

항재밍을 위한 입자 필터 기반 재밍 신호 추적 및 적응형 널 폭 제어 알고리즘

서형욱*, 정현진*, 김동현**,
 김선우^o

Particle Filter-Based Jamming Signal Tracking and Adaptive Null Width Control Algorithm for Anti-Jamming

Hyeongwook Seo*, Hyeonjin Chung*,
 Donghyun Kim**, Sunwoo Kim^o

요 약

본 논문에서는 재밍 신호 도래각 이동으로 인한 통신 성능 저하를 방지하기 위해 실시간으로 재밍 신호를 추적하고 널 생성 방향 및 널 폭을 제어하는 항재밍 빔포밍 벡터 설계 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 각 타임 슬롯마다 입자 필터를 이용해 재밍 신호의 도래각 및 도래각 탐지 오차 근사값을 추정하고 널 생성 방향 및 적응형 널 폭 제어를 통해 재밍 신호를 억제한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안 알고리즘이 이동하는 재머에 대해 안정적인 통신 성능을 보장함을 확인하였다.

Key Words : DoA tracking, Particle filter, Null width control, Beamforming, Anti-jamming, SIMO

ABSTRACT

In this paper, we propose an anti-jamming beamforming vector design algorithm to prevent

communication performance degradation due to the movement of the jammer. The proposed algorithm tracks the jamming signal using the particle filter and controls the null direction and the null width in real-time. Simulation results show that the anti-jamming beamforming with the adaptive null width control maintains a higher communication performance than that of anti-jamming beamforming without the adaptive null width control.

1. 서 론

강력한 재밍 신호의 영향을 받는 상황에서 기지국과 사용자는 안정적인 통신을 위해 빔포밍 기술 중 하나인 널 생성 알고리즘을 이용해 재밍 신호의 간섭을 억제할 수 있다^{1,2}. 널을 생성하는 기존의 항재밍 빔포밍 알고리즘은 사전에 재밍 신호의 도래각을 탐지한 경우 사용할 수 있다. 만약 도래각 탐지 오차 또는 재머의 이동에 의한 도래각 변화 발생 시 재밍 신호가 널을 벗어나 통신 성능이 저하되는 문제가 발생할 수 있다³.

재밍 신호 도래각 탐지 오차 발생으로 인한 성능 저하를 방지하기 위해 재밍 신호가 널을 벗어나지 않도록 널 폭을 확장하는 알고리즘이 제안되었다⁴. 널 폭 확장 시 널 폭을 넓게 설정할수록 노이즈에 취약해지는 특성이 존재하기 때문에 도래각 탐지 오차에 따라 적응적으로 널 폭을 결정하는 것이 중요하다. 그러나 기존의 널 폭 확장 알고리즘은 고정된 널 폭을 이용해 항재밍 빔포밍을 수행하기 때문에 적절한 널 폭을 결정하지 못해 성능이 저하될 우려가 있다. 따라서 널 생성 방향과 재밍 신호 도래각 간 오차로 인한 성능 저하 문제를 해결하기 위해 재밍 신호 도래각 탐지 오차를 추정하고 추정된 도래각 탐지 오차를 이용해 적절한 널 폭을 결정할 필요가 있다.

본 논문에서는 이동형 재머가 존재하는 상황에서 입자 필터를 기반으로 재밍 신호 및 도래각 탐지 오차를 추적하고 널 생성 방향 및 널 폭을 제어해 안정적

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD19003ED)

• First Author : (ORCID:0000-0002-9361-0187)Hanyang University Department of Electronic Engineering, rlrprl@hanyang.ac.kr, 학생(석사과정), 학생회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-7055-6587)Hanyang University Department of Electronic Engineering, remero@hanyang.ac.kr, 정교수, 중신회원

* Hanyang University Department of Electronic Engineering, hyeonjingoo@hanyang.ac.kr, 학생(박사과정), 학생회원

