

# 심볼 레벨 재밍의 영향 저감을 위한 적응형 수신 빔포밍 기반 항재밍 기술

송용진, 이영석, 정방철  
충남대학교 전자공학과

e-mail : [yjsong@o.cnu.ac.kr](mailto:yjsong@o.cnu.ac.kr), [yslee@o.cnu.ac.kr](mailto:yslee@o.cnu.ac.kr), [bcjung@cnu.ac.kr](mailto:bcjung@cnu.ac.kr)

## Adaptive Receive Beamforming-Based Anti-Jamming Technique for Mitigating the Effect of Symbol-level Jamming Attacks

Yong-Jin Song, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

### Abstract

In this paper, we propose an adaptive receive beamforming technique for mitigating intentional symbol-level jamming (SLJ) attacks. The symbol-level jammer generally utilizes the same modulation and coding schemes as the signal sent by a legitimate transmitter, making it difficult for the target receiver to accurately receive legitimate signals. In this environment, the multi-antenna receiver can mitigate SLJ attacks by adaptively applying maximum ratio combining (MRC) and zero-forcing (ZF) beamforming depending on the presence of SLJ signals. Through simulation results, we verify that the proposed technique can effectively suppress the impact of SLJ signals.

### I. 서론

차세대 통신 시스템은 신경망이나 심층 학습과 같은 인공지능(artificial intelligence: AI) 기반 기술을 접목한 다양한 통신 기술이 최근 활발히 연구되고 있다 [1]. 한편, 무선통신 시스템에서 AI 기술의 발전은 임의의 송수신기 간 통신 과정에서 사용하고 있는 통신 프로토콜, 주파수 대역, 변조 및 채널 부호 기법과 같이 물리 계층 보안과 관련한 다양한 통신 정보도 추정할 수 있어 의도적 전파 간섭 공격에 취약해질 수 있는 문제가 있다 [2].

무선 전파 환경에서 발생할 수 있는 다양한 의도적 간섭 공격 중 심볼 단위 재밍(symbol-level jamming: SLJ)은 실제 송신기와 동일한 변조 및 채널 부호 기법을 사용하여 송신기가 전송한 신호의 검파 오류를 발생시키는 전파 간섭 공격을 의미한다 [3]. 이러한 SLJ는 송신기가 전송하는 실제 신호와 동일한 구조를 가지며 전력 수준이 비슷하여 심볼의 성상(constellation)에서 재밍 공격의 효과가 나타나기 때문에 수신기가 SLJ 공격을 탐지 및 감쇄하는 데 매우 큰 어려움이 있다 [3, 4]. 따라서, 본 논문에서는 다중안테나 수신기를 고려하여 효율적으로 SLJ 신호를 감쇄할 수 있는 적응형(adaptive) 수신 빔포밍 기술을 제안한다. 구체적으로, 다중안테나 수신기는 SLJ 재밍 공격을 탐지한 심볼에 대해 간섭 제거(zero-forcing:

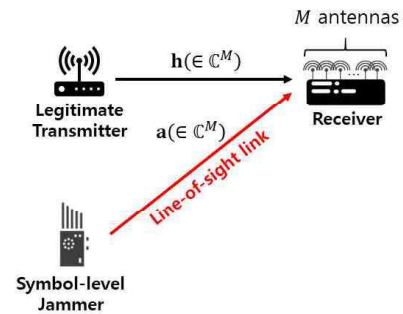


그림 1. SLJ 공격에 대해 제안하는 적응형 수신 빔포밍 기법의 시스템 모델.

ZF) 빔포밍을 수행하고, SLJ 신호가 없는 심볼에 대해서 무선 채널의 공간 다이버시티 이득을 최대로 얻을 수 있는 최대 비율 결합(maximum ratio combining beamforming: MRC) 빔포밍을 수행한다. 모의실험을 통해 본 논문에서 제안하는 적응형 수신 빔포밍 기법이 SLJ 신호의 영향을 효과적으로 완화할 수 있음을 비트당 오류율(bit-error-rates: BER) 관점에서 확인한다.

