

수신 동기 오차 모델링을 통한 분산형 빔형성 수신기의 성능 분석

장재원, 박철순, 나선필, 조성진, 김선교, 주형준*, 박동혁*

국방과학연구소, *한화시스템

jaewon2834@gmail.com

Performance Analysis of Distributed Beamforming Receivers based on Receive Synchronization Error Modeling

Jaewon Chang, Cheolsun Park, Sunphil Nah, SungJin Jo, Seon Kyo Kim,

Hyungjoon Joo*, Donghyuk Park*

Agency for Defense Development, *Hanwha Systems

요약

본 논문은 단일 채널 수신기와 안테나를 탑재한 드론 다수개를 분산 배치하여 운용하는 분산형 다채널 수신 빔포밍 시스템을 제안한다. 이러한 시스템은 기존 안테나 배열의 물리적 크기 및 배치 제약을 극복하여 광범위한 영역에서 향상된 신호 수집 능력을 제공할 잠재력을 가진다. 그러나 분산된 드론에 탑재된 수신기 간의 시간 및 주파수 동기 정확도와 드론의 배치 좌표 정밀도는 채널 간 위상 동기 오차를 유발하며, 이는 최종적인 빔포밍 성능에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 이러한 분산형 신호 수집 시스템에서 발생 가능한 수신 신호의 동기 오차(시간, 주파수, 위상)를 정량적으로 모델링하고, 이 오차들이 시스템의 수신 신호 대 간섭 잡음비 및 비트 오류 성능에 미치는 영향을 분석한다. 시뮬레이션을 통해 다양한 동기 오차 조건에서의 성능 변화를 제시함으로써, 향후 분산형 드론 기반 빔포밍 시스템 설계 및 운용에 필요한 핵심 파라미터의 중요도와 허용 오차 범위를 도출하고자 한다.

I. 서론

최근 무선 통신, 레이다, 음향 탐지 등 다양한 분야에서 목표 신호의 정확한 수신 및 간섭 신호 제거를 위한 빔포밍 기술의 중요성이 증대되고 있다 [1]. 기존 빔포밍 시스템은 다수 안테나를 특정 간격으로 배치한 배열 안테나를 사용하며, 각 안테나에 수신된 신호의 위상을 조절하여 원하는 방향 신호는 보강하고 원치 않는 방향 신호는 상쇄시킨다. 이러한 물리적인 배열 안테나는 시스템 크기, 비용, 설치 유연성 등에서 제한적이며, 광역 감시 또는 동적으로 변화하는 환경에 대응하기에는 제약이 따른다.

이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 최근 드론을 활용한 분산형 시스템이 활발히 연구되고 있다 [2, 3]. 드론은 높은 이동성과 배치 유연성을 바탕으로 광범위한 지역에 신속하게 배치될 수 있어, 재난 감시, 국방, 통신 중계, 원격 탐사 등 다양한 분야에서 활용성이 높게 평가되고 있다 [4]. 분산형 드론 기반 빔포밍 시스템은 각 채널 신호 간의 시간 동기, 주파수 동기, 그리고 이로부터 파생되는 위상 동기의 정확도가 시스템 전체 성능을 좌우한다. 이러한 동기 오차들은 빔 패턴 왜곡, 주엽 이득 감소, 부엽 레벨 증가, 목표 신호 탐지 및 통신 품질 저하를 초래한다.

본 논문은 단일 채널 수신기와 안테나를 탑재한 다수의 드론을 분산 배치하여 운용하는 분산형 다채널 수신 빔포밍 시스템 구성에서 발생할 수 있는 수신기 간 시간 동기 오차, 주파수 동기 오차, 그리고 드론 위치 측정 오차로 인한 채널 간 위상 동기 오차를 수학적으로 모델링한다. 이를 바탕으로, 모델링된 동기 오차들이 시스템의 수신 빔포밍 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석한다. 성능 지표로는 통신 및 신호 처리 시스템에서 널리 사용되는 수신 신호 대 간섭 잡음비(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)와 비트 오류(Bit Error Rate, BER)를 활용한다. 각 오차 요인이 시스템 성능에 미치는 민감도를 평가하고, 향후 시스템 설계 시 요구되는 동기 정확도 및 위치 정밀도에 대한 가이드라인을 제시하고자 한다.

II. 본론

본 논문에서 고려하는 시스템은 안테나 배열을 형성하기 위해 공간적으로 분산된 여러 대의 드론으로 구성된다. 드론 N 개가 존재하고 i 번째 드론이 위치 \mathbf{r}_i 에 있을 때 소스에서 송신된 협대역 신호 $s(t)$ 를 고려하면, i 번째 드론에서 수신된 신호 $y_i(t)$ 는 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$y_i(t) = a_i s(t - \tau_i) e^{j(2\pi f_c t + \phi_i)} + n_i(t) \quad (1)$$

여기서 a_i 는 진폭, τ_i 는 전파 지연, f_c 는 반송 주파수, ϕ_i 는 초기 위상, $n_i(t)$ 는 i 번째 수신기에서의 부가 잡음이다. 전파 지연 τ_i 는 소스와 i 번째 드론 사이의 거리에 따라 달라진다. 위상 ϕ_i 는 송신 신호의 초기 위상과 채널 및 수신기 하드웨어에 의해 도입된 위상 변화를 포함한다.

