

광역 분산형 빔포밍을 위한 다채널 데이터 송수신 기법

장재원, 박철순, 나선필, 조성진, 김선교, 김경민

국방과학연구소

jaewon2834@gmail.com

Multi-Channel Data Transmission and Reception Method for Broadband Distributed Beamforming

Jaewon Chang · Cheol-Sun Park · Sun-Phil Nah · SungJin Jo · Seon-Kyo Kim · Gyungmin Kim

Agency for Defense Development

요약

전장 환경에서 발생하는 주변 상황에 소수의 병력으로 신속하고 유연하게 대응하기 위하여 무인 자율화 기술이 활발히 연구되고 있으며, 소형 드론과 같은 이동체를 이용하여 전자전 대응 및 지상 방어를 위한 무인 무기체계에 적용되고 있다. 본 연구에서는 다수 이동체에 탑재된 안테나를 이용한 분산형 배열안테나 빔포밍 기법을 구현하기 위하여, 실시간 다채널 무선 데이터 송수신기법을 제시함으로써 이동체 상호 간 데이터를 효율적으로 전달하는 방법을 제안한다. 다수 이동체에 다채널 무선 자원 할당이 가능한 직교 주파수 분할 다중 접속 시스템의 데이터 송수신 방법을 기술하고, 제안 기법의 성능을 평가하기 위하여 무선 자원을 동시에 사용하는 다수 이동체 상호 간의 데이터 통신 처리 속도와 패킷 손실률, 평균 패킷 대기 시간 등의 시뮬레이션 결과를 제시한다.

I. 서론

현대전에서는 급변하는 전장 환경에 즉각적이고 유연성 있게 대응하기 위하여 소수의 병력으로 다수의 무인 자율화 기반 지능형 무기체계를 운용하기 위한 기술이 활발하게 적용되고 있으며, 최근 우크라이나 전쟁에서 병력과 자원의 열세를 극복하고 러시아의 대형 유인 무기체계 공격에 대응하고자 우크라이나군은 소형 드론 등을 효과적으로 운용하고 있다[1].

안테나와 송수신기를 탑재한 다수개의 드론을 분산 배치하여 전자전 대응 및 지상 방어 목적의 감시 정찰용 무인 무기체제로 활용하는 것이 가능하며, 대상 RF(Radio Frequency) 신호 특성 및 운용 주파수 대역에 적합한 형태로 분산 배치된 다수개의 드론을 동시에 활용할 때 드론에 탑재된 안테나로 구성된 배열 안테나 빔포밍 기법을 구현할 수 있다[2].

물리적으로 이격되어 배치된 안테나를 이용하여 분산형 빔포밍을 구현하기 위해서는 각 안테나에서 송수신되는 데이터를 빔포밍이 가능한 형태로 신호 처리한 데이터 프레임을 상호 간 실시간으로 송수신해야 한다. 분산형 빔포밍을 구현하기 위해서는 빔포밍 신호처리를 통하여 송수신하고자 하는 정보에 대한 데이터 프레임을 생성하여 지상 운용 장비와 분산 배치된 다수개의 드론이 공유할 필요가 있다.

분산형 빔포밍 기법을 적용하기 위해서는 송수신하고자 하는 정보의 데이터 프레임을 다수개의 드론이 상호 간에 전달하여 공유하기 위한 실시간 다채널 무선 데이터 송수신기법이 필요하다. 다수개의 드론이 동시에 데이터 송수신 목적으로 활용할 수 있는 무선 자원 할당 기법과 할당된 무선 자원을 활용하여 데이터를 송수신하기 위하여 필수적으로 고려되어야 하는 자원 할당 방식 정보, 신호 대 잡음 비(SNR; Signal to Noise Ratio) 레벨 정보, 채널별 보안 코드 생성 인덱스, 채널별 시간 지연 보정 데이터 등의 주요 제어 데이터 적용 방안이 개발되어야 한다.

본 논문에서는 무선 신호 송수신이 가능한 다수개의 분산 배치된 이동

체로 빔포밍 기법을 구현하기 위한 분산형 빔포밍 기반 무선 데이터 송수신기법을 제안한다. 제안 기법을 직교 주파수 분할 다중 접속 시스템에 적용할 때 다수개의 드론 상호 간의 데이터 통신 처리 속도와 패킷 손실률, 평균 패킷 대기 시간 등의 시뮬레이션 결과를 제시한다.

II. 본론

요구되는 주파수 대역에서 대상 RF 신호에 대한 빔포밍 송수신을 위하여 무선 신호 송수신이 가능한 다수개의 분산 배치된 이동체를 이용하여 분산형 빔포밍 기반 무선 데이터 송수신기법을 구현할 수 있다.