### II. SLJ 감쇄를 위한 다중안테나 기반 적응형 수신 빔포밍 기법

본 논문에서는 그림 1과 같이  $M$ 개의 안테나를 갖는 수신기로 단일 안테나를 갖는 공인 송신기(legitimate transmitter)와 재머가 동일한 변조 방식을 갖는 신호를 송신하는 통신환경을 고려한다. 이때, 공인 송신기와 수신기 사이의 무선 채널  $\mathbf{h}(\in \mathbb{C}^M)$ 는 레일리 페이딩(Rayleigh fading)을 가정하여 통계적으로  $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_M)$  분포를 따른다고 가정하였으며, 재머는 수신기와 가시선(line-of-sight: LoS) 경로를 확보하였고 다중 경로에 의한 신호는 없다고 가정하였다. 따라서, 수신기가 균일 선형 배열안테나(uniform linear array: ULA)를 구비할 때, 고정된 재머와 수신기 사이의 LoS 채널  $\mathbf{a}(\in \mathbb{C}^M)$ 는 중심 주파수, 신호 입사각에 의해 결정되어  $m(\in \{1, \dots, M\})$  째 원소  $a_m$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$a_m = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d(m-1)\cos\theta}$$

여기서  $d$ 는 안테나 간 이격을 나타내고,  $\lambda$ 는 파장을 의미하며,  $\theta$ 는 재머가 송신한 SLJ 신호 전파의 입사각을 나타낸다. 또한, 본 논문에서는 적응형 수신 빔포밍을 통한 SLJ 감쇄 성능을 일반적인 통신환경에서 분석하기 위해 주파수 선택(frequency-selective) 채널 환경을 가정하였다. 따라서, 전체  $N$ 개의 심볼에서  $i(\in\{1, \dots, N\})$ 째 심볼에 대한 수신 신호는 다음과 같이 두 가설(hypothesis)로 분류할 수 있다.

$$\mathbf{y}_i (\in \mathbb{C}^M) = \begin{cases} \mathbf{h}_i \sqrt{E} x_i + \mathbf{n}_i, & H_0 \\ \mathbf{h}_i \sqrt{E} x_i + \mathbf{a} \beta \sqrt{E} e^{j\phi} z_i + \mathbf{n}_i, & H_1 \end{cases}$$

여기서  $H_0$  가설은 SLJ 신호가 존재하지 않는 수신 신호를 의미하며  $x_i$ 는 공인 송신기가 전송한  $i$ 째 변조 심볼을 나타내고  $E$ 는 송신 전력을 나타내며  $\mathbf{n}_i (\in \mathbb{C}^M)$ 는  $i$ 째 심볼에 대해 수신기에서 발생하는 부가 열잡음을 의미한다. 본 논문에서 모든 열잡음 신호는 통계적으로 평균이 0이고 분산이  $\sigma_n^2$ 인 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정하였다. 한편,  $H_1$  가설은 SLJ 신호가 존재하는 수신 신호를 나타내며  $\beta$ 와  $\phi$ 는 각각 재머와 공인 송신기 간 전력 비율과 위상 차이를 나타내고  $z_i$ 는  $i$ 째 심볼에서 공인 송신기와 동일한 변조 방식으로 생성한 임의의 변조 심볼을 나타낸다. 본 논문에서는, 제안하는 적응형 수신 빔포밍 기법에 대한 SLJ 신호 감쇄 성능 분석을 다루므로 수신기가 SLJ 신호 탐지에 성공하여 SLJ 신호가 존재하는 심볼과 재머의 채널을 알고 있다고 가정하였다.

이후, 다중안테나 수신기는  $H_0$  가설 심볼에 대해 공인 송신기와 수신기 간 채널의 공간 다이버시티 이득을 최대화하는 MRC 빔포밍을 수행하고,  $H_1$  가설 심볼에 대해 SLJ 신호 성분을 감쇄하기 위한 ZF 빔포밍을 다음과 같이 수행한다.

$$\tilde{\mathbf{y}}_i = \begin{cases} \mathbf{w}_{\text{MRC}}^i \mathbf{y}_i = \|\mathbf{h}_i\| x_i + \tilde{\mathbf{n}}_i, & H_0 \\ \mathbf{g}_i \mathbf{w}_{\text{ZF}}^i \mathbf{y}_i = g_i x_i + \tilde{\mathbf{n}}_i, & H_1 \end{cases}$$

