}$

채널만을 고려하는 water-filling 전력 분배 방식은 소스-릴레이 노드사이의 채널 용량을 최대화 하지만 전체 두 홉 릴레이 채널의 용량은 최대화 하지는 않는다.

3.4 최적의 전력 분배 알고리즘

전 절에서 알 수 있는 바와 같이, 등가 균일 전력 분배 방식과 소스-릴레이 채널만을 고려하는 water-filling 방식은 최적의 전력 분배 알고리즘이 아님으로써, 이번 절에서는 두 홉 릴레이 시스템의 총 전송률을 최대화하는 최적의 전력 분배 알고리즘을 제안한다.

소스 노드에서 zero-forcing 빔포밍 기법을, 목적 노드에서 zero-forcing 수신기를 사용할 경우의 총 전송률은 (9)번 식과 (10)번 식을 중첩하여 (14)번 식과 같이 얻을 수 있다.

$$R_{OPT} = \max_{p_1, \dots, p_K} \sum_{i=1}^K \log(1 + SNR_i) \quad (14)$$

위 식에서 전력 값들은 $\sum_{i=1}^K p_i \leq P$ 을 만족하고

$$SNR_i = \min \left\{ \frac{p_i}{[(H_{SR} H_{SR}^H)^{-1}]_i}, \frac{P/K}{[(H_{RD}^H H_{RD})^{-1}]_i} \right\}$$

이다. 또한, (14)번 식의 최대 전송률은 표 2와 같은 최적화 문제를 해결함으로써 그 답을 찾을 수 있다.

(14)번 식에서 최적의 전력분포 대신, 각각 등가 균일 분포 $p_i = P/K; i = 1, \dots, K$ 와 표 1의 water-filling 알고리즘을 이용하여 얻은 전력 분포를 대입하면 (11)과 (13)번 식의 전송률들이 얻어진다. 즉 전 절에서 언급한 전송률과 비교하면 다음과 같은 관계를 가진다.

표 2. 끝 노드 Zero-forcing 기법을 이용하는 두 홉 릴레이 채널의 최적의 전력 분배 알고리즘
Table 2. Optimal power allocation algorithm for two-hop relay channel with end-node zero-forcing methods.

$\begin{aligned} &\text{maximize} && R_{OPT} \\ &\text{over} && R_{OPT} \geq 0, p_{1_{OPT}} \geq 0, \dots, p_{K_{OPT}} \geq 0 \\ &\text{subject to} && R_{OPT} \leq \sum_{i=1}^K \log \left(1 + \frac{p_{i_{OPT}}}{[(H_{SR} H_{SR}^H)^{-1}]_i} \right) \\ &&& R_{OPT} \leq \sum_{i=1}^K \log \left(1 + \frac{P/K}{[(H_{RD}^H H_{RD})^{-1}]_i} \right) \\ &&& \sum_{i=1}^K p_{i_{OPT}} \leq P \end{aligned}$

$$R_{OPT} \geq R_{EU} \quad (15)$$

$$R_{OPT} \geq R_{WF} \quad (16)$$

또한 표 2의 R_{OPT} 의 두 번째 한계 값 $\sum_{i=1}^K \log \left(1 + \frac{P/K}{[(H_{RD}^H H_{RD})^{-1}]_i} \right)$ 이 매우 클 경우에 표 2의 최적화 문제는 표 1의 최적화 문제로 간략화 된다는 것을 알 수 있다.

IV. 실험결과

전 장의 (15), (16)번 수식들로부터, 최적의 전력분배 방식은 항상 등가 균일 분포와 소스-릴레이 채널만을 고려하는 water-filling 방식보다 높은 전송률을 얻는다는 것을 알 수 있다.