무선 RF 신호 송수신기를 탑재하여 분산 배치된 이동체 중에서 Master 노드와 Slave 노드를 결정하고, 다중 노드가 동시에 다중 접속이 가능한 무선 자원을 할당하기 위한 무선 데이터 송수신 채널을 구성하여 분산형 빔포밍 기반 무선 데이터 송수신을 수행할 수 있다. 요구 주파수 대역에서의 대상 신호에 대한 RF 신호를 분산 배치된 이동체의 송수신기에서 처리하며, 이를 위한 디지털 신호처리된 IF(Intermediate Frequency) 신호를 데이터 프레임 형태로 분산형 빔포밍 기반 무선 데이터 송수신 채널을 통하여 Master 노드와 Slave 노드 상호 간 전달하여 공유하는 것이 가능하다. 그림 1은 다수개의 분산 배치된 이동체로 빔포밍 기법을 구현하기 위한 이동체 그룹에서의 Master 노드와 Slave 노드 구성 및 노드별 신호처리부 구성도이다. 지상 운용 장비의 제어 명령에 따라 결정된 Master 노드는 다수의 Slave 노드와 다채널 데이터를 송수신하기 위한 다중 접속 무선 링크를 형성한다.

분산 배치된 이동체 중에서 Master 노드를 결정하기 위해서는 각 노드가 Master 노드로 선정되었을 때 나머지 Slave 노드들에서 전송되는 데이터를 최대 전송 효율로 전달할 수 있는 조합을 선정하는 것이 필요하다. Master 노드의 결정을 위해서 분산 배치된 노드들의 위치 정보, 신호 대

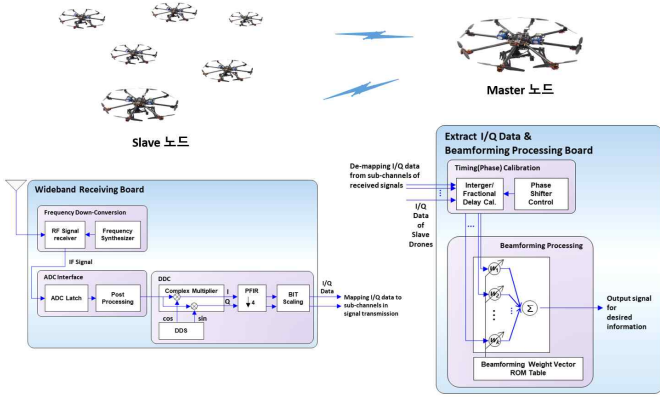


그림 1. 광대역 분산형 빔포밍 기법을 위한 이동체 그룹 및 노드별 신호처리부 구성도

잡음비(SNR), 전송 대역폭 또는 무선 링크에서 사용된 MCS 레벨 등을 이용하여 선정하는 것이 가능하다.

단일 Master 노드와 N 개의 Slave 노드를 선정하기 위하여 j 번째 노드에서 전송한 데이터를 j 번째 노드에서 수신할 경우, 수신 신호 세기는 다음과 같이 정의한다[3].

$$r_{j,i} = P_i G_i G_j L_{j,i} \quad (1)$$

P_i 과 G_i 는 j 번째 노드의 송신 세기와 송신 안테나 이득이며, G_j 는 j 번째 노드의 수신 안테나 이득, $L_{j,i}$ 는 j 번째 노드와 i 번째 노드 사이의 거리 $d_{j,i}$ 에 따른 경로 손실 $(4\pi f_c d_{j,i}/c)^2$ 을 의미한다. 여기서 c 는 빛의 속도, f_c 는 i 번째 노드에서 j 번째 노드로 데이터 전송 시 사용된 반송파(carrier) 주파수이다.

Slave 노드인 i 번째 노드에서 전송한 데이터를 Master 노드인 j 번째 노드에서 수신할 때 수신 신호의 신호 대 잡음비(SNR)는 $\mu_{j,i} = r_{j,i}/N_j$ 이며, $N_j = -174(\text{dBm/Hz}) + NF + 10\log_{10} W_j$ 는 j 번째 노드에 할당된 무선 자원의 대역폭 W_j , 수신기 잡음 지수 NF 가 포함된 잡음 신호 세기이다. j 번째 노드를 임의의 Master 노드로 선정할 경우, 나머지 N 개의 노드에서 Master 노드로 데이터 전송 시 전송 효율은

$$\eta_j = \sum_{i=0, i \neq j}^N \log_2(1 + \mu_{j,i}) \quad (2)$$

로 표현될 수 있으며, 전송 효율을 최대화할 수 있는 Master 노드 인덱스는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$j_{\text{Master}} = \underset{j \in \{0, \dots, N\}}{\text{argmax}} \sum_{i=0, i \neq j}^N \log_2(1 + \mu_{j,i}) \quad (3)$$