** Agency Defense Development, dh-kim@add.re.kr, 정회원

논문번호 : 202105-108-A-LU, Received May 18, 2021; Revised June 3, 2021; Accepted June 4, 2021

인 SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio)을 유지할 수 있는 빔포밍 벡터 설계 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 각 타임 슬롯마다 입자 필터를 이용해 재밍 신호의 채널 이득, 도래각 및 도래각 탐지 오차의 근사치를 추정한다^{15,6)}. 추정한 재밍 신호 도래각과 도래각 탐지 오차를 이용해 널 생성 방향과 널 폭을 결정하고 널 폭 제어 빔포밍 벡터를 구한다. 널 폭 제어는 탐지 도래각 주위에 일정 간격으로 다수의 가상 간섭원을 가정하는 방법을 이용한다⁴⁾.

II. 신호 및 채널 모델

본 논문에서는 이동형 재머가 존재할 때 선형 배열 안테나를 사용하는 기지국과 한 개의 전방향성 안테나를 사용하는 단말기 간의 SIMO (single-input-multiple-output) 상향링크 시스템을 가정한다. 재머는 각 타임 슬롯마다 이동하며 k 번째 타임 슬롯에서 빔포밍을 적용하지 않은 수신 신호 \mathbf{Y}_k 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 α , ϕ , $\mathbf{a}(\phi)$, \mathbf{s} 는 각각 기지국과 단말 간 채널 이득, 상향링크 신호 도래각, ϕ 에 대한 조향 벡터, 상향링크 파일럿 신호를 의미한다. 여기서 α , ϕ 는 재밍 신호 추적 중 변하지 않으며 주어진다고 가정한다. β_k , θ_k , \mathbf{j}_k , M , D 는 k 번째 타임 슬롯에서의 기지국과 재머 간 채널 이득, k 번째 타임 슬롯의 재밍 신호 도래각, k 번째 타임 슬롯의 재밍 신호와 기지국의 안테나 개수, 신호 스냅샷 개수를 의미한다. 여기서 β_k , θ_k 의 초기값은 각각 β_0 , θ_0 이다. \mathbf{n} 은 노이즈 벡터이며 circularly symmetric 복소정규분포 $CN(\mathbf{0}, N_0 \mathbf{I})$ 를 따른다. 여기서 $\mathbf{0}$ 은 영벡터, \mathbf{I} 는 단위행렬이다.

본 논문에서는 재밍 신호 추적 시 재밍 신호와 노이즈에 빔포밍을 적용한 \mathbf{z}_k 를 사용하며 \mathbf{z}_k 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{w}_k^H \beta_k \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{j}_k + \mathbf{w}_k^H \mathbf{n} \in C^{1 \times D}, \quad (2)$$

여기서 $(\cdot)^H$, \mathbf{w}_k 는 행렬의 켈레 전치, k 번째 타임 슬롯에서 기지국의 디지털 빔포밍 벡터를 의미한다. 적응형 널 폭 제어 시 \mathbf{Y}_k 의 공분산 행렬 $\mathbf{R}_{\mathbf{Y}_k}$ 를 사

용하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R}_{\mathbf{Y}_k} \approx \frac{1}{D} \mathbf{Y}_k \mathbf{Y}_k^H \in C^{M \times M}. \quad (3)$$

III. 재밍 신호 추적을 위한 적응형 널 폭 제어 알고리즘

3.1 입자 필터 기반 재밍 신호 추적

입자 필터 기반 재밍 신호 추적 기법은 각 타임 슬롯마다 \mathbf{z}_k 를 이용해 β_k , θ_k 를 추정한다. k 번째 타임 슬롯의 상태 모델 \mathbf{x}_k 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_k = [\beta_k^R, \beta_k^I, \theta_k]^T, \quad (4)$$