여기서  $\mathbf{w}_{\text{MRC}}^i (\in \mathbb{C}^{1 \times M})$ 와  $\mathbf{w}_{\text{ZF}}^i (\in \mathbb{C}^{1 \times M})$ 는 각각  $i$ 째 심볼에 대한 MRC 및 ZF 빔포머(Beamformer)를 나타내며  $\mathbf{w}_{\text{MRC}}^i$ 는 무선 채널 이득을 최대화하기 위해  $\mathbf{h}_i^H / \|\mathbf{h}_i\|$ 로 정의되며  $\mathbf{w}_{\text{ZF}}^i$ 는  $\mathbf{H}_i (\in \mathbb{C}^{M \times 2}) = [\mathbf{h}_i \ \mathbf{a}]$ 의 유사-역행렬의 첫 번째 행을 나타내고,  $g_i = \sqrt{1 / [(\mathbf{H}_i^H \mathbf{H}_i)^{-1}]_{1,1}}$ 는 동일한 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)에 대해 유효 잡음  $\tilde{\mathbf{n}}_i$ 의 분산을  $\sigma_n^2$ 으로 표현하기 위한 정규화 요소(regularization factor)를 의미한다 [5].

### III. 모의실험 결과 및 결론

본 논문에서는 SLJ 전파 간섭 공격에 대해서 제안하는 적응형 수신 빔포밍을 적용할 때의 BER 성능을 MATLAB 모의실험을 통해 분석하였다. 본 모의실험에서 수신기의 안테나 수는 4개로 가정하였으며, 중심 주파수는 3.5GHz, 재머의 방향은  $30^\circ$ 로 고정하였다. 또한, 본 논문에서는 재머가 공인 송신기와 수신기 간 동기를 맞췄다고 가정하여  $\phi = 0$ 으로 설정하였다. 또한, 재밍 비율  $\alpha$ 는 전체 심볼 중 SLJ 신호가 존재하는 심볼의 비율을

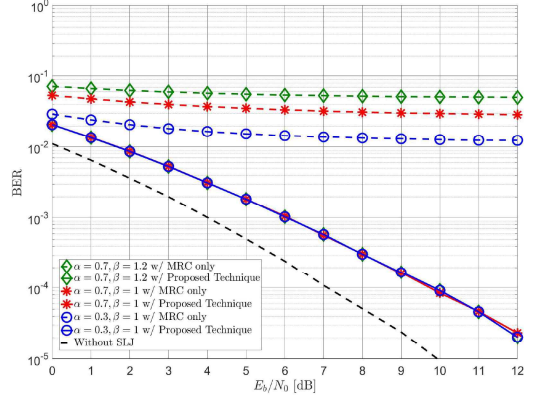


그림 2. 제안하는 SLJ 감쇄를 위한 적응형 수신 빔포밍 기법의 BER 성능.

나타낸다. 그림 2는 제안하는 적응형 수신 빔포밍을 적용할 때의 SLJ 신호의 감쇄 효과를 도시한 결과이다. 구체적으로, 그림 2는 다양한 재밍 비율( $\alpha$ ) 및 재밍 대비 신호 전력비( $\beta$ )에 따른 BER 성능을 나타내며, SLJ 공격이 존재할 때 오직 MRC 빔포밍을 이용하여 공인 송신기 간 무선 채널의 이득만 얻을 때에는 SLJ의 영향으로 공인 송신기가 전송한 신호 검파를 수신기가 수행하지 못한다. 반면, 제안하는 기법은 SLJ의 영향을 효과적으로 완화할 수 있어 공인 송신기가 전송한 신호 검파가 가능함을 확인할 수 있다.

### Acknowledge

이 논문은 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2022R111A3073740)을 받아 수행된 연구임.

### 참고문헌

- [1] S. V. Balkus *et al*, "A survey of collaborative machine learning using 5G vehicular communications," *IEEE Commun. Surveys Tut*, vol. 24, no. 2, pp. 1280-1303, 2nd Quart. 2022.
- [2] Z. Kaleem, M. Ali, I. Ahmad, W. Khalid, A. Alkhayat, and A. Jamalipour, "Artificial intelligence-driven real-time automatic modulation classification scheme for next-generation cellular networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 155584-155597, Nov. 2021.
- [3] H. S. Jang and B. C. Jung, "Performance analysis of reactive symbol-level jamming techniques," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 12, pp. 12432-12437, Dec 2018.
- [4] Y. S. Jang, J. T. Park, and I. S. Kim, "BER expression of QAM for symbol-level jamming," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 2, pp. 1037-1048, Feb. 2022.
- [5] Y. -S. Lee, K. -H. Lee, H. S. Jang, G. Jo, and B. C. Jung, "Performance analysis of resource hopping-based grant-free multiple access for massive IoT networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 2685-2689, Dec. 2022.