논문 16-41-11-09 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '16-11 Vol.41 No.11
http://dx.doi.org/10.7840/kics.2016.41.11.1402

K-사용자 간섭 채널에서의 다중안테나 릴레이 협력 기반 간섭 상쇄 기술

신 원 재•, 이 정 우°

Interference Neutralization for the K-User Interference Channel Based on MIMO Relay Cooperation

Wonjae Shin•, Jungwoo Lee°

요 약

본 논문에서는 K-사용자 간섭 채널에서 다중 안테나를 보유한 릴레이들의 협력을 통한 간섭 상쇄 기술을 제안한다. 릴레이들의 협력적 빔포밍 행렬 설계를 통해 모든 사용자간 간섭을 상쇄시킴으로서, 각 사용자들이 간섭 없이 동시에 송수신 할 수 있도록 지원한다. 또한 제안하는 다중안테나 릴레이 협력기반 간섭 상쇄 기술 구현을 위해 필요한 릴레이 수의 조건을 구한다. 마지막으로 릴레이 수가 충분치 않았을 경우, 완화된 조건의 간섭 상쇄 기술을 소개한다.

Key Words : Interference Neutralization, K-user Interference Channel, Relay Beamforming

ABSTRACT

In this paper, we develop an interference neutralization (IN) method based on a set of multi-antenna relays for K-user interference channel. The feasibility condition for IN is fully characterized. We further provide a relaxed IN method for the cases in which there are not enough relays to satisfy the feasibility condition.

Ⅰ. 서 론

5세대 이후의 이동통신 시스템에서는 사람 간의 통신 뿐만 아니라 사물 간 통신이 중요하게 자리매김 할 것으로 보인다. 사물 간 통신은 인접한 거리에 배치된 다수의 기기들 간의 통신을 지원하는데 주요 목적이 있으므로, (K-사용자) 간섭 채널로 모델링이 될 수 있다. 간섭 채널에서는 사용자간 간섭이 네트워크 성능 향상을 저해하는 주요 요소임이 밝혀짐에 따라, 지난 30년이 넘도록 네트워크 성능 규명 및 새로운 전송 기법들이 제안되어 왔다.

특히 간섭 채널의 사용자 간섭을 해결하기 위하여, 릴레이를 도입하는 연구들이 최근에 많은 각광을 받고 있다. 특히 다수의 릴레이들을 활용하여, 사용자간 간섭을 완벽히 제거하는 기법인 간섭 상쇄 기술이 제안되었다[1-3]. 주요 동작원리로는 다수의 릴레이를 통해 전달되는 간섭의 다중 경로를 활용하여 각 수신기에서 원하지 않는 간섭 신호의 합이 0이 되도록 릴레이 계수를 정하는 것이다. 하지만 간섭 상쇄 기술을 구현하기 위해서는 단일 안테나를 가진 릴레이가 K의 자승에 비례하게 늘어나야 한다는 점으로 인해 구현의 어려움이 있어왔다.

본 논문에서는 이러한 릴레이 수의 제약 조건을 완화하기 위하여, 다중안테나 릴레이를 활용하는 간섭 상쇄 기술을 소개하고자 한다. 특히 다중안테나 릴레이 협력 기반 간섭 상쇄 기술에 필요로 하는 릴레이 수가 릴레이 안테나 수의 자승에 반비례함을 확인 할 수 있다. 주어진 네트워크 환경에서의 활용 가능한 릴레이 수가 해당 조건을 만족하지 못하였을 경우, 완화된 형태의 다중안테나 릴레이 기반 간섭 상쇄 기술도 추가적으로 고안하였다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서 그림 1과 같은 시스템 모델을 고려하고 있다. 기본적으로 단일 안테나를 가진 $K(\geq 2)$개의 송-수신기 쌍이 동일한 무선 자원을 활용하여 별로의 메시지들을 전송하고자 한다. 송-수신기 중간에 L개의 릴레이가 설치되어 있으며, 각 릴레이는 M개의 안테나를 가지고 있다. 여기서 릴레이는 증폭 후 전달 (AF: amply-and-forward) 하는 기능을 탑재하였다고 가정한다. 또한 송-수신기 사이의 채널 계수의 크기는, 거리에 따른 신호감쇄 등의 이유로 거의 무시 할 만큼 작다고 가정한다.

