

분산 빔합성 시스템을 위한 시간 동기화에 관한 연구

나선필, 박철순, 조성진, 장재원, 김선교, 김경민

국방과학연구소

sp2025@add.re.kr

A Study on the Timing Synchronization for Distributed Beamforming System

Sun-Phil Nah, Cheol-Sun Park, SungJin Jo, Jaewon Chang, Seon-Kyo Kim, Gunngmin Kim

Agency for Defense Development

요약

위협 신호 탐지에 다수의 드론을 이용한 분산형 빔합성 시스템을 적용할 경우 안테나 배열에 대한 자유도가 증가하기 때문에, 안테나 배열시 공간적인 한계를 극복할 수 있을 뿐만 아니라 지상 운용 대비 공중 운용의 경우 가지거리가 늘어나는 효과 때문에 위협신호 탐지거리가 확대되는 등의 장점이 있다. 다수의 드론을 이용하여 분산형 빔합성 시스템을 구현할 경우, 각 드론들이 동시에 빔합성을 수행하기 위해서는 PPS 신호 상승에지들 간의 시간 오프셋을 보상해야 한다. 본 논문에서는 GPS 거부환경에서 UWB 표준의 양방향 거리측정 방법중 하나인 SS-TWR 방식을 개선한 ADS-TWR 방식을 적용하여, 합성빔 형성에 참여하는 드론들간의 거리차에 의한 PPS 신호 상승에지 시간차를 보정하는 방법을 제시하였고 시뮬레이션을 통해 클럭 드리프트가 존재하는 신호환경에서 기존의 SS-TWR 방식보다 새로운 방법의 성능이 매우 안정적임을 확인하였다.

I. 서론

전자전 체계의 전자지원 장치 성능을 결정짓는 요소는 여러 가지가 있지만, 가장 핵심적인 요소중의 하나는 대상위협에 대한 탐지거리이다. 전자지원 장치를 공중에서 운용할 경우 운용 고도에 따른 가지거리 증대 효과로 인해 대상 위협 신호에 대한 탐지거리가 지상 운용보다 수 배에서 수십 배까지 확대된다[1]. 전자지원 장치를 다수의 드론 기반 분산형 빔합성 시스템으로 구현할 수 있다면 공중 운용에 따른 탐지거리 확대뿐만 아니라 합성빔을 생성하는 과정에서 간섭신호 제거와 같은 부수적인 효과도 달성할 수 있다. 분산형 빔합성 시스템에서는 합성빔 생성에 참여하는 각 드론들의 클럭 주파수 동기화 및 PPS(Pulse Per Second) 시간 동기 그리고 클럭 위상 동기 문제를 해결해야 된다. 본 논문에서는 GPS 거부환경에서 UWB 표준의 양방향 거리측정 방법중 하나인 SS-TWR(Single Sided Two Way Ranging) 방식을 개선한 ADS-TWR(Alternative Double Sided TWR) 방식을 적용하여, 합성빔 형성에 참여하는 드론들 간의 거리차에 의한 PPS 신호 상승에지 시간차를 보정하는 방법을 제시하였고 시뮬레이션을 통해 클럭 드리프트가 존재하는 신호환경에서 기존의 SS-TWR 방식보다 새로운 방법의 성능이 매우 안정적임을 확인하였다.

II. 본론

무선을 이용하여 분산형 빔합성 시스템의 동기문제를 해결하기 위한 다수의 논문이 학술지를 통하여 발표되었다. Kubra Alemdar는 분산형 빔합성 시스템의 동기 문제를 해결하기 위하여 무선 기반의 리더-팔로워 모델인 RFClock을 제시하였다[2]. RFClock 리더는 모든 팔로워에게 무선으로 클럭 주파수 동기용 2-톤 RF 신호와 PPS 시간 동기용 UWB 신호를 전송한다. RFClock 팔로워는 수신된 2-톤 RF 신호의 포락선을 추출하여 레퍼런스 클럭 주파수를 얻기 때문에 리더의 클럭 주파수가 흔들리더라도 팔로워의 클럭 주파수도 같이 흔들리기 때문에 클럭 주파수 동기가 유지된다. 모든 팔로워의 클럭 주파수 동기가 유지되더라도 그림 1과 같이 RFClock 리더와 팔로워간 거리차가 존재하기 때문에 리더에서 UWB 신

호 전송시 팔로워에 도착하는 UWB 신호간에는 거리차에 의한 도착시간차가 존재한다.