본 장에서는 표 1과 표 2의 최적화 문제를 구현하고 세 가지 전력 분배 방식의 전송률을 비교한다. 표 1의 water-filling 알고리즘은 많이 알려져 있고, 표 2의 최적화 문제는 전통적인 convex 최적화 기법^[17] 또는 패키지 프로그램 CVX^[18]로 해결할 수 있다. 보다 보편적인 채널 상황을 고려하기 위하여, 복소수 가우시안 분포를 가지는 채널 $H_{SR} \sim CN(0, \sigma_{SR}^2 I)$ 과 $H_{RD} \sim CN(0, \sigma_{RD}^2 I)$ 를 사용하여 평균 전송률을 비교한다. \bar{R}_{EU} 는 등가 균일 전력 분포로 얻을 수 있는 전송률, 즉 (11)번 식의 평균을 나타내고, \bar{R}_{WF} 는 water-filling 알고리즘으로부터 얻을 수 있는 전송률 (13)번 식의 평균, \bar{R}_{OPT} 는 최적의 전력 분배 알고리즘으로부터 얻을 수 있는 전송률 (14)번 식의 평균이라고 가정한다. 그리고 전송률의 평균 향상을 $\Delta_1 = \bar{R}_{OPT} - \bar{R}_{EU}$, $\Delta_2 = \bar{R}_{OPT} - \bar{R}_{WF}$ 로, 전송률의 최대 향상을 $\Delta_{1max} = \max_{H_{SR}, H_{RD}} (R_{OPT} - R_{EU})$, $\Delta_{2max} = \max_{H_{SR}, H_{RD}} (R_{OPT} - R_{WF})$ 이라고 표현하고 정규화한 평균 향상을 $\Delta_{1norm} = \frac{\bar{R}_{OPT} - \bar{R}_{EU}}{\bar{R}_{EU}}$, $\Delta_{2norm} = \frac{\bar{R}_{OPT} - \bar{R}_{WF}}{\bar{R}_{WF}}$ 으로 정한다. 그림 2, 3, 4는 각각 $(\sigma_{SR}^2, \sigma_{RD}^2) = (1, 1)$, $(\sigma_{SR}^2, \sigma_{RD}^2) = (1, 10)$, $(\sigma_{SR}^2, \sigma_{RD}^2) = (10, 1)$ 인 경우에 다양한 SNR, 즉 다양한 전력 P 에서의 최적의 전력 분배 방식의 전송률의

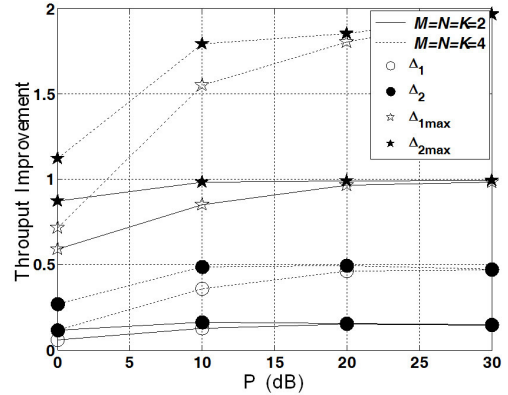


그림 2. 채널 분포가 $(\sigma_{SR}^2, \sigma_{RD}^2) = (1, 1)$ 인 두 홉 릴레이 채널에서 최적의 전력분배 방식의 전송률 향상
Fig. 2. Throughput Improvement for the optimal power allocation in two-hop relay channel with $(\sigma_{SR}^2, \sigma_{RD}^2) = (1, 1)$.

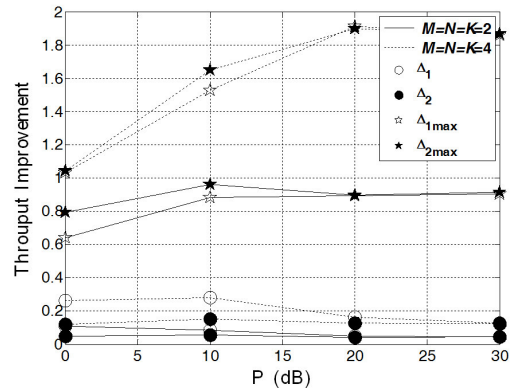


그림 3. 채널 분포가 $(\sigma_{SR}^2, \sigma_{RD}^2) = (1, 10)$ 인 두 홉 릴레이 채널에서 최적의 전력분배 방식의 전송률 향상
Fig. 3. Throughput improvement for the optimal power allocation in two-hop relay channel with $(\sigma_{SR}^2, \sigma_{RD}^2) = (1, 10)$.

향상을 보여 준다. 추가로, 그림 5에서 정규화한 전송률의 평균 향상을 보여 준다. 그림 2-5로부터 다음과 같은 현상을 관찰 할 수 있다.