여기서 β_k^R , β_k^I , $[\cdot]^T$ 는 각각 β_k 의 실수 부분과 허수 부분, 행렬의 전치를 의미한다. 입자 필터를 이용해 k 번째 타임 슬롯의 추정 상태 모델 $\hat{\mathbf{x}}_k = [\hat{\beta}_k^R, \hat{\beta}_k^I, \hat{\theta}_k]^T$ 를 추정하며 여기서 $\hat{\beta}_k^R$, $\hat{\beta}_k^I$, $\hat{\theta}_k$ 는 각각 β_k^R , β_k^I , θ_k 의 추정치를 의미한다. $\hat{\mathbf{x}}_k$ 는 다음과 같이 추정할 수 있다⁵⁾.

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \int \mathbf{x}_k p(\mathbf{x}_k | \mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_k) d\mathbf{x} \approx \sum_{s=1}^S w_k^s \mathbf{x}_k^s, \quad (5)$$

여기서 \mathbf{x}_k^s , w_k^s , S 는 각각 k 번째 타임 슬롯의 s 번째 입자, \mathbf{x}_k^s 의 가중치, 생성한 무작위 입자의 개수를 의미한다. 또한 $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_k)$ 는 $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_k$ 에 대한 사후 확률 밀도를 의미한다. 이후 $\hat{\theta}_k$ 는 널 생성 방향 $\theta_{0,k}$ 으로 업데이트된다.

3.2 적응형 널 폭 제어

적응형 널 폭 제어 기법은 그림 1과 같이 도래각 탐지 오차가 발생했을 때 재밍 신호가 널을 벗어나는 것을 방지하기 위해 널이 θ_k 를 포함하도록 널 폭을 제어한다. 널 폭 제어 시 $\theta_{0,k}$ 주위에 일정한 각도 간격으로 가상의 간섭원이 V_k 개 존재한다고 가정한다. 이후 가상 간섭원을 이용해 행렬 \mathbf{R}_{V_k} 를 다음과 같이 생성한다^{1,4)}.

$$\mathbf{R}_{V_k} \approx \sum_{v=0}^{V_k} \frac{\mathbf{a}(\theta_{v,k}) \mathbf{a}^H(\theta_{v,k})}{\mathbf{a}^H(\theta_{v,k}) \mathbf{R}_{\mathbf{Y}_k}^{-1} \mathbf{a}(\theta_{v,k})} \Delta \theta_V \in C^{M \times M}, \quad (6)$$

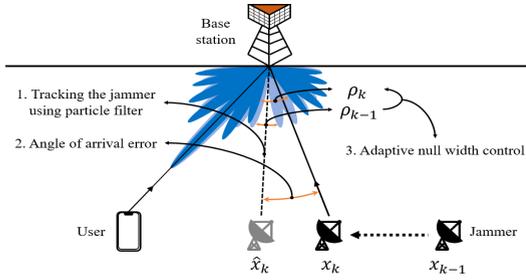


그림 1. 적응형 널 폭 제어 기법 모식도
Fig. 1. The scheme of the adaptive null width control

여기서 $\Delta\theta_v$, $\theta_{v,k}$ 는 각각 인접한 두 가상 간섭원의 각도 간격, k 번째 타임 슬롯의 v 번째 가상 간섭 신호의 도래각을 의미한다. $\theta_{0,k}, \dots, \theta_{V_k,k}$ 에 대해 널을 생성하며 ϕ 로 빔을 조향하는 w_k 를 다음과 같이 도출한다.

$$w_k = \frac{R_{V_k}^{-1} a(\phi)}{a^H(\phi) R_{V_k}^{-1} a(\phi)}. \quad (7)$$

본 논문에서는 $\Delta\theta_v$ 를 고정하고 각 타임 슬롯마다 V_k 를 조정해 널 폭 $\rho_k = V_k \Delta\theta_v$ 을 제어한다. V_k 는 도래각 탐지 오차에 비례하는 θ_k 의 추정 표준편차 s_k 에 따라 결정하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_k = \frac{\rho_k}{\Delta\theta_v} = \left\lceil \frac{s_k}{\Delta\theta_v} \right\rceil, \quad (8)$$

