

# 릴레이에 기반한 항 재밍 간섭 정렬

김호연, 고영우, 노종선, 김강산\*, 송홍엽\*, 안재하\*\*

서울대학교, 연세대학교\*, 국방과학연구소\*\*

ferui@ccl.snu.ac.kr, kyw1623@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr, gs.kim@yonsei.ac.kr\*, hysong@yonsei.ac.kr\*,  
anjaha@add.re.kr\*\*

## Anti-Jamming Interference Alignment Based on Relay

Ho-Youn Kim, Yeong-Woo Ko, Jong-Seon No, Gang-San Kim\*, Hong-Yeop Song\*, Jae-Ha Ahn\*\*

Seoul National University, Yonsei University\*, Agency for Defense Development\*\*

### 요약

본 논문에서는 재밍 공격이 존재하는 브로드캐스트 채널을 가정한다. 주어진 환경에서 항 재밍성을 위한 기법을 구성하는데 있어 릴레이를 활용할 수 있음을 보이고, 항 재밍을 달성하기 위하여 시스템 내에 설치된 릴레이의 안테나 개수 요구량을 보인다. 최종적으로, 본 기법을 통해 시스템 내에서 항 재밍성을 획득함을 보이고 이 때, 재밍 영향 없이 보낼 수 있는 전송 자유도를 도示한다.

### I. 서론

전술 통신 및 여러 통신 환경에서 재밍 공격에 대응하는 것은 중요한 이슈이다. 기존의 항 재밍성은 채널 부호화 기법에 기반하는 경우가 많았으나, 최근 간섭 정렬을 활용하는 항 재밍 기법이 제안되었다.

이는 재밍 신호 역시 강한 세기의 간섭의 일환으로 보는 관점에서 대두되었으며, 특히 간섭의 세기에 관계없이 간섭을 처리할 수 있는 간섭 정렬 기법이 항 재밍 기법의 새로운 후보로 떠오르게 되었다.

본 논문에서는 기존에 알려진, 릴레이를 활용하는 간섭 정렬을 항 재밍이 있는 환경에 적용하여 항 재밍력을 가지는 릴레이 빔포머 설계 및 항 재밍 전송 자유도를 제시한다.

### II. 본론

#### II.1 시스템 모델

본 절에서는 그림 1 과 같이 반 이중 릴레이가 존재하는 SISO 브로드캐스트 채널을 가정한다. 이 때, 단일 안테나 재머가 재밍 신호를 전송한다. 이 때, 재머가 전송하는 재밍 신호는 최소한 간섭 정렬이 달성되는 시간 구간 동안은 같은 형태의 신호를 전송한다고 가정한다. 수신기는 2 개가 있으며, 각 수신기의 안테나 개수는 한 개이다. 송신기 및 재머의 안테나 개수 역시 1 개이다. 릴레이의 안테나 개수는  $N_R$  개이다. 전개에 있어 수신기 및 릴레이에서 발생하는 잡음은 무시한다.

첫 번째 타임 슬롯의 수신기  $i(=1,2)$  및 릴레이의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{i,1} = \mathbf{h}_{i,S}x_S + \mathbf{h}_{i,J}x_J$$

$$y_{relay} = \mathbf{h}_{R,S}x_S + \mathbf{h}_{R,J}x_J$$

$\mathbf{h}_{i,S}$  및  $\mathbf{h}_{i,J}$ 는 송신기(재머)에서 수신기  $i$ 로의 채널 값,  $\mathbf{h}_{R,S} \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$  및  $\mathbf{h}_{R,J} \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ 는 송신기(재머)에서 릴레이로의 채널 벡터,  $x_S, x_J$ 는 각각 송신기 및 재머에서 전송되는 신호이다. 모든 채널 값 및 채널 행렬의 원소들은 Rayleigh 분포로부터 i.i.d. 하게 생성됨을 가정한다.