- 1) 최적의 전력 분배 방식은 등가 균일 전력 분배 방식과 표 1의 소스-릴레이 채널만 고려한 water-filling 전력 분배 기법보다 많은 전송률을 얻을 수 있다는 것을 다시 확인할 수 있다. 최대 전송률 향상은 1.96비트에 달하며 전송률 향상의 최대치는 채널 상황에 따라 더 커질 수 있을 것이라고 예측 가능하다.
- 2) 소스-릴레이 채널만 고려하는 표 1의 water-filling 전력분배 방식은 등가 균일 전력분배방

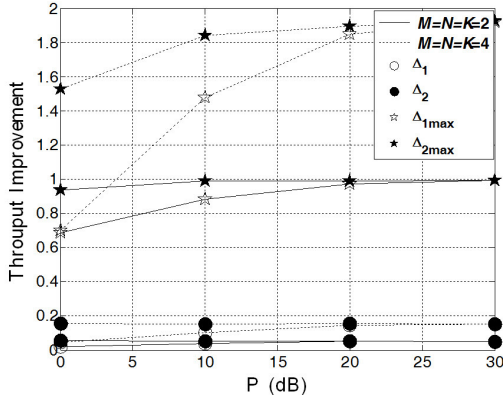


그림 4. 채널 분포가 $(\sigma_{SR}^2, \sigma_{RD}^2) = (10, 1)$ 인 두 홉 릴레이 채널에서 최적의 전력분배 방식의 전송률 향상
 Fig. 4. Throughput improvement for the optimal power allocation in two-hop relay channel with $(\sigma_{SR}^2, \sigma_{RD}^2) = (10, 1)$.

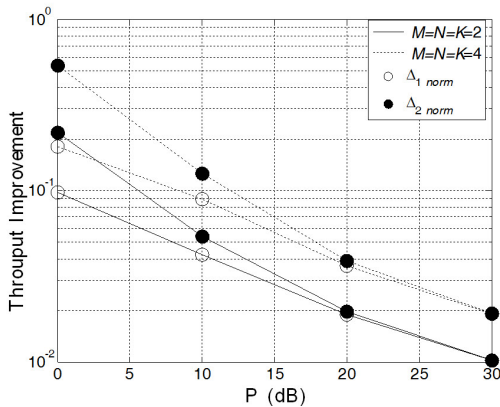


그림 5. 채널 분포가 $(\sigma_{SR}^2, \sigma_{RD}^2) = (1, 1)$ 인 두 홉 릴레이 채널에서 최적의 전력분배 방식의 정규화된 전송률 향상
 Fig. 5. Normalized throughput improvement for the optimal power allocation in two-hop relay channel with $(\sigma_{SR}^2, \sigma_{RD}^2) = (1, 1)$.

식보다 항상 높은 전송률을 얻는 것은 아니다. 소스-릴레이 채널 환경이 릴레이-목적 채널 환경보다 열악한 경우에는 표 1의 소스-릴레이 채널만 고려한 water-filling 전력 분배 방식이 등가 균일 전력분배 방식보다 좋은 성능을 가질 수 있지만, 그 외 경우에는 오히려 제일 간단한 등가 균일 전력분배 방식보다 좋지 않은 성능을 얻는다는 것을 확인할 수 있다.

- $\sigma_{SR}^2 < \sigma_{RD}^2$ 경우의 결과는 소스-릴레이 링크의 전송률이 총 전송률을 결정하기 때문에 소스-릴레이 링크의 전송률을 최대화하는 전력 분배 방식이 등가 균일 방식보다 큰 전송률을 가질 수 있다.

는 것을 알 수 있다.

- $\sigma_{SR}^2 \geq \sigma_{RD}^2$ 경우에는 소스-릴레이 링크보다 릴레이-목적 링크가 보다 큰 영향을 주기 때문에 전체 채널 상황 (소스-릴레이, 릴레이-목적 링크 모두)을 고려하지 않고 일부 채널만 고려하는 전력분배 방식이 큰 의미가 없고 오히려 역영향을 줄 수 있다는 것을 보여 준다.

3) P의 증가에 따라 전송률의 평균적인 향상은 크게 변화하지 않지만 정규화된 평균 향상은 상대적으로 많이 줄어든다. 높은 SNR에서 전력 분배 기법이 전송률에 큰 영향을 발휘하지 않는다는 것을 보여 준다.

V. 토론 및 결론

본 논문에서는 최대한 간략화 되어 있는 릴레이 노드를 통하여 데이터를 전송하는 소스-노드 빔포밍의 전력 분배 기법을 제안하였다. III장에서의 분석 결과와 IV장에서의 실험 결과로부터 표 2의 최적의 전력 분배 알고리즘은 간단한 등가 균일 전력 분포와 소스-릴레이 노드 채널만 고려하는 water-filling 알고리즘보다 항상 크거나 같은 전송률을 얻을 수 있고 그 크기가 일부 채널 환경에서는 더 두드러지게 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한, 등가 균일 전력 분포는 water-filling 알고리즘보다 간단한 동시에 성능이 나쁘지 않으므로, 소스-노드에서 릴레이-목적 채널 정보를 알고 있지 않는 상황에서 사용할 수 있는 괜찮은 전력 분배 방식임을 알 수 있다.