여기서 $\lceil \cdot \rceil$ 은 천정함수를 의미한다. s_k 는 다음과 같이 입자 추정치를 사용해 근사될 수 있다.

$$s_k \approx \sqrt{\sum_{s=1}^S w_k^s (\theta_k^s - \hat{\theta}_k)^2}. \quad (9)$$

결과적으로 제안 알고리즘은 $\theta_{0,k}$ 를 중심으로 ρ_k 의 폭을 가진 널을 생성하는 w_k 를 도출한다.

IV. 시뮬레이션 결과

적응형 널 폭 제어를 통한 재머의 이동에 의해 야기되는 통신 성능 저하 방지를 확인하기 위해 그림 2, 3과 같이 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 각

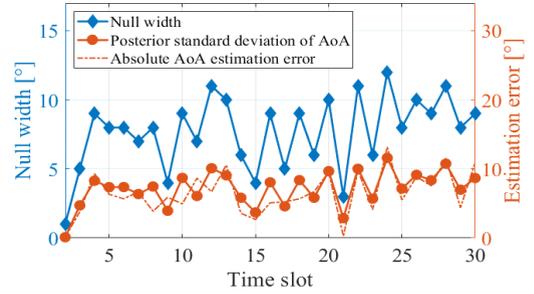


그림 2. 시간에 따른 도래각 탐지 오차와 널 폭 간 관계
Fig. 2. The correlation between the angle of arrival(AoA) estimation error and null width according to the time slot

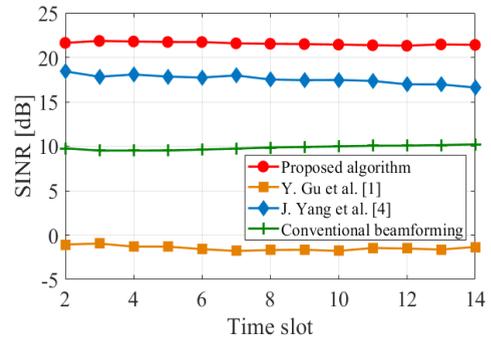


그림 3. 제안 알고리즘과 기존 알고리즘 간 SINR 비교
Fig. 3. SINR comparison between the proposed algorithm and other algorithms

타임 슬롯마다 x_k 를 확률적 진화 모델에 따라 변화시켜가며 진행하였으며 제안 알고리즘과 신호의 공분산 행렬을 이용해 널을 생성하는 기존의 항재밍 빔포밍 알고리즘^[1], 고정된 널 폭을 이용한 널 폭 확장 빔포밍 알고리즘^[4], 컨벤셔널 빔포밍 알고리즘의 SINR을 비교하였다. 여기서 컨벤셔널 빔포밍 알고리즘을 제외한 모든 알고리즘은 각 알고리즘은 입자 필터를 사용해 탐지한 재밍 신호 도래각에 대해 널을 생성한다. 이때 각 알고리즘을 적용한 입자 필터 기반 재밍 신호 도래각 추정 RMSE (root mean square error)는 거의 일치한다.

시뮬레이션에서 SNR (signal-to-noise ratio)과 JSR (jamming signal-to-signal ratio)은 20 dB로 설정하였다. j_k 는 복소 가우시안 심볼을 사용하였으며 $M=16$ 이다. $\alpha = \beta_0 = (1+j)/\sqrt{2}$ 이며 $\phi = 90^\circ$, θ_0 는 0° 부터 180° 사이의 임의의 값이다. $\sigma_\beta^R = \sigma_\beta^I = 0.1$, $\sigma_\theta = 0.5^\circ$, $D=5$, $\Delta\theta_v = 1^\circ$, $S=1000$ 이다. 몬테-카를로 반복 횟수는 500 번이며 고정된 널

폭을 이용한 널 폭 확장 알고리즘 적용 시 널 폭은 2° 로 설정하였다.

