

분산 통신 시스템에서의 효율적 빔 추적 기법

송하림, 고영채

고려대학교

{hhhlims,koyc}@korea.ac.kr

Efficient UAV Beam Tracking for Distributed Communication Systems

Ha-Lim Song, Young-Chai Ko

Korea Univ.

요 약

본 논문은 무인기 통신 중계 시스템을 구현하기 위한 핵심 요소로서, 빔포밍을 이용한 무인기의 위치 추적 및 분산 처리 시스템을 제안한다. 지상 노드들은 다중 배열 안테나를 통해 무인기의 파일럿 신호를 수신하고, 각 안테나의 수신 신호 간의 위상차를 이용해 신호의 도래각을 찾는다. 모노펄스 신호를 EKF(Extended Kalman Filter)의 측정 모델로 삼아 무인기의 위치를 추적한다. 하지만 경로 손실과 간섭의 영향으로 특정 노드에서의 도래각 추정 성능이 저하될 수 있다.

이를 보완하기 위하여 분산 네트워크로 연결된 지상 노드들이 협력하여 무인기 위치를 추적할 수 있는 시스템을 설계하였다. 이를 통해 통신 채널 변화에 따른 관측 오차를 보정하고, 다중 지상 노드와 무인기 간의 지속적인 통신 채널을 유지할 수 있는 빔 추적 기법을 제안한다.

I. 서 론

무인기를 이용한 지상 노드의 통신 커버리지 확장에 대한 연구가 활발히 진행됨에 따라, 무인기를 통해 중계소가 부족한 지역이나 일시적으로 사용자가 급증한 지역에 대하여 추가적인 네트워크 용량을 공급하는 서비스에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나 지상과 무인기 간에 거리가 멀기 때문에, 빔포밍 기술이 요구되는데, 빔포밍은 다중 어레이 안테나를 이용해 특정 방향으로 지향성 빔을 형성하여 수신 성능을 향상시키는 기술이다. 이를 통해 보다 먼 거리의 신호를 송수신하고, 간섭 잡음을 감쇄할 수 있는 장점이 있다. 빔포밍을 이용하기 위해서는 신호원에 대한 도래각 추정이 선행되어야 한다. 이에 대해 다중 배열 안테나 기반의 도래각 추정 방법과 빔 추적 연구들이 진행되고 있다[1]. 본 연구에서는 다수의 지상 노드와 무인기가 연결되는 통신 네트워크 시스템을 고려하여, 지상 노드의 협동 추정을 통하여 네트워크 전체의 통신 성능을 향상시킬 수 있는 시스템을 제안한다. 특히 무인기의 위치에 따른 채널 특성 변화에도 무인기의 도래각을 안정적으로 추정하여 강건한 통신 성능을 보장할 수 있는 것을 확인하였다. 보다 확장 가능성 있는 시스템 설계를 위하여 다수의 지상 노드가 중앙 서버 없이 분산 네트워크로 연결된 시스템을 가정하였고, 이러한 시스템은 중앙 집중 시스템 대비 통신 용량 한계를 극복하고, 거리에 따른 시간 지연을 완화시켜서 다수의 지상 노드가 참여하는 거대 시스템 구현에 특화될 수 있다는 장점을 지닌다. 분산 확장 칼만 필터에서 정보 기반 필터를 활용하여 네트워크 상에서 인접 노드 간에 정보 교환을 통한 확산 알고리즘 적용으로 무인기의 도래각을 보정하는 알고리즘을 제안한다.

II. 시스템 모델

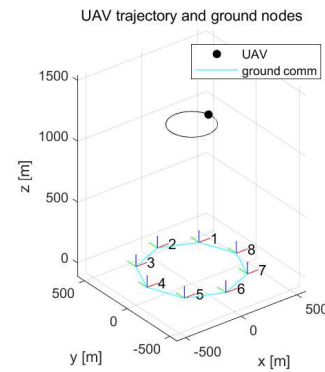


그림 1. 무인기 궤적과 지상 노드들의 배치 구성도

본 논문에서 다루는 시나리오는 그림 1과 같이 주어진 궤적을 따라 비행하는 무인기가 다수의 지상 노드와 직접 통신을 한다. 지상 노드는 무인기로부터 수신된 파일럿 신호를 바탕으로 신호의 도래각을 찾고, 무인기의 정확한 위치로 빔을 보정하여 신호 대 잡음비를 향상시키면서 빔추적을 수행한다. 무인기에는 $M_u = M_{u,x} \times M_{u,y}$ 크기의 평면 배열 안테나가 설치되어 있고, I 개의 지상 노드들은 각각 $M_g = M_{g,x} \times M_{g,y}$ 의 평면 배열 안테나가 설치되어 있다고 가정한다. 무인기와 i 번째 지상 노드 사이의 채널은 라이시안 페이딩 모델 [2]로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H}^i = \sqrt{\frac{P_0}{D_i^2}} \left(\frac{\sqrt{K}}{\sqrt{K+1}} \mathbf{H}_{los}^i + \frac{1}{\sqrt{K+1}} \mathbf{H}_{nlos}^i \right) \quad (1)$$

