

상향링크 단말 신호 및 재밍 신호 방향 추정 오차에 따른 항재밍 디지털 빔포밍 성능 분석

서형욱, 정현진, 김동현*, 김선우

한양대학교 융합전자공학과, *국방과학연구소

{rlrprl, hyeonjingo, remero}@hanyang.ac.kr, *dh-kim@add.re.kr

Analysis of Anti-Jamming Digital Beamforming Performance According to Direction Finding Error of Uplink UE Signal and Jamming Signal

Hyeongwook Seo, Hyeonjin Chung, Donghyun Kim*, and Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University, *Agency Defense Development

요약

본 논문에서는 시뮬레이션 결과를 통해 상향링크 단말 신호 및 재밍 신호 방향 오탐지 시 항재밍 디지털 빔포밍 벡터 설계 알고리즘의 성능을 분석하고 이후 연구 방향을 제시한다. 본 논문에서 사용된 항재밍 디지털 빔포밍 벡터 설계 알고리즘은 사전에 추정한 상향링크 단말 신호 및 재밍 신호의 방향을 이용해 재밍 신호를 널링하고 단말의 상향링크 신호 방향으로 빔을 조향하여 통신 성능을 증가시킨다. 그러나 방향 오탐지 발생 시 알고리즘의 성능은 급격히 저하되며 시뮬레이션을 통해 방향 오탐지 정도에 따른 성능 저하를 확인하였다. 따라서 방향 오탐지로 인해 야기되는 통신 성능 저하 방지를 위해 단말 및 재밍 신호가 메인로브 및 널을 벗어나지 않도록 널 폭 및 빔 폭을 제어하는 기술 개발의 필요성을 제시한다.

I. 서론

강력한 재밍 신호의 영향을 받는 상황에서 기지국은 안정적인 통신을 위해 재밍 신호 방향에 대해 널을 생성하고 단말 방향으로 빔을 조향하는 항재밍 디지털 빔포밍을 이용해 재밍 신호의 간섭을 억제하고 상향링크 단말 신호의 수신 이득을 높일 수 있다[1]. 이러한 방법은 사전에 단말 방향 및 재밍 방향을 정확히 탐지하였을 때 가장 높은 성능을 보인다. 그러나 상향링크 단말 신호 또는 재밍 신호 방향을 오탐지할 시 상향링크 단말 신호가 빔의 메인로브를 벗어나거나 재밍 신호가 널을 벗어나 성능 저하를 일으킬 가능성이 있다. 따라서 본 논문에서는 상향링크 단말 신호 및 재밍 신호 방향 오탐지 시 항재밍 디지털 빔포밍 벡터 설계 알고리즘의 성능과 한계점을 파악하고 이후 연구 방향을 제시한다.

II. 신호 및 채널 모델

본 논문에서는 선형 배열 안테나를 사용하는 기지국과 한 개의 전방향성 안테나를 사용하는 SIMO (single input multiple output) 상향링크 시스템을 가정하며 그림 1과 같이 상향링크 단말 신호 및 재밍 신호 방향 오탐지 발생 상황을 가정한다. 본 논문에서는 단일 경로를 고려하며 이 때 기지국의 수신 신호 \mathbf{Y} 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{Y} = \alpha \mathbf{a}(\phi) \mathbf{s} + \beta \mathbf{a}(\theta) \mathbf{j} + \mathbf{n} \in C^{M \times D}, \quad (1)$$

여기서 α , ϕ , $\mathbf{a}(\phi)$, \mathbf{s} 는 각각 기지국과 단말 간 채널 이득, 단말의 상향링크 신호 도래각, ϕ 에 대한 조향 벡터, 상향링크 신호를 의미한다. β , θ , \mathbf{j} , M , D 는 각각 기지국과 재밍 간 채널 이득, 재밍 신호 도래각, 재밍 신호, 기지국의 안테나 개수, 신호의 스냅샷 개수를 의미한다. 여기서 \mathbf{s} , \mathbf{j} 는 복소 가우시안 심볼을 사용한다. \mathbf{n} 은 노이즈 벡터이며 circularly symmetric 복소 정규 분포 $CN(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I})$ 를 따른다. 여기서 $\mathbf{0}$ 은 영벡터, \mathbf{I} 는 단위행렬을 의미한다.

기존의 항재밍 디지털 빔포밍 벡터 설계 알고리즘은 ϕ , θ 를 사전에 정확히 탐지하였다고 가정한다[2]. 본 논문에서는 ϕ , θ 에 대한 오탐지 발생을 고려하여 ϕ , θ 의 추정 도래각 $\hat{\phi}$, $\hat{\theta}$ 를 이용해 빔포밍 벡터를 구한다. 성능 분석을 위해 SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio)을 계산하며 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{SINR} = 10 \times \log_{10} \left| \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{Y}_S \mathbf{Y}_S^H \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H \mathbf{Y}_I \mathbf{Y}_I^H \mathbf{w}} \right|, \quad (2)$$