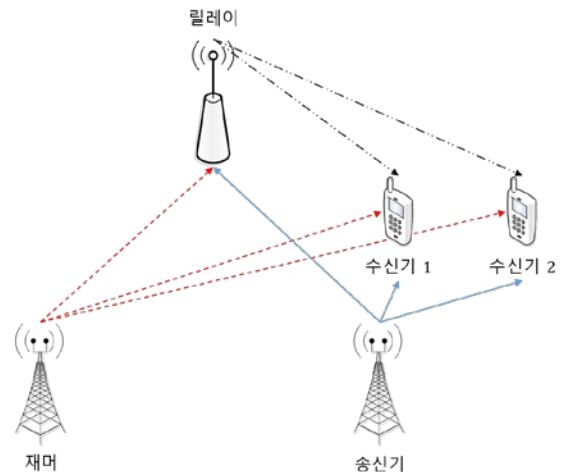


그림 1: 반 이중 릴레이가 존재하는 SISO 브로드캐스트 채널

두 번째 타임 슬롯의 수신기  $i(=1,2)$ 의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{i,2} = \mathbf{h}_{i,R}x_R + \mathbf{h}_{i,J}x_J$$

이 때,  $x_R$ 은 아래와 같이 정의된다.

$$x_R = \mathbf{T}y_{relay} = \mathbf{T}(\mathbf{h}_{R,S}x_S + \mathbf{h}_{R,J}x_J)$$

이 때,  $\mathbf{T} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_R}$ 는 항 재밍을 위하여 릴레이에서의 설계되는 빔포머 행렬이다.

## II.2 항 재밍 요구사항 및 릴레이 빔포머 설계

수신기  $i$  에서 첫 번째 타임 슬롯과 두 번째 타임 슬롯에 수신된 신호를 모두 더하면, 아래와 같다.

$$\begin{aligned} y_{i,1} + y_{i,2} &= \mathbf{h}_{i,S}x_S + \mathbf{h}_{i,R}x_R + 2\mathbf{h}_{i,J}x_J \\ &= \mathbf{h}_{i,S}x_S + \mathbf{h}_{i,R}\mathbf{T}(\mathbf{h}_{R,S}x_S + \mathbf{h}_{R,J}x_J) + 2\mathbf{h}_{i,J}x_J \\ &= (\mathbf{h}_{i,S} + \mathbf{h}_{i,R}\mathbf{T}\mathbf{h}_{R,S})x_S + (2\mathbf{h}_{i,J} \\ &\quad + \mathbf{h}_{i,R}\mathbf{T}\mathbf{h}_{R,J})x_J \end{aligned}$$

따라서, 항 재밍을 달성하는  $\mathbf{T}$ 는 모든  $i$ 에 대해서 아래와 같은 간섭 정렬 조건을 만족해야 한다.

$$2\mathbf{h}_{i,J} + \mathbf{h}_{i,R}\mathbf{T}\mathbf{h}_{R,J} = 0$$

이를 다시 정리하면, 아래와 같다.

$$\mathbf{h}_{i,R}\mathbf{T}\mathbf{h}_{R,J} = -2\mathbf{h}_{i,J}, \forall i$$

위의 식은 벡터화 함수  $\text{vec}(\cdot)$ 가 만족하는 성질  $\text{vec}(\mathbf{ABC}) = (\mathbf{C}^T \otimes \mathbf{A})\text{vec}(\mathbf{B})$ 에 의해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{h}_{R,J})^T \otimes \mathbf{h}_{1,R} \\ (\mathbf{h}_{R,J})^T \otimes \mathbf{h}_{2,R} \end{bmatrix} \text{vec}(\mathbf{T}) = \mathbf{A} \times \text{vec}(\mathbf{T}) = -2 \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{1,J} \\ \mathbf{h}_{2,J} \end{bmatrix}$$

위의 식에서, 해  $\text{vec}(\mathbf{T})$ 가 존재할 조건은  $\mathbf{A}$ 가 행에서 최대 차수를 가지는 것이다. 이는  $\mathbf{A}^T$ 가 열에서 최대 차수를 가지는 것과 동치이다.  $\mathbf{A}^T$ 는 크로네커 곱의 성질에 의해 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{A}^T = [\mathbf{h}_{R,J} \otimes (\mathbf{h}_{1,R})^T \quad \mathbf{h}_{R,J} \otimes (\mathbf{h}_{2,R})^T]$$

$\mathbf{A}^T$ 는 [1]에 정의된 Khatri-Rao 행렬곱의 형태이고, [1]에 의해 만약  $N_R \geq 2$ 가 만족된다면,  $\mathbf{A}^T$ 는 열에서 최대 차수를 가지는 것이 보장된다.