여기서 K 는 라이시안 요소이고, P_0 는 기준 거리에 대한 채널 전력, D_i 는 i 번째 노드의 거리이다. i 번째 노드에서의 수신 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}^i = \mathbf{H}^i \mathbf{x} + \mathbf{n}^i = \mathbf{H}^i \mathbf{p}^i s^i + \mathbf{H}^i \sum_{j \neq i} \mathbf{p}^j s^j + \mathbf{n}^i = \mathbf{H}^i \mathbf{p}^i s^i + \mathbf{n}_q^i, \quad (2)$$

여기서 \mathbf{x} 는 I 노드들의 채널을 알고 서로 간섭이 발생하지 않도록 \mathbf{p} 를 설계한다고 가정한다. 노드마다 주파수, 시간에 따른 자원 할당을 고려할 수 있다. 공대지 채널에서의 간섭 제거 기법 및 자원 할당에 대한 자세한 내용은 본 논문에서는 생략하겠다.

주어진 궤적을 비행하고 있는 무인기의 좌표를 전역 프레임 \mathcal{O} 을 기준으로 k 번째 이산시간에서 \mathbf{x}_k 로 나타낸다. 이산 역학계에는 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_n \quad (3)$$

지상 노드들은 이웃 노드 간에 쌍방향 통신 채널로 연결되어 있다. 노드들의 집합을 \mathcal{N} , 노드 i 의 이웃 노드 집합을 \mathcal{N}^i , 노드 i 자신을 포함한 집합을 \mathcal{N}^{i+} 라고 한다. i 번째 노드의 프레임을 \mathcal{F}^i 라고 할 때, \mathcal{F}^i 에서 \mathcal{O} 에 대한 변환 벡터는 \mathcal{T}^i , 회전 행렬은 \mathcal{C}^i 로 나타낸다. \mathcal{F}^i 에서 바라보는 무인기의 좌표는 $\mathbf{x}^i = \mathcal{C}^i \mathbf{x} + \mathcal{T}^i$ 로 표현된다. 무인기가 회전 반경 r 의 궤적을 돈다고 할 때, $r \ll D^i$ 라면 $\|\mathbf{x}^i\| \approx D^i$ 로 근사할 수 있고, \mathcal{F}^i 에서 바라보는 공간 각도 u^i, v^i 는 다음과 같다.

$$u^i \approx \frac{2\pi d}{\lambda D^i} (\mathcal{C}^i(1)x + \mathcal{T}^i(1)), \quad (4)$$

$$v^i \approx \frac{2\pi d}{\lambda D^i} (\mathcal{C}^i(2)x + \mathcal{T}^i(2)) \quad (5)$$

여기서 $\mathcal{C}^i(j)$ 는 \mathcal{C}^i 의 j 번째 행을, $\mathcal{T}^i(j)$ 는 \mathcal{T}^i 의 j 번째 요소를 나타낸다.

III. 분산 EKF 기반 빔 추적 알고리즘

제한한 알고리즘은 모노펄스 신호와 EKF(Extended Kalman Filter)를 이용하여 무인기 빔 추적을 수행한다. 지상의 다중 노드의 협동 빔 추적을 위해 분산 EKF 를 활용하였다 [3]. 본 논문에서는 EKF 의 측정 모델로 모노펄스 신호를 사용한다. 이 구체적 방안은 선행 연구인 [1]에서 자세하게 설명되어 있다. 페이지 수 제한으로 구체적 설명은 생략하겠다. 안테나 배열에서의 수신 신호들 간의 위상차이를 이용하여 다음과 같이 측정 모델을 설정할 수 있다.

$$\mathbf{r}^i = \begin{bmatrix} \tan\left(\frac{u^i}{2}\right) \\ \tan\left(\frac{v^i}{2}\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_u^i \\ n_v^i \end{bmatrix} = g(\mathbf{x}_k^i) + \mathbf{n}_k^i, \quad (6)$$

분산 EKF 를 사용하기 위하여 확산 알고리즘을 적용한다. 확산 행렬은 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{C}^i = \text{normalize}(\mathbf{I} + \gamma \mathcal{K}), \mathcal{J}^T \mathbf{C}^i = \mathcal{J}^T \quad (7)$$