References

- [1] E. C. van der Meulen, "The discrete memoryless channel with two senders and one receiver," in *Proc. 2nd Int. Symp. Inf. Theory*, pp. 103 - 135, Tsahkadsor, Armenian, 1971.
- [2] T. M. Cover and A. A. El Gamal, "Capacity theorems for the relay channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 25, no. 5, pp. 572-584, Sept. 1979.
- [3] X. Jin and Y. H. Kim, "The Approximate Capacity of the MIMO Relay Channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 63, no. 2, pp. 1167-1176, Feb. 2017.
- [4] J. N. Laneman and G. W. Wornell,

- “Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415-2425, Oct. 2003.
- [5] X. Jin, D.-S. Jin, J.-S. No, and D.-J. Shin, “Diversity analysis of MIMO decode-and-forward relay network by using near-ML decoder,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E94-B, no. 10, pp. 2828-2836, Oct. 2011.
- [6] X. Jin, J.-S. No, and D.-J. Shin, “Relay selection for decode-and-forward cooperative network with multiple antennas,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 12, pp. 4068-4079, Dec. 2011.
- [7] X. Jin and H.-N. Kim, “Switched-power two-layer superposition coding in cooperative decode-forward relay systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 3, pp. 2193-2204, Mar. 2016.
- [8] K.-Y. Song, J.-S. No, T. Kim, J. H. Sung, M.-J. Rim, and D.-W. Lim, “Performance of multiple-relay cooperative communication networks under soft-decision-and-forward protocol,” *J. KICS*, vol. 35 no. 5, pp. 431-439, May 2010.
- [9] K.-Y. Song, J. Kim, J.-S. No, and H. Chung, “Power allocation strategy for soft-decision-and-forward cooperative communication system,” *J. KICS*, vol. 35 no. 1, pp. 1-7, Jan, 2010.
- [10] K.-J. Lee, “Two-Way MIMO AF relaying methods having a legacy device without self-interference cancellation,” *J. KICS*, vol. 42, no. 2, pp. 338-344, Feb. 2017.
- [11] G. Dimic and N. D. Sidiropoulos, “On downlink beamforming with greedy user selection: performance analysis and a simple new algorithm,” *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 53, no. 10, pp. 3857-3868, Oct. 2005.
- [12] T. Yoo and A. Goldsmith, “On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 528-541, Mar. 2006.
- [13] Ö. Oyman and A. J. Paulraj, “Power-bandwidth tradeoff in dense multiantenna relay networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 6, pp. 2282-2293, Jun. 2007.
- [14] A. Falahatnia and Y. A. Izi, “Employing power allocation to enhance zero forcing scheme advantages over multi-antenna multiple relay networks,” *Int. J. Commun., Netw. and Syst. Sci.*, pp. 736-742, May 2012.
- [15] H. A. Suraweera, I. Krikididis, G. Zheng, C. Yuen, and P. J. Smith, “Low-complexity end-to-end performance optimization in MIMO full-duplex relay systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 2, pp. 913-927, Feb. 2014.
- [16] D. Hwang and Y. Choi, and T. J. Lee, “Optimization of zero forcing beamformer for the full duplex relay system,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 8, pp. 1583-1586, Aug. 2016.

김향란 (Xianglan Jin)



1999년 7월 : 북경우전대학교

통신공학과 학사 졸업

2002년 4월 : 북경우전대학교

통신공학과 석사 졸업

2008년 8월 : 서울대학교 전기

컴퓨터공학과 박사 졸업

2008년 9월~2010년 2월 : 서울

대학교 전기 컴퓨터공학부 박사 후 연구원

2010년 3월~2014년 2월 : 동국대학교 정보통신공학부 연구교수

2014년 3월~2015년 2월 : 부산대학교 전기컴퓨터공학부 계약교수

2015년 3월~2016년 7월 : University of California, San Diego, 방문학자

2017년 3월~현재 : 부산대학교 전기 컴퓨터공학부 계약교수

<관심분야> 정보이론, 통신공학, 머신러닝