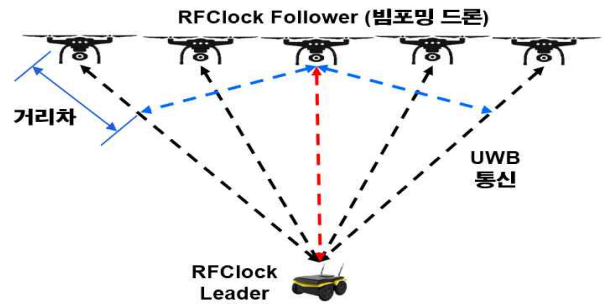


그림 1. RFClock 동기 개념도

RFClock은 GPS 거부환경에서 UWB 거리측정에 사용하는 고해상도 타임스탬프를 이용하여 리더와 팔로워간 UWB 신호 전파시간을 측정한다. PPS 시간동기는 그림 2와 같이 리더와 팔로워간 PPS 신호 상승에지의 시간차를 일치시키는 것으로, 측정된 UWB 신호의 전파시간만큼 보정하면 된다. RFClock은 식 (1)을 이용하여 리더와 각 팔로워간 시간동기오차를 측정 후 클럭 버퍼를 이용하여 보정하였다.

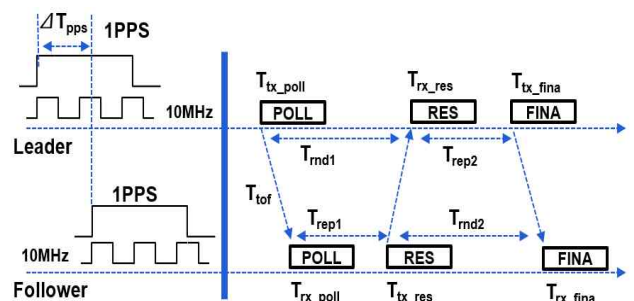


그림 2. UWB 기반의 시간동기 절차

$$\begin{aligned}\Delta T_{pps} &= \frac{(T_{rx_poll} - T_{tx_poll}) + (T_{rx_res} - T_{tx_res})}{2} \\ &= \frac{(T_{rnd1} - T_{repl})}{2} - T_{tof}\end{aligned}\quad (1)$$

본 논문에서는 식 (1)의 클럭 드리프트 영향을 분석하기 위해 식 (2)와 같이 시간동기오차 추정치와 시간동기오차의 차를 이용하였고 RFclock 리더의와 팔로워의 시간동기오차에 클럭 드리프트(δ)를 적용하였다.[3]

$$\begin{aligned}\hat{\Delta} T_{pps} - \Delta T_{pps} &= \delta_A T_{tof} + \frac{1}{2}(\delta_A - \delta_B) T_{repl} \\ \hat{T}_{rnd1} &= (1 + \delta_A) T_{rnd1}, \hat{T}_{repl} = (1 + \delta_B) T_{repl}\end{aligned}\quad (2)$$

식 (1)의 UWB 신호 시간동기오차에 영향을 미치는 주요 인자는 식 (2)에서 알 수 있듯이 응답지연시간(T_{repl})이다. 이 응답지연시간이 작을수록 오차가 작아지지만 고해상도 타임 스탬프를 메시지로 전달하기 위해서는 일정수준 이하로 줄일 수 없다. 결국 클럭 드리프트가 있을 경우 식 (1)로 전파시간을 측정한다면 응답지연시간에 의해 초단위의 시간동기오차를 유발할 수 있다.

본 논문에서는 식 (3)과 같이 UWB 신호 시간동기오차를 측정하였다.

$$\Delta T_{pps} = \frac{(T_{rnd1} \times T_{rnd2}) - (T_{repl} \times T_{rep2})}{T_{rnd1} + T_{rnd2} + T_{repl} + T_{rep2}} - T_{tof}\quad (3)$$

식 (1)과 동일한 가정하에 식 (3)의 클럭 드리프트에 의한 UWB 신호 전파시간 측정오차는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}\hat{\Delta} T_{pps} - \Delta T_{pps} &= \delta_B T_{tof} \\ \hat{T}_{rnd1} &= (1 + \delta_A) T_{rnd1}, \hat{T}_{rep2} = (1 + \delta_A) T_{rep2} \\ \hat{T}_{rnd2} &= (1 + \delta_B) T_{rnd2}, \hat{T}_{repl} = (1 + \delta_B) T_{repl}\end{aligned}\quad (4)$$