최종적으로, 릴레이 빔포머 행렬은 아래와 같이 구해진다.

$$\text{vec}(\mathbf{T}) = -2\mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{1,J} \\ \mathbf{h}_{2,J} \end{bmatrix}$$

이 때,  $\mathbf{A}^{-1}$ 은  $\mathbf{A}$ 의 역행렬 및 의사역행렬을 통칭한다. 위 식을 통하여  $\text{vec}(\mathbf{T})$ 를 구하고 나면, 다시 열을 길이  $N_R$ 만큼 나누어 순서대로 행렬 형태로 재배치함으로써  $N_R \times N_R$ 행렬인  $\mathbf{T}$ 를 생성할 수 있다.

위의  $\mathbf{T}$ 가 언급한 방법을 통해 생성되면, 릴레이를 통하여 항 재밍을 달성할 수 있다. 이 때, 송신기는 주파수 직교 기법을 통하여, 수신기 1 및 2에게 신호를 전송한다. 이는 SISO 브로드캐스트 채널에서 전송 자유도 측면에서 최적이다. 각 수신기는 재밍 공격 상황에서 각각 0.5의 전송 자유도를 보장받을 수 있고, 이는 주어진 SISO 브로드캐스트 채널에서 최대 획득할 수 있는 전송 자유도이다.

## II.3 모의 실험 결과

본 절에서는 그림 1에서 도시한 네트워크에서 제시한 기법을 통하여 항 재밍성이 달성됨을 모의실험 결과를 통해 보인다.

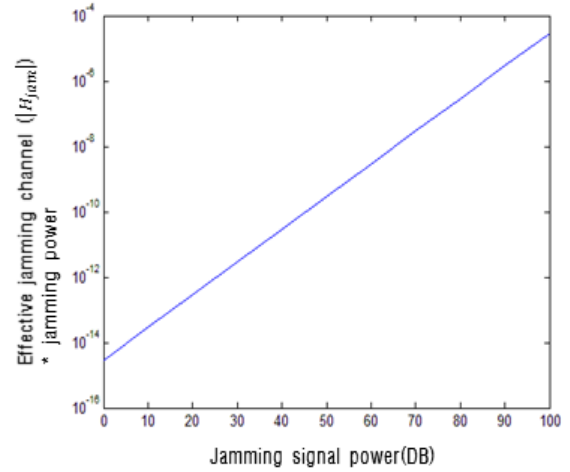


그림 2: 모의 실험 결과

그림 2에서는 재머의 송신 전력과 실제 수신기에서 수신되는 재밍 신호의 세기를 도시하였다. 이를 통해, 재밍 공격의 영향이 수신기에서 충분히 무력화됨을 확인할 수 있다.

## II.4 후속 연구 사항

본 논문이 가정하는 네트워크 모델은 단순한 SISO 브로드캐스트 채널이다. 브로드캐스트 채널을 MIMO 환경으로 확장한다면, 앞서 언급한 대로 항 재밍성을 달성하였다더라도, 송신기가 단순 주파수 직교 기법을 통하여 전송을 시도한다면, 주파수 활용 측면에서 낭비가 발생하게 되고, 필연적으로 송신기에서의 간섭 정렬과의 연계가 요구될 것으로 예상된다.

재밍 공격이 존재하는 통신 환경의 경우 군 통신 등을 예시로 들 수 있으나, 이는 정보이론적 관점에서 반드시 브로드캐스트 채널로만 모델링 되는 것은 아니다. 멀티캐스트 환경도 고려대상이 될 수 있고, 이 때는 릴레이 빔포머 설계 조건에 변화가 있을 것으로 예상된다.

## III. 결론

본 논문에서는 재밍 공격이 존재하는 SISO 브로드캐스트 통신 환경에서 간섭 정렬에 기반한 릴레이 빔포머를 설계하고 안테나 요구 조건을 통하여 항 재밍을 달성할 수 있음을 보였다. 최종적으로, 제안한 기법은 주파수 직교 기법과 연계하여 SISO 브로드캐스트 환경에서는 최대 전송 자유도를 재밍 공격 상황에서도 획득할 수 있다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

[1] L. D. Lathauwer, "Decompositions of a high-order tensor in block terms- Part I: Lemmas for partitioned matrices," SIAM. J. Matrix Anal. Appl., vol. 30, pp. 1022-1032 Sep. 2008.