• First Author : Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, wonjae.shin@snu.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, junglee@snu.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2016-09-268, Received September 22, 2016; Revised October 10, 2016; Accepted October 11, 2016

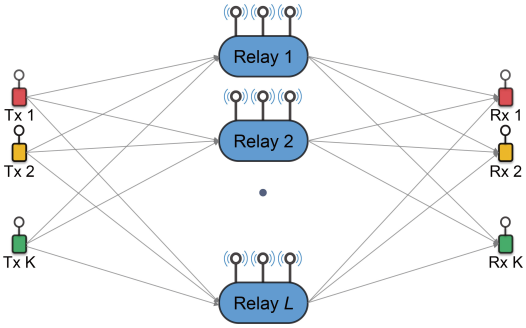

그림 1. 다중 안테나 기반 K-사용자 간섭채널 시스템 모델
Fig. 1. System model of a relay-aided K-user interference channel

여기서, l-번째 릴레이가 받는 $M\times 1$ 수신 신호 벡터 $\boldsymbol{y}_l^{[R]}$를 살펴보면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{y}_l^{[R]} = \sum_{k=1}^{K} \boldsymbol{H}_{l,k} s_k + \boldsymbol{z}_l^{[R]}. \tag{1}$$

여기서 s_k는 k-번째 송신기가 k-번째 수신기에게 전송하고자 하는 신호를 의미한다. 또한 $\boldsymbol{H}_{l,k}$는 k-번째 송신기에서 l-번째 릴레이 사이의 채널을 나타낸다. $\boldsymbol{z}_l^{[R]}$는 l-번째 릴레이의 잡음 성분을 의미한다. 각 채널 및 잡음 계수는 서로 독립이며 동일한 정규분포를 따른다고 가정한다.

각 릴레이는 수신 신호에 빔포밍 행렬 $\boldsymbol{V}_l$을 곱하여 신호를 전달하게 되며, j-번째 수신기가 수신한 신호 y_j는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_j &= \sum_{l=1}^{L} \boldsymbol{F}_{j,l} \boldsymbol{V}_l \boldsymbol{y}_l^{[R]} + z_j \\ &= \sum_{l=1}^{L} \boldsymbol{F}_{j,l} \boldsymbol{V}_k \boldsymbol{H}_{l,j} s_j + \sum_{l=1}^{L} \sum_{\substack{k=1, \\ k\neq j}}^{K} \boldsymbol{F}_{j,l} \boldsymbol{V}_l \boldsymbol{H}_{l,k} s_k + \bar{z}_j \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $\bar{z}_j = \sum_{l=1}^{L} \boldsymbol{F}_{j,l} \boldsymbol{V}_l \boldsymbol{z}_l^{[R]} + z_j$를 의미한다. z_j와 $\boldsymbol{F}_{j,l}$는 각각 j-번째 수신기의 잡음계수를 그리고 l-번째 릴레이에서 j-번째 수신기 사이의 채널을 의미한다.

본 논문에서는 릴레이에서 완벽히 채널 정보를 보유 하였다고 가정한다. 즉, 송신기에서는 채널 정보가 전혀 전송에 이용되지 않는다고 가정한다.

Ⅲ. 다중안테나 간섭 상쇄 기법 소개

본 장에서는 다중안테나 간섭 상쇄 기법을 소개하고, 해당 기법을 위한 충분조건에 대해 알아본다.

3.1 다중안테나 간섭 상쇄 기법

사용자 간섭을 0으로 만들기 위해서 실제 필요한 조건은 다음과 같다.

$$\sum_{l=1}^{L} \sum_{\substack{k=1, \\ k\neq j}}^{K} \boldsymbol{F}_{j,l} \boldsymbol{V}_l \boldsymbol{H}_{l,k} s_k = 0. \tag{3}$$

하지만 해당 조건을 만족 시키는 릴레이 빔포밍 행렬 $\boldsymbol{V}_l$을 구하기 위해서는 모든 릴레이에서 s_k를 다 알고 있어야 한다. 하지만 $M \geq K$인 경우를 제외 하고는 각 릴레이에서 s_k를 알아내기가 현실적으로 어렵다. 따라서 s_k에 관계없이 항상 수식 (3)을 만족하도록 릴레이 빔포밍 행렬을 설계하는 것이 간섭 상쇄 기술이다. 간섭을 상쇄 시키기 위해서는 릴레이를 통해 들어오는 각 간섭 심볼의 다중경로들의 채널 이득의 합이 0이 되는 조건을 만족해야 한다. 해당 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{l=1}^{L} \boldsymbol{F}_{j,l} \boldsymbol{V}_l \boldsymbol{H}_{l,k} = 0, \quad \forall\, j \neq k. \tag{4}$$

여기서 상기 수식 (4)를 Kronecker product의 성질인 $\mathrm{vec}(\boldsymbol{ACB}) = [\boldsymbol{B}^T \otimes \boldsymbol{A}]\mathrm{vec}(\boldsymbol{C})$를 활용하면 다음과 같이 조건식을 변형 할 수 있다[4].

$$\sum_{l=1}^{L} [\boldsymbol{H}_{l,k}^T \otimes \boldsymbol{F}_{j,l}] \mathrm{vec}(\boldsymbol{V}_l) = 0, \quad \forall\, j \neq k. \tag{5}$$