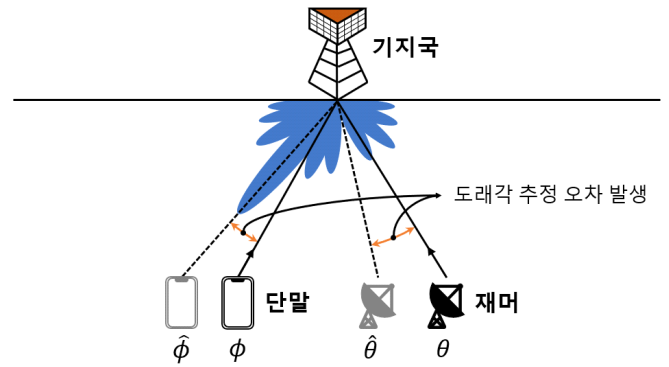


그림 1. 단말 및 재머 방향 오탐지 시의 항재밍 빔패턴 모식도

여기서 \mathbf{w} , $(\cdot)^H$ 는 각각 기지국의 빔포밍 벡터, 행렬의 켤레 전치를 의미한다. \mathbf{Y}_S , \mathbf{Y}_I 는 각각 \mathbf{Y} 의 상향링크 단말 신호 부분, \mathbf{Y} 의 재밍 신호 및 노이즈 부분을 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_S &= \alpha \mathbf{a}(\phi) \mathbf{s} \in C^{M \times D}, \\ \mathbf{Y}_I &= \beta \mathbf{a}(\theta) \mathbf{j} + \mathbf{n} \in C^{M \times D}. \end{aligned} \quad (3)$$

III. 항재밍 디지털 빔포밍 벡터 설계

기지국은 빔포밍 벡터 \mathbf{w} 를 설정하여 재밍 신호를 억제하고 단말의 상향링크 신호 세기를 최대화한다. 먼저 $\hat{\phi}$ 를 이용해 상향링크 단말 신호의 수신세기를 최대로 만드는 빔포밍 벡터 \mathbf{w}_s 를 다음과 같이 도출한다.

$$\mathbf{w}_s = \arg \max_{\mathbf{w}} \|\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\hat{\phi})\|^2 = \frac{\mathbf{a}(\hat{\phi})}{\sqrt{M}}. \quad (4)$$

이후 재밍 신호를 억제할 수 있는 널 생성 빔포밍 벡터 \mathbf{w}_j 를 구하기 위해 행렬 \mathbf{R}_{null} 을 다음과 같이 생성해 $\hat{\theta}$ 방향에 해당하는 신호 성분을 제거한다[3, 4].

$$\mathbf{R}_{\text{null}} = \frac{\mathbf{a}(\hat{\theta}) \mathbf{a}(\hat{\theta})^H}{\mathbf{a}(\hat{\theta})^H \mathbf{R}_Y^{-1} \mathbf{a}(\hat{\theta})} \in C^{M \times M}, \quad (5)$$

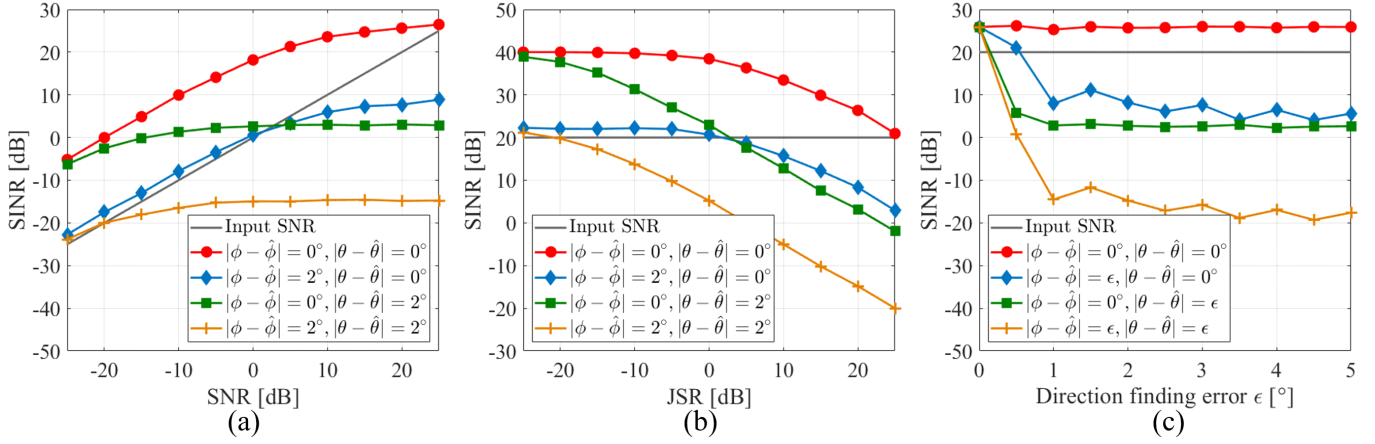


그림 2. (a) SNR, (b) JSR, (c) 신호 방향 탐지 오차 정도에 따른 SINR 성능

여기서 $(\cdot)^{-1}$ 는 행렬의 역행렬을 의미한다. \mathbf{R}_Y 는 \mathbf{Y} 의 공분산 행렬을 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R}_Y \approx \frac{1}{D} \mathbf{Y} \mathbf{Y}^H \in \mathbb{C}^{M \times M}. \quad (6)$$