LCMV(Linear Constraint Minimum Variance) 빔포밍은 선형 제약 조건 하에서 간섭 및 잡음을 최소화하면서 원하는 신호를 향상시키기 위해 사용되는 적응형 공간 필터링 기술이다. LCMV의 목표는 제약 조건 $\mathbf{C}^H \mathbf{w} = \mathbf{f}$ 하에서 수신 신호 벡터 $\mathbf{x} = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)]^T$ 의 공분산 행렬 \mathbf{R}_x 에 대해 출력 전력 $P_{out} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w}$ 를 최소화하는 가중치 벡터 \mathbf{w} 를 찾는 것이다. 제약 조건은 일반적으로 특정 관심 방향에서 오는 신호에 대한 무왜곡 응답을 보장한다. LCMV 빔포머의 최적 가중치 벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{C} (\mathbf{C}^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{f} \quad (2)$$

서로 다른 드론에 있는 수신기 간의 시간 동기화 오류(Δt_i)는 각 드론에서 수신된 신호에 위상차를 유발한다. i 번째 드론에서의 Δt_i 시간 지연 오류는 $\Delta \phi_{t,i} = 2\pi f_c \Delta t_i$ 의 위상 오류에 해당한다. 이러한 시간 동기화 오류는 분산된 수신기 간의 클록 소스 변동 또는 신호 처리 지연으로 인해 발생할 수 있다. 주파수 동기화 오류(Δf_i)는 드론의 국부 발진기가 수신

신호의 반송 주파수와 약간 다른 주파수를 가질 때 발생한다. i 번째 드론에서의 Δf_i 주파수 오프셋은 시간에 따라 선형적으로 증가하는 시간 가변 위상 오류 $\Delta \phi_{f,i} = 2\pi \Delta f_i t$ 를 유발한다. 드론 위치 측정 오류($\Delta \mathbf{r}_i$)는 소스에서 각 드론까지 전파 지연의 부정확성을 유발한다. i 번째 드론의 전파 지연은 $\tau_i = \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{source}\|/c$ 이며, 여기서 c 는 광속이다. 위치 측정 오류는 지연 오류 $\Delta \tau_i \approx (\Delta \mathbf{r}_i)(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{source})/(c \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{source}\|)$ 의 원인이 되며, 이는 $\Delta \phi_{p,i} = -2\pi f_c \Delta \tau_i = -2\pi(\Delta \mathbf{r}_i)\mathbf{u}_i/\lambda$ 의 위상 오류를 발생시킨다. 여기서 $\mathbf{u}_i = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{source})/\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{source}\|$ 는 소스에서 i 번째 드론으로의 단위 벡터이고 λ 는 파장이다.

기준 드론(예: 드론 1)을 기준으로 i 번째 드론에서 수신된 신호에 대한 전체 위상 오류는 시간, 주파수 및 위치 부정확성으로 인한 개별 위상 오류의 합으로 표현할 수 있다.

$$\Delta \Phi_i(t) = (\Delta \phi_{t,i} - \Delta \phi_{t,1}) + (\Delta \phi_{f,i}(t) - \Delta \phi_{f,1}(t)) + (\Delta \phi_{p,i} - \Delta \phi_{p,1}) \quad (3)$$

이러한 전체 위상 오류는 빔포머가 인식하는 원하는 신호의 유효 조향 벡터에 영향을 미친다. 이는 동기화 오류의 전체적인 영향을 이해하는 데 매우 중요하다. 위상 오류는 원하는 신호의 코히어런트 결합 이득을 감소시켜 LCMV 알고리즘으로 합성된 신호의 SINR을 저하시킨다. 원하는 신호가 위상 오류 $\Delta \Phi_i$ 로 도착하면, 원하는 신호에 대한 빔포머의 출력은 $|\sum w_i^* \exp(j\Delta \Phi_i)|$ 에 비례한다. 출력에서의 원하는 신호의 전력은 $\Delta \Phi_i = 0$ 인 이상적인 경우에 비해 감소한다. 또한, 위상 오류는 E_b/N_0 를 감소시켜 비트 오류 확률을 증가시킨다.

분산형 다채널 수신 빔포밍 시스템의 성능을 평가하기 위해 다양한 동기 및 위치 오차 조건에서의 수신 성능 분석 시뮬레이션을 수행하였다. 성능 평가는 SINR의 누적 분포 및 BER을 지표로 사용하였다. 시뮬레이션은 16 대의 드론을 이용한 16 채널 LCMV 빔합성 수신 환경을 기반으로 하였으며, 드론은 수신 신호 중심 주파수 기준 반파장 간격의 선형 배열로 배치되었다. 시스템 설계 시 고려된 최대 운용 주파수 기준 성능 평가가 이루어졌으며, 변복조 방식으로는 BPSK를 적용하였다.

