

3-사용자 X 채널에서 다중안테나를 이용한 완전 간섭정렬기법

*박성호 **고영채

고려대학교

*walli@korea.ac.kr **koyc@korea.ac.kr

Interference Alignment based on 3-user X Channel with Multiple Antennas

*Park, Seong-Ho **Ko, Young-Chai

Korea University

요약

본 논문은 3-사용자 X 채널 상황에서 다중안테나를 이용하여 간섭을 완벽하게 제어하는 기법에 대해 제안한다. 기존에 제안된 방식이 빔포밍(beamforming) 벡터를 다수의 채널을 사용하여 만드는데 따른 비현실적인 문제와 간섭을 완벽하게 제어하기 위한 무한한 채널 사용의 필요성에 따른 문제점을 본 논문에서는 다중안테나를 이용하여 공간적 특성을 이용한 빔포밍 벡터를 형성하고 채널의 확장 없이 간섭을 완벽히 제어하도록 하는 시스템을 제안한다. 제안한 시스템은 9개의 DOF(Degrees of freedom)을 얻을 수 있음을 모의실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

1. 서론

수십년간 무선 통신의 capacity 특성을 파악하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 그럼에도 불구하고 간섭 채널이나 X 채널에서와 같이 많은 무선 네트워크에서의 정확한 capacity 특성은 여전히 알려져 있지 않다. 그에 대한 대안으로, 다중 이득이라고도 알려져 있는 DOF(degrees of freedom)에 대한 연구가 진행되어 왔다.[1],[2] 또한, 이러한 DOF의 구현 가능성을 증명하고자, 간섭정렬기법이 도입되었다. 이것은 수신단에서 받는 신호들이 이루는 전체 공간을 크게 2개의 공간으로 나누어 하나의 공간에는 원하는 신호들이 있게 하고, 간섭신호들은 남은 공간에 모두 정렬되도록 하는 기법이다.

[1]에서는 X 채널의 DOF를 유도하고, 이를 증명하는데 적합한 간섭정렬기법을 제시하고 있다. 그러나 제안된 간섭정렬기법이 단지 DOF 관점에서만 고려되었기 때문에 각 노드의 안테나를 한 개로 하여 빔포밍 벡터를 다수의 채널을 사용하여 만들게 된다. 또한, 간섭정렬을 완벽히 하기 위해서는 매우 많은 채널 확장을 필요로 한다. 그렇기 때문에, 송신단에서 이뤄지는 간섭정렬기법은 실현 가능성이 없다.

본 논문에서는 3-사용자 X 채널 상황에서 송신단과 수신단에 안테나를 추가적으로 사용함으로써, 채널 확장 없이 [1]에 제시된 DOF 영역에 매우 근접한 9 DOF의 결과를 보이는 간섭정렬기법을 제안하고자 한다. 이는 또한 간섭채널과 동일한 DOF 결과이기도 하다.[2]

2. 시스템 모델

본 논문에서는 3-사용자 다중안테나 X 채널 시스템을 기반으로 수신단에서는 종래의 간섭 제거(ZF) 방식을 고려한다. 3-사용자 다중안테나 X 채널은 3개의 각 송신단이 3개의 각 수신단에 독립적인 정보를 보내게 되어 이 네트워크 안에는 단위 시간 당 총 9개의 정보가 존재하는 시스템 환경이다. 또한, 채널 확장 없이 공간적 DOF만을 고려한다. 그러므로 총 9개의 DOF를 얻기 위해서는 각 수신단에서는 3개의 DOF를 가져야 하고, 전체 수신 신호 공간의 절반에 원하는 신호