생성한 \mathbf{R}_{null} 을 이용해 $\hat{\theta}$ 방향으로 널을 생성하면서 ϕ 방향에 대한 이득을 0 dB로 유지시키는 \mathbf{w}_j 를 다음과 같이 도출한다.

$$\mathbf{w}_j = \frac{\mathbf{R}_{\text{null}}^{-1} \mathbf{a}(\hat{\phi})}{\mathbf{a}(\hat{\phi})^H \mathbf{R}_{\text{null}}^{-1} \mathbf{a}(\hat{\phi})}. \quad (7)$$

도출한 \mathbf{w}_s , \mathbf{w}_j 를 선형조합하여 $\hat{\theta}$ 방향으로 널을 생성하면서 $\hat{\phi}$ 방향으로 빔을 조향하는 \mathbf{w} 를 도출한다.

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}_s + \mathbf{w}_j. \quad (8)$$

IV. 시뮬레이션 환경 및 결과

본 논문에서는 상향링크 단말 신호 또는 재밍 신호 방향 오탐지로 인해 야기되는 성능 저하를 확인하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 SNR (signal-to-noise ratio), JSR (jamming-to-signal ratio), 방향 오탐지 정도에 대해 상향링크 단말 신호 또는 재밍 신호의 오탐지 발생 여부에 따른 SINR 성능을 비교하였다. 그림 2-(a), 2-(b), 2-(c)를 도출할 때의 시뮬레이션 파라미터 설정은 표 1과 같으며 기지국은 안테나 간 간격이 반파장인 등간격 선형배열 안테나를 사용하였다.

그림 2의 시뮬레이션 결과를 통해 방향 오탐지 발생 시의 성능 저하를 확인할 수 있다. 그림 2-(a) 및 2-(b)의 결과를 통해 상향링크 단말 신호 방향 오탐지 발생 시 약 20 dB의 일정한 SINR 저하를 보이며 재밍 신호 방향 오탐지 발생 시 JSR이 증가할수록 오탐지 미발생 시와의 성능 차이가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 상향링크 단말 신호와 재밍 신호 방향을 모두 오탐지한 경우 두 방향 중 한 방향만 오탐지한 경우에 발생한

성능 저하를 더한 만큼의 성능 저하가 발생한 것을 확인할 수 있다. 그림 2-(c)에서 SINR은 상향링크 단말 신호 방향 탐지 오차 1° 발생 시 약 18 dB, 재밍 신호 방향 탐지 오차 1° 발생 시 약 22 dB, 두 방향 모두 탐지 오차 1° 발생 시 약 40 dB 저하된다. 이를 통해 방향 오탐지 정도가 작더라도 성능이 크게 저하됨을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 시뮬레이션 결과 분석을 통해 단말 또는 재밍 방향 오탐지가 발생한 경우에 주어진 상향링크 단말 신호 및 재밍 신호 방향을 이용한 기존의 항재밍 디지털 빔포밍 벡터 설계 알고리즘의 성능 저하를 확인하였다. 상향링크 단말 신호 방향 오탐지 발생 시 단말의 상향링크 신호는 빔의 메인로브를 벗어나 수신세기 이득이 감소한다. 재밍 신호 방향 오탐지 발생 시 재밍 신호는 널을 벗어나 간섭으로 인한 성능 저하를 야기하며 이러한 성능 저하는 JSR이 증가할수록 더욱 심해진다. 따라서 방향 오탐지 발생 시 항재밍 빔포밍 성능 저하를 방지하기 위해 재밍 신호가 널을 벗어나지 않도록 널 폭을 확장하고 단말의 상향링크 신호가 빔의 메인로브를 벗어나지 않도록 빔 폭을 확장하는 알고리즘을 개발할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다. (UD190033ED)

참고 문헌

- [1] J. Zhu, Z. Wang, Q. Li, and N. Ansari, "Mitigating intended jamming in mmWave MIMO by Hybrid Beamforming," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 8, no. 6, pp. 1617-1620, Dec. 2019.
- [2] G. Zhu, K. Huang, V. Lau, B. Xia, X. Li, and S. Zhang, "Hybrid beamforming via the Kronecker decomposition for the millimeter-wave massive MIMO systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 9, pp. 2097-2114, Sep. 2017.
- [3] Y. Gu, and A. Leshem, "Robust adaptive beamforming based on interferences covariance matrix reconstruction and steering vector estimation," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 60, no. 7, pp. 3881-3885, Jul. 2012.
- [4] J. Yang, J. Lu, X. Liu, and G. Liao, "Robust null broadening beamforming based on covariance matrix reconstruction via virtual interference sources," *Sensors*, vol. 20, no. 7, pp. 1865-1879, Mar. 2020.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

파라미터	(a)	(b)	(c)
M		128	
D		5	
α, β		1	
ϕ, θ	[0, π] uniform distribution		
Monte Carlo		1,000	
SNR [dB]	-	20	
JSR [dB]	20	-	20