그림 1은 드론 간 동기 오차의 표준편차 변화가 수신 빔포밍 성능에 미치는 영향을 나타낸다. 그림 1(a)는 시간 동기 오차에 따른 빔합성된 수신 신호의 SINR 누적 분포를 보여준다. 시간 동기 오차가 40 ps 이내일 때, 50% 이상의 SINR이 8.8 dB 이상 확보됨을 알 수 있다. 시간 동기 오차에 따른 BER 성능 변화를 그림 1(b)로 제시하였다. 1% 이내의 비트 오류를 만족하기 위하여 시간 동기 오차가 약 39.2 ps 이내로 관리되어야 함을 확인하였다. 그림 1(c)는 주파수 동기 오차에 따른 SINR 누적 분포를 제시한다. 주파수 동기 오차가 160 Hz 이내일 때 SINR이 11.4 dB 이상 확보되는 경우가 50%를 넘는 것을 관찰하였다. 그림 1(d)는 주파수 동기 오차에 따른 BER 성능을 보여준다. BER이 1%를 만족하기 위한 주파수 동기 오차 허용치는 약 160.7 Hz로 분석되었다. 그림 1(e)는 위치 오차에 따른 SINR 누적 분포를 나타낸다. 위치 오차가 0.5 λ 이내일 경우 SINR이 5.8 dB 이상 확보되는 비율이 50% 이상이었다. 그림 1(f)는 위치 오차에 따른 BER 성능을 보여준다. BER 1%를 만족하기 위한 위치 오차는 약 0.51 λ 이내로 제한되어야 함을 확인하였다.

III. 결론

분산형 빔포밍에 대한 동기화 오류 영향의 주요 결과를 제시하였으며, 성능에 영향을 미치는 중요한 요소를 식별하고 잠재적인 오류 보상 및 최적화 등의 향후 연구 방향을 제시한다. 고급 동기화 프로토콜, 위상 추적을 위한 칼만 필터링 또는 조향 벡터 오류에 덜 민감한 빔포밍 기술 등의 드론 기반 시스템의 동기화 오류 완화를 위한 추가적인 연구가 필요하다.

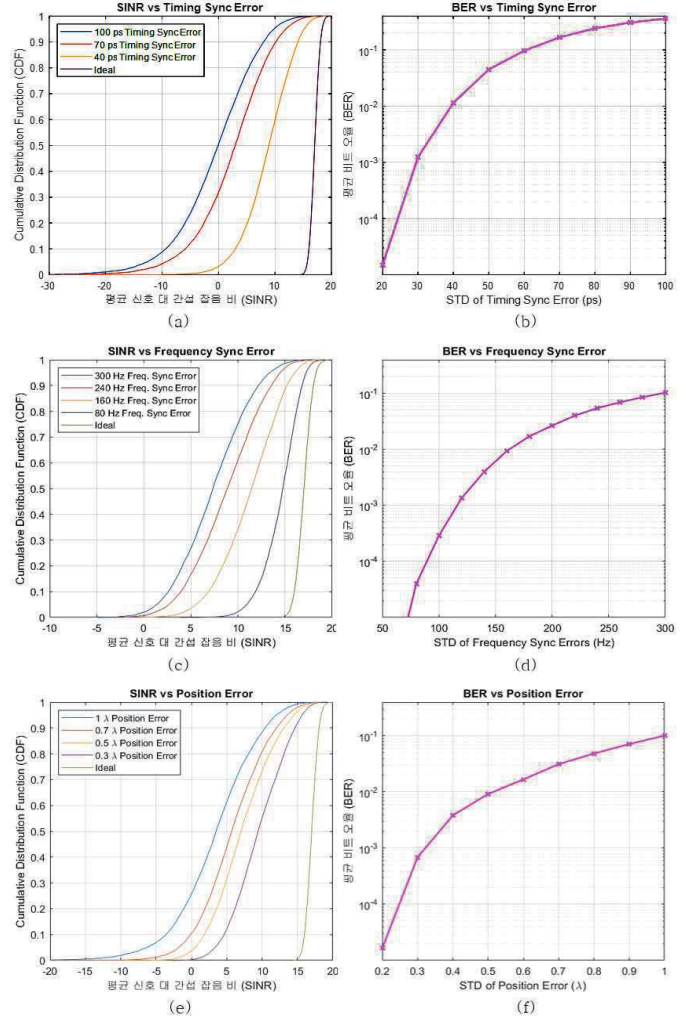


그림 1. 동기 오차 변화에 따른 수신 성능 분석 (a) 시간 동기 오차 vs. 신호 대 간섭 잡음비, (b) 시간 동기 오차 vs. 비트 오류, (c) 주파수 동기 오차 vs. 신호 대 간섭 잡음비, (d) 주파수 동기 오차 vs. 비트 오류, (e) 위치 오차 vs. 신호 대 간섭 잡음비, (f) 위치 오차 vs. 비트 오류

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 미래도전국방기술 과제(No. 915087201)를 통해 연구가 수행되었다.

참고 문헌

- [1] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2002.
- [2] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, May 2016.
- [3] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. H. Nam, and M. Debbah, "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2334-2360, Thirdquarter 2019.
- [4] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, Secondquarter 2016.