들이 놓이도록 설계하기 위해 모든 노드의 안테나 개수는 6개가 되도록 한다. 이 네트워크에서 단위 시간당 발생하는 모든 채널은 독립적이고 동일한 분포를 가지는 Rayleigh 채널을 가정한다. 그러면 송신단 j 로부터 수신단 i 로의 $M \times M$ 완전 계수 행렬은 \mathbf{H}_{ij} 로서 표기될 수 있다. 또한, 송신단 j 에서의 송신신호벡터 \mathbf{x}_j 는 송신단 j 로부터 수신단 i 로 정보를 보내는 빔포밍 벡터 \mathbf{v}_{ij} 들의 선형 조합이 된다. 그러면 수신단 i 에서의 수신신호벡터 \mathbf{y}_i 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\mathbf{y}_i = \sum_{j=1}^3 \mathbf{H}_{ij} \mathbf{v}_{ij} s_{ij} + \sum_{j=1}^3 \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^3 \mathbf{H}_{ij} \mathbf{v}_{kj} s_{kj} + \mathbf{n}_i. \quad (1)$$

여기서 첫째 항은 3개의 송신단으로부터 온 원하는 신호들을 나타내고, 둘째 항은 다른 수신단에서 원하는 간섭 신호를 나타낸다. \mathbf{n}_i 는 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 복소 Gaussian 분포를 가지는 $M \times 1$ 잡음 벡터이다.

수신단에서 원하는 신호만을 구별하기 위해 수신신호벡터 \mathbf{y}_i 는 간섭 제거 복호 행렬 \mathbf{U}_i 를 거쳐 다음과 같은 출력 신호를 나타낸다.

$$\tilde{\mathbf{y}}_i = \mathbf{U}_i^H \sum_{j=1}^3 \mathbf{H}_{ij} \mathbf{v}_{ij} s_{ij} + \mathbf{U}_i^H \sum_{j=1}^3 \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^3 \mathbf{H}_{ij} \mathbf{v}_{kj} s_{kj} + \mathbf{U}_i^H \mathbf{n}_i. \quad (2)$$

3. 제안하는 간섭 정렬 기법

제안한 간섭제거방식이 9 DOF를 갖기 위해서 다음과 같은 3가지 전제 조건을 기술한다.

전제조건 1: 동일한 송신단으로부터 온 2개의 간섭 신호는 서로 다른 구별된 빔 방향성을 가지면서 같은 채널을 거치기 때문에 수신단에서 같은 방향으로 정렬될 수 없다. j 번째 송신단과 i 번째 수신단에 대해 이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{H}_{ij} \mathbf{v}_{kj} \neq \mathbf{H}_{ij} \mathbf{v}_{lj}, \quad i \neq k \neq l. \quad (3)$$

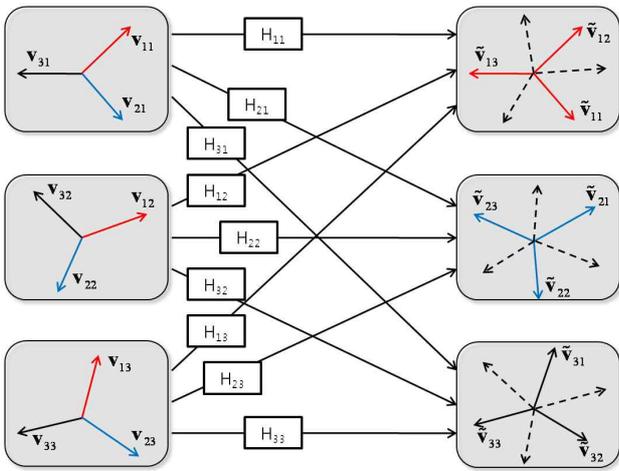


그림 1. 제안하는 3-사용자 X 채널에서의 완전 간섭정렬기법

전제조건 2: 수신신호에는 6개의 간섭신호가 있기 때문에 이러한 간섭신호벡터들은 3차원 공간에만 정렬되어야 한다. 그러므로 우리는 2개의 간섭신호들이 3차원 공간을 이루는 각기 다른 하나의 벡터에 정렬되도록 설정한다. 이것은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$span(\mathbf{H}_{im} \mathbf{v}_{km}) = span(\mathbf{H}_{in} \mathbf{v}_{ln}), \quad k, l \neq i. \quad (4)$$