해당 식은 행렬식 형태로 변환이 가능하며, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[\boldsymbol{H}_{1,j}^T \otimes \boldsymbol{F}_{j,1} \cdots \boldsymbol{H}_{L,j}^T \otimes \boldsymbol{F}_{j,L}\right] \bar{v} = 0, \ \forall\, j \neq k. \tag{6}$$

단, $\bar{v} = [\mathrm{vec}(\boldsymbol{V}_1)^T \mathrm{vec}(\boldsymbol{V}_2)^T \cdots \mathrm{vec}(\boldsymbol{V}_L)^T]^T$ 이다. 상기 수식은 모든 j와 k에 대하여 성립해야 하므로, 모든 조건을 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{A}\bar{v} = 0. \tag{7}$$

여기서, 행렬 $\boldsymbol{A}$의 (k,l)번째 $1\times M^2$ 크기의 부분행렬을 $\alpha = \left\lfloor \frac{k-1}{K-1} \right\rfloor + 1$와 $\beta = k - \alpha(K-1)$로 나타내면, $\beta < \alpha$일 경우 $\boldsymbol{A}_{k,l} = \boldsymbol{H}_{l,\alpha}^T \otimes \boldsymbol{F}_{\beta,l}$로 표현될 수 있고 나머지 경우는 $\boldsymbol{A}_{k,l} = \boldsymbol{H}_{l,\alpha}^T \otimes \boldsymbol{F}_{\beta+1,l}$로 표현된다. 따라서, 행렬 $\boldsymbol{A}$ 전체의 크기는 $K(K-1) \times LM^2$ 이고, 모든 채널 행렬의 원소들이 독립적으로 생성됨에 따라, 행렬 A는 $LM^2 - K(K-1) > 0$일 경우 항상 수식 (7)

을 만족하는 자명하지 않은 해 (영 벡터가 아닌 해)가 항상 존재 한다. 시스템 변수 L, K, M이 반드시 정수를 가진다는 제약을 감안하면, 다중안테나 간섭 상쇄 기술을 위한 릴레이 수 L의 충분조건은 다음과 같다.

$$L \geq \left\lceil \frac{K(K-1)+1}{M^2} \right\rceil . \tag{8}$$

상기 조건을 만족한다면 다중안테나 간섭 상쇄 의 해는 다음의 형태를 가지게 된다.

$$\bar{v} = \boldsymbol{N}\boldsymbol{v}. \tag{9}$$

여기서 $\boldsymbol{N}$는 행렬 $\boldsymbol{A}$의 영공간 (null space)의 기저 (basis)를 나타내며, $\boldsymbol{v}$는 기저들을 선형 조합하는 계수들로 이루어진 $(LM^2-K(K-1)-1)^+\times 1$ 벡터이다. 여기서 한 가지 주목 할 점은, $\boldsymbol{v}$는 어떤 임의의 값을 가져도 항상 $\bar{v}$가 간섭 상쇄 조건 (4)를 만족하게 된다는 점이다. 따라서, 상기 (8) 조건을 만족한다면, 단일안테나 간섭 상쇄 기법에서와 같이 다양한 목적 함수 (전송률 합 최대화 등)에 따라 $\boldsymbol{v}$를 추가적으로 최적화가 가능하다[2].

만약 각 릴레이가 K개 (이상의) 안테나를 가지고 있다면, 나머지 릴레이는 다 무시한 채 첫 번째 릴레이의 빔포밍 행렬 $\boldsymbol{V}_1 = \boldsymbol{F}_1^{-1}\boldsymbol{H}_1^{-1}$을 통해 간단하게 간섭 상쇄 조건을 만족함을 알 수 있다. 여기서 $\boldsymbol{F}_1 = [\boldsymbol{F}_{1,1}^T \boldsymbol{F}_{2,1}^T \cdots \boldsymbol{F}_{K,1}^T]^T$와 $\boldsymbol{H}_1 = [\boldsymbol{H}_{1,1} \boldsymbol{H}_{1,2} \cdots \boldsymbol{H}_{1,K}]$을 의미한다. 즉, 각 릴레이가 $M \geq K$ 의 안테나를 가지고 있으면 간섭 상쇄를 위해서 하나의 릴레이 만 필요함을 알 수 있고, 이는 상기 릴레이 수의 충분조건 (8)을 통해서도 쉽게 확인 가능하다.

$$L \geq \left\lceil \frac{K(K-1)+1}{M^2} \right\rceil = 1 - \left\lfloor \frac{K-1}{K^2} \right\rfloor = 1 . \tag{10}$$