γ 는 네트워크 제어 게인으로 이웃 노드 정보에 대한 반영 비율을 조정한다. 인접 행렬 $\mathcal{K}(k) = [k_{i,j}]_{i,j \in \mathcal{N}^{i+}}, k_{i,j} = 1$ if $\|\mathbf{x}_k^i - \mathbf{x}_k^j\| < d_c$ 로 표현할 수 있고, 확산 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{\mathbf{x}}_k^i = \sum_{l \in \mathcal{N}^i} c_{i,l} \xi^l, \quad (8)$$

여기서 ξ^l 은 l 번째 노드의 칼만필터의 상태 값이다. EKF 을 구현하기 위해서는 역학계의 선형화 과정이 필요하다. 이를 위한 식 (3)과 (6)의 자코비안 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_k^i = \frac{\partial f^i(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k^i}, \quad (9)$$

$$\mathbf{G}_k^i = \frac{\partial g^i(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k^i}. \quad (10)$$

전체 분산 EKF 알고리즘의 구성도를 보면, 먼저 다음과 같이 모노펄스 신호인 측정값을 토대로 위치를 업데이트 한다

$$\hat{\mathbf{G}}_k^i = \mathbf{G}_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^i), \quad (11)$$

$$(\mathbf{P}_{k|k}^i)^{-1} = (\mathbf{P}_{k|k-1}^i)^{-1} + \sum_{l \in \mathcal{N}^i} \hat{\mathbf{G}}_k^{i*} \mathbf{R}_{k|k}^l \hat{\mathbf{G}}_k^i, \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^i = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^i + \mathbf{P}_{k|k}^i \sum_{l \in \mathcal{N}^i} \hat{\mathbf{G}}_k^{i*} \mathbf{R}_{k|k}^l \hat{\mathbf{G}}_k^i [\mathbf{y}_l^i - g^i(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^i)], \quad (13)$$

업데이트된 위치 상태를 확산 알고리즘으로 다시 업데이트한다.

$$[\hat{\mathbf{x}}_{k|k}^i] \leftarrow \sum_{l \in \mathcal{N}^i} c_{l,k} [\hat{\mathbf{x}}_{k|k}^l], \quad (14)$$

확산 알고리즘 후에 최종적으로 보정된 위치 값과 그 공분산은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}^i = \mathbf{F}_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}^i), \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k}^i = \mathbf{F}_k^i(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}^i) \mathbf{P}_{k|k}^i \mathbf{F}_k^{i*} + \mathbf{Q}_k^i \quad (16)$$

여기서 \mathbf{Q}_k^i 는 i 번째 노드의 k 번째 시간에서의 잡음 공분산이다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

제한한 분산 통신 시스템에서 협동 빔 추적 기법과 중앙 시스템 기반, 독립 시스템 기반에서의 추적 성능 결과를 확인하였다. SNR 은 14dB, 라이시안 요소는 $K = 30$ dB, 안테나 개수는 $M_u = 16 \times 16$, $M_g = 8 \times 8$ 로 설정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 제한한 분산 알고리즘 기반 시스템의 성능이 중앙 시스템에서의

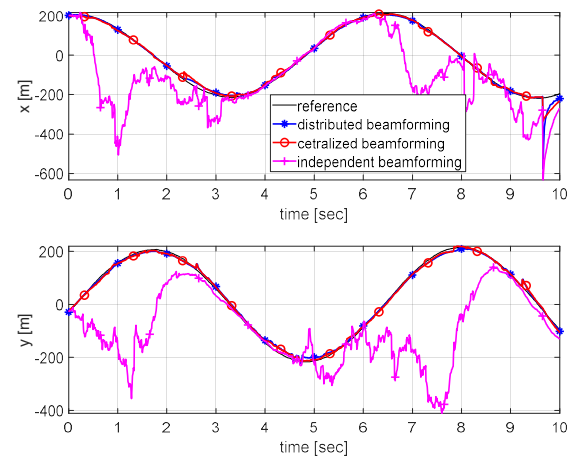


그림 2. 무인기 궤적 추적 결과

결과와 거의 비슷한 정확도를 보이며, 독립 시스템 보다 훨씬 높은 정확도를 보인다. 중앙 시스템 대비 복잡도를 낮추면서 이에 준하는 성능을 보이는 것을 확인하였다. 협동 추적 알고리즘을 기반으로 추정된 위치로 빔포밍을 수행하면 통신 용량을 증가시킬 수 있는 효과가 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] H.-L.Song and Y.-C. Ko. "Robust and Low Complexity Beam Tracking With Monopulse Signal for UAV Communications," IEEE Transactions on Vehicular Technology 70.4, 2021.
- [2] Mohammad Mahdi Azari, et al. "Optimal UAV positioning for terrestrial-aerial in presence of fading." 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp.1-7, Dec. 2016.
- [3] Reza Olfati-Saber. "Distributed Kalman filter with embedded consensus filters." Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 0191-2216, Dec. 2005.