전제조건 3: 위의 전제조건 2로부터 단지 i 만 다른 서로 다른 2개의 식(4)가 존재해서는 안된다. 이것의 의미는 식(4)에서와 같이 수신단 i 에서 빔포밍 벡터 \mathbf{v}_{km} 과 \mathbf{v}_{ln} 과 결정되어 질 수 있는데, 모든 채널이 독립임을 가정하였으므로, 그러한 2개의 벡터는 다른 수신단에서는 다른 채널을 거치게 되므로 그 외 다른 어떠한 수신단에서도 정렬될 수 없다는 것이다.

이제 위의 3가지 전제조건을 바탕으로 기존에 나와 있던 간섭 정렬 방식을 제안하는 시스템에 적용할 수 있다.[1],[2] 그림 1에서와 같이 각기 다른 색을 가진 벡터들은 각각 수신단 1, 2, 3에서 원하는 신호 벡터들이다. 그러므로 각 수신단에서는 3개의 원하는 신호와 6개의 간섭신호가 존재한다. 그리고 이러한 간섭신호들은 3개의 벡터에 정렬되어야 한다. 이것을 만족시키는 간섭정렬방식은 아래 표 1에 기술되어 있다.

표 1. 3-사용자 다중안테나 X 채널을 위한 완전간섭정렬기법

	간섭정렬조건
수신단1	$span(\mathbf{H}_{11} \mathbf{v}_{21}) = span(\mathbf{H}_{12} \mathbf{v}_{22})$ $span(\mathbf{H}_{11} \mathbf{v}_{31}) = span(\mathbf{H}_{13} \mathbf{v}_{33})$ $span(\mathbf{H}_{12} \mathbf{v}_{32}) = span(\mathbf{H}_{13} \mathbf{v}_{23})$
수신단2	$span(\mathbf{H}_{21} \mathbf{v}_{11}) = span(\mathbf{H}_{22} \mathbf{v}_{12})$ $span(\mathbf{H}_{21} \mathbf{v}_{31}) = span(\mathbf{H}_{23} \mathbf{v}_{13})$ $span(\mathbf{H}_{22} \mathbf{v}_{32}) = span(\mathbf{H}_{23} \mathbf{v}_{33})$
수신단3	$span(\mathbf{H}_{31} \mathbf{v}_{11}) = span(\mathbf{H}_{33} \mathbf{v}_{23})$ $span(\mathbf{H}_{31} \mathbf{v}_{21}) = span(\mathbf{H}_{32} \mathbf{v}_{12})$ $span(\mathbf{H}_{32} \mathbf{v}_{22}) = span(\mathbf{H}_{33} \mathbf{v}_{13})$

표 1에 기술되어 있는 간섭정렬 방식은 빔포밍 벡터를 디자인하기 위해 다음과 같은 동일한 표현의 식으로 나타낼 수 있다.

