

시분