3.2 완화된 다중안테나 간섭 상쇄 기법

만약 주어진 릴레이 수가 상기 조건 (8)을 만족시키지 못할 경우, 우리는 다중안테나 간섭 상쇄 기법의 근사 해를 찾아야 한다. 이러한 근사 해를 찾기 위해서는 다음과 같이 모든 사용자 간섭의 2-norm을 최소화 하는 문제를 풀 수 있다.

$$\tilde{v} = \arg_{\|\bar{v}\|=1} \min \|\boldsymbol{A}\bar{v}\|^2 . \tag{11}$$

해당 문제를 풀기 위하여 라그랑지 함수를 정의하면 다음과 같다.

$$L(\bar{v},\lambda) = \bar{v}^H A^H \boldsymbol{A}\bar{v} - \lambda(\bar{v}^H \bar{v} - 1) . \tag{12}$$

여기서, λ는 라그랑지 승수를 의미한다. KKT 조건에 의하여 최적해 $\tilde{v}$는 항상 다음과 같은 조건을 만족하게 된다.

$$\frac{dL(\tilde{v},\lambda)}{d\tilde{v}} = 2\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{A}\tilde{v} - 2\lambda\tilde{v} = 0 . \tag{13}$$

즉, 상기 식은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{A}\tilde{v} = \lambda\tilde{v} . \tag{14}$$

여기서 λ와 $\tilde{v}$는 행렬 $\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{A}$의 고유치 및 고유 벡터에 해당한다. 행렬 $\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{A}$은 에르미트 행렬 (Hermitian matrix) 이므로, 고유치는 항상 실수를 가지게 되고 대소 비교가 가능함에 유의하자. 따라서 상기 조건식 (14)를 활용하여 원래 문제의 최적 해를 찾으면 다음과 같다.

$$\min_{\|\bar{v}\|=1}\|\boldsymbol{A}\bar{v}\|^2 = \tilde{v}^H\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{A}\tilde{v} = \lambda\tilde{v}^H\tilde{v} = \lambda . \tag{15}$$

다시 말하자면, 최적해 $\tilde{v}$는 행렬 $\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{A}$의 가장 작은 고유치 λ에 해당하는 고유 벡터이다.

Ⅳ. 모의실험 및 결과토의

본 장에서는 제안한 다중안테나 간섭 상쇄 기술의 성능을 MATLAB 모의실험을 통해 확인한다. 그림 2는 다양한 사용자 수, 릴레이 수 및 안테나 수에 따른 전송률 합 성능을 비교한 것이다. 수식을 통해 증명하였던 대로, 상기 (8) 조건을 만족하는 경우에서는 사용자간 간섭이 모두 상쇄 되어 전송률 합 성능이 사용자 수에 비례하여 증가하고, 그렇지 않은 경우에서는 완화된 간섭상쇄 기법을 적용함에 따라 일부 간섭을 허용하여 그에 따른 성능 열화를 확인 가능하다.

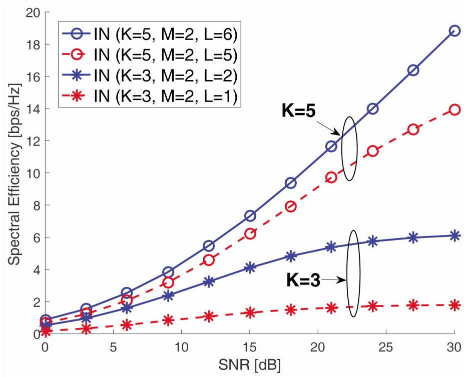

그림 2. 사용자 수 및 릴레이 수에 따른 전송률 합 비교
Fig. 2. Sum-rate comparison for different numbers of relays and antennas at each relay.

V. 결 론

본 논문에서는 K 사용자 간섭채널에서 다중 안테나 기반 릴레이들을 통해 간섭 상쇄 기법을 소개하였다. 알고리즘 구현을 위해 필요한 릴레이 안테나 및 릴레이 수 조건을 구하였고, 이러한 조건을 만족하지 못하였을 경우 활용 가능한 완화된 간섭 상쇄 기법도 소개하였다. 본 연구 결과는 향후 인프라 기반 사물간 통신(IoT) 기법으로 활용될 것으로 기대된다.

References

[1] B. Rankov, et al., "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 379-389, Feb. 2007.

[2] C. Esli, et al., "Optimizing zero-forcing based gain allocation for wireless multiuser networks," in *Proc. IEEE ICC,* Glasgow, Scotland, Jun. 2007.

[3] S.-W. Jeon, et al., "Interference neutralization for small-cell wireless networks," *J. KICS*, vol. 38, no. 12, pp. 1117-1124, Dec. 2013.

[4] G. H. Golub, et al., *Matrix computations*, 3rd Ed., The Johns Hopkins University Press, 1996.