$$span(\mathbf{v}_{11}) = span(\mathbf{E} \mathbf{v}_{11})$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v}_{12} &= (\mathbf{H}_{22})^{-1} \mathbf{H}_{21} \mathbf{v}_{11} & \mathbf{v}_{13} &= (\mathbf{H}_{33})^{-1} \mathbf{H}_{32} \mathbf{v}_{22} \\
 \mathbf{v}_{21} &= (\mathbf{H}_{31})^{-1} \mathbf{H}_{32} \mathbf{v}_{12} & \mathbf{v}_{22} &= (\mathbf{H}_{12})^{-1} \mathbf{H}_{11} \mathbf{v}_{21} \\
 \mathbf{v}_{23} &= (\mathbf{H}_{13})^{-1} \mathbf{H}_{12} \mathbf{v}_{32} & \mathbf{v}_{31} &= (\mathbf{H}_{21})^{-1} \mathbf{H}_{23} \mathbf{v}_{13} \\
 \mathbf{v}_{32} &= (\mathbf{H}_{22})^{-1} \mathbf{H}_{23} \mathbf{v}_{33} & \mathbf{v}_{33} &= (\mathbf{H}_{13})^{-1} \mathbf{H}_{11} \mathbf{v}_{31}
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{E} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E} &= (\mathbf{H}_{31})^{-1} \mathbf{H}_{33} (\mathbf{H}_{13})^{-1} \mathbf{H}_{12} (\mathbf{H}_{22})^{-1} \mathbf{H}_{23} (\mathbf{H}_{13})^{-1} \mathbf{H}_{11} \\
 &\times (\mathbf{H}_{21})^{-1} \mathbf{H}_{23} (\mathbf{H}_{33})^{-1} \mathbf{H}_{32} (\mathbf{H}_{12})^{-1} \mathbf{H}_{11} (\mathbf{H}_{31})^{-1} \mathbf{H}_{32} \\
 &\times (\mathbf{H}_{22})^{-1} \mathbf{H}_{21}
 \end{aligned}$$

그리고나서, 우리는 행렬 \mathbf{E} 의 M 개의 eigenvector 중에 임의의 하나를 \mathbf{v}_{11} 으로 설정할 수 있다. 이것으로 그 외의 다른 빔포밍 벡터 \mathbf{v}_{ij} 도 식(5)으로부터 얻을 수 있다.

4. 모의실험결과 및 결론

제안된 시스템의 총 전송률과 DOF를 이론적인 DOF 영역의 최저 경계값과 최고 경계값과 함께 비교하여 나타내고 있다. 이 때, 각 송신단은 동일한 전송 전력을 가지고, 잡음 전력은 단위값을 가짐을 가정하였다. DOF는 그 정의에서 알 수 있듯이, SNR에 따른 총 전송률의 곡선의 기울기로 나타내어 질 수 있다. 제안된 시스템은 그림 2에서 알 수 있듯이, SNR이 커짐에 따라 제안된 시스템의 DOF 값 9를 만족시킴을 확인할 수 있다. 또한, 제안된 시스템의 DOF는 이론적인 DOF의 최저 경계값 9.2571에 매우 근접한 결과값을 보임을 확인할 수 있다.

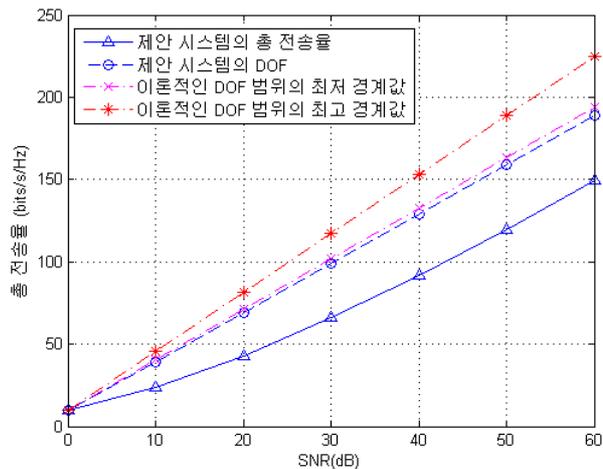


그림 2. 제안한 시스템에서의 총 전송률과 DOF, 이론적 DOF 범위의 최저 경계값 및 최고 경계값과의 비교

감사의 글

"본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음" (NIPA-2010-(C1090-1011-0011))

참고 문헌

[1] V. Cadambe and S. Jafar, "Interference alignment and the degrees of freedom of wireless X networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 9, pp. 3893 - 3908, Sep. 2009.

[2] V. Cadambe and S. Jafar, "Interference alignment and degrees of freedom of the K-user interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3425 - 3441, Aug. 2008.