그림 2는 본 논문에서 제안하는 알고리즘에서 각 타임 슬롯에서의 도래각 탐지 오차, 도래각 추정 표준 편차 ς_k 와 널 폭의 관계를 나타낸다. 그림 2의 결과를 통해 ς_k 가 실제 도래각 탐지 오차와 유사한 그래프 형태를 그리며 각 타임 슬롯마다 업데이트된 ς_k 에 의해 널 폭 ρ_k 가 결정되는 것을 확인할 수 있다. 여기서 ρ_k 는 $\Delta\theta_v$ 의 배수가 되도록 ς_k 를 올림하여 결정한다. 그림 2에서 20 번째 타임 슬롯에서의 도래각 탐지 오차는 9.539° , ς_k 는 9.681° , ρ_k 는 10° 이다. 이를 통해 ς_k 가 도래각 탐지 오차와 근사하고 ρ_k 가 이에 따라 적응적으로 결정된 것을 확인할 수 있다.

그림 3의 결과를 통해 적응형 널 폭 제어 알고리즘과 기존 알고리즘 간 성능 차이를 확인할 수 있다. 재밍 신호 도래각 탐지 오차 발생 시 공분산 행렬을 이용한 기존의 항재밍 빔포밍 알고리즘은 컨벤셔널 빔포밍 알고리즘에 비해 SINR이 약 12 dB 낮아져 도래각 탐지 오차에 취약함을 확인할 수 있다. 반면에 제안 알고리즘 적용 시 SINR이 약 22 dB로 컨벤셔널 빔포밍 알고리즘에 비해 약 12 dB 상승하는 것을 확인할 수 있다. 또한 적응형 널 폭 제어 시 2° 로 널 폭 고정했을 때에 비해 SINR이 약 5 dB 높아 도래각 탐지 오차 발생 및 노이즈에 비교적 강인함을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 재머의 이동 및 재밍 신호 도래각 탐지 오차로 인한 통신 성능 저하를 방지하기 위해 적응형 널 폭 제어 알고리즘을 제안하였다. 기존의 널 폭 확장 알고리즘은 사전에 탐지한 재밍 신호 도래각의 탐지 오차를 추정하지 못해 고정된 널 폭 사용으로 인한 성능 저하가 발생한다. 반면에 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 각 타임 슬롯마다 입자 필터를 사용해 재밍 신호 도래각을 탐지한 후, 도래각 추정 표준 편차를 바탕으로 널 생성 방향 및 널 폭을 적응적으로 결정하고 이를 적용한 항재밍 빔포밍 벡터를 도출한다. 여기서 도래각 추정 표준편차는 도래각 탐지 오차에 비례한다. 시뮬레이션 결과를 통해 고정된 널 폭을 이용하는 기존 널 폭 확장 알고리즘에 비해 제안 알고리즘의 SINR이 약 5 dB 증가하여 본 논문에서 제안하는 알고리즘이 기존 알고리즘에 비해 이동하는 재

머에 대하여 더욱 높은 SINR을 보장함을 확인하였다.

References

- [1] 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.
- [2] J. Zhu, Z. Wang, Q. Li, H. Chen, 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.
- [3] H. Seo, H. Chung, D. Kim, and S. Kim, "The anti-jamming digital beamforming performance according to the jamming signal direction finding error," in *Proc. KICS Winter Conf. 2021*, pp. 281-282, Jeju Island, Korea, Feb. 2021.
- [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.
- [5] H. Chung, J. Kang, and S. Kim, "Adaptive beamwidth control for mmWave beam tracking," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 25, no. 1, Jan. 2021.
- [6] B. Ristic, S. Arulampalam, and N. Gordon, *Beyond the Kalman Filter: Particle Filters for Tracking Applications*, Norwood, MA, USA: Artech House, 2003.