III. 시뮬레이션

합성범 형성에 참여하는 각 드론들의 시간 동기 성능을 검증하기 위하여 식 (1)과 식 (3)에 대해 시간동기오차의 차를 MATLAB으로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 및 UWB 신호 생성에 사용된 파라미터는 표 1과 같고 MATLAB으로 모의한 UWB 신호의 파형은 그림 3과 같다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

파라미터		값
신호대잡음비(SNR)		10dB(AWGN)
클럭 드리프트		-20 ~ 20ppm, 1ppm 간격
거리(리더 - 팔로워)		200m
Symbol Rate		499.2e6
Samples per Symbol		10
UWB setup	Mode	HPRF
	STS Packet Conf.	3
	PSDU Length	0

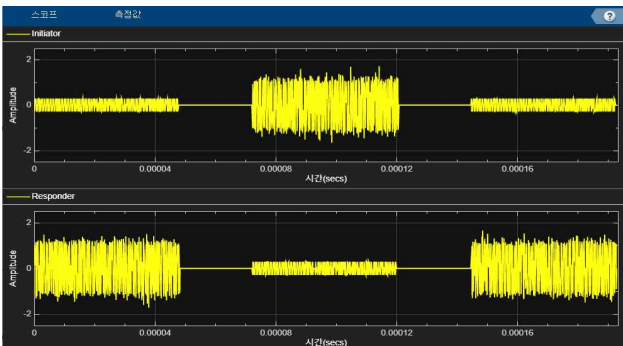


그림 3. 모의 UWB 신호

식 (1)의 경우 시간동기오차 추정치와 시간동기오차의 차는 식 (2)와 같이 클럭 드리프트, UWB 신호 전파시간 그리고 UWB 프레임 응답시간에 영향을 받는다. 식 (3)의 경우 식 (4)와 같이 클럭 드리프트와 UWB 신호 전파시간에만 영향을 받고 UWB 프레임의 응답시간에는 영향을 받지 않는다. 시뮬레이션은 응답시간을 프레임의 1.5배로 설정하였고, 리더의 클럭은 레퍼런스이기 때문에 클럭 드리프트(δ_A)가 없다고 가정하고 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 4와 같다.

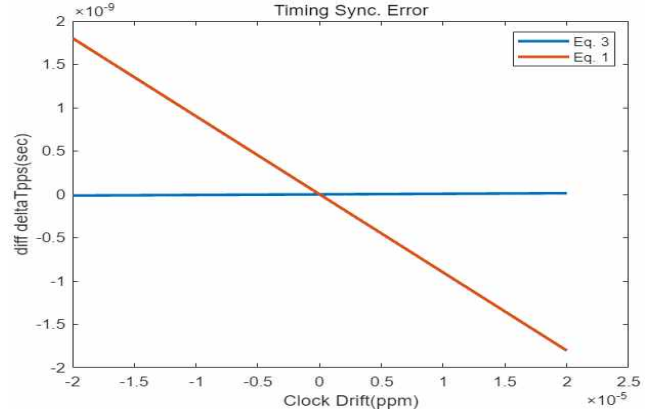


그림 4. 시간동기성능 비교

클럭 드리프트가 최대인 20ppm일 경우 식 (1)의 최대 UWB 신호 시간동기오차의 차는 1.8ns이고 식 (3)의 최대 시간동기오차의 차는 13.4ps였다. 클럭 드리프트가 발생할 경우 식 (3)이 식 (1)보다 매우 안정적인 시간동기 성능을 보임을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 다수의 드론을 이용하여 분산형 범합성 시스템을 구현할 경우 합성범 형성에 참여하는 드론들간의 거리차에 의한 PPS 신호 상승 에지들 간의 시간차를 보정하는 방법을 제시하였다. MATLAB에서 제공하는 함수들을 이용하여 UWB 신호 송수신 환경을 시뮬레이션한 결과, 클럭 드리프트가 발생할 경우 기존의 방법보다 제안된 방법이 매우 안정적인 성능을 보임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] Richard Poisel, "Introduction to Communication Electronic Warfare Systems", Artech House, pp. 491-501, 2002
- [2] Kubra Alemdar, Divashree Varshney, Subhramoy Mohanti, Ufuk Muncuk, Kaushik Chowdhury, "RFclock: Timing, Phase and Frequency Synchronization for Distributed Wireless Networks", MobiCom '21: Proceedings of the 27th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 15-27, Oct. 2021
- [3] Haige Chen, Ashutosh Dhekne, "A Metric for Quantifying UWB Ranging Error Due to Clock Drifts", 2022 IEEE 12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 5-7 Sep. 2022