다중 노드들 사이의 실시간 다채널 데이터 통신을 위하여 다중 접속 무선 링크는 시간 또는 주파수 또는 코드 또는 직교 주파수 분할 등의 다중 접속 시스템을 적용할 수 있다. 그림 2는 IEEE802.11be (Wi-Fi 7) 규격의 직교 주파수 분할 다중 접속 시스템에서 320MHz 대역폭의 단일 전송 채널에 16개의 부채널 자원을 다중 노드들에 할당하였을 때 주파수 스펙트럼 결과와 부채널 구성을 위한 subcarrier 자원 할당 구조이다. 40MHz 대역폭을 갖는 부채널 8개를 할당하고 단일 부채널 당 2개 노드가 동시에 데이터를 송수신하는 방법을 통한 총 16개의 노드가 동시에 데이터를 송수신할 수 있는 다중 노드 자원 할당에 따른 주파수 스펙트럼이다.

단일 Master 노드와 16개의 Slave 노드들 사이에 실시간 다채널 데이터 송수신 무선 링크를 구현하기 위하여, 320MHz 대역폭의 직교 주파수 분할 다중 접속 시스템에 40MHz 대역폭을 갖는 부채널 8개를 할당하고

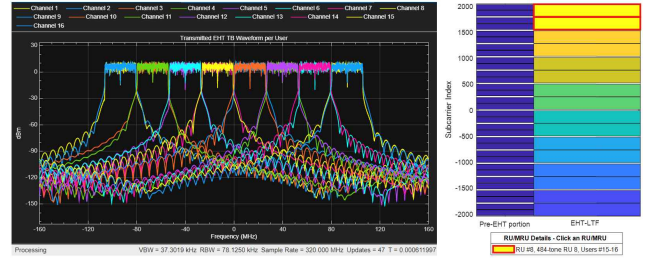


그림 2. 분산 배치된 이동체 사이의 다채널 데이터 송수신을 위한 자원의 할당 스펙트럼 및 다중 노드 자원 구조

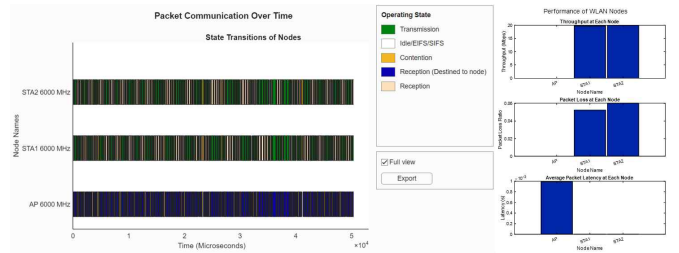


그림 3. 다채널 데이터 송수신에 따른 노드 별 데이터 통신 처리 속도 및 패킷 손실률, 평균 패킷 대기 시간

단일 부채널 당 2개 노드가 동시에 무선 자원을 활용하여 16개의 노드가 동시에 데이터를 송수신할 때, 노드 별 데이터 통신 처리 속도, 각 노드의 패킷 손실률, 평균 패킷 대기 시간을 도식한 시뮬레이션 결과는 그림 3과 같다. 중심주파수 6GHz 대역에서 320MHz 대역폭의 송수신 채널을 활용하였으며, 동일 채널을 사용하는 Slave 노드인 STA1과 STA2에서 Master 노드인 AP로 전송 가능한 각각의 데이터 통신 처리 속도는 약 20Mbps이며, 데이터 송수신 시 1ms의 패킷 대기 시간과 4 ~ 5%의 노드 별 패킷 손실이 발생함을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 분산 배치된 이동체에 동시에 탐지되는 대상 RF 신호에 대하여 요구 주파수 범위에서 실시간 빔포밍 송수신이 가능하도록 적용 가능한 이동체 사이의 다채널 데이터 송수신기법을 제시하였다. 직교 주파수 분할 다중 접속 시스템을 이용하여 제안 기법 적용 시, 다수 이동체 상호 간의 데이터 통신 처리 속도와 패킷 손실률, 평균 패킷 대기 시간을 분석하여 적용 가능성을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 수행된 미래도전국방기술과제 연구임 (No. 915087201)

참고 문헌

- [1] V. Pavlenko, I. Ponomarenko, O. Morhulets, V. Osadchyi, D. Ponomarenko, and O. Hrygorevska, "Using artificial intelligence to control drones," in *Proc. IEEE MSNMC '23*, Kyiv, Ukraine, pp. 182-185, Oct. 2023.
- [2] M. Hedayati, J. Diao and Y. E. Wang, "Adaptive Communications with Swarm Aperture," in *Proc. IEEE RWS '99*, Orlando, FL, USA, pp. 1-3, Jan. 2019.
- [3] C. Madapatha, et al., "On integrated access and backhaul networks: Current status and potentials," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 1374-1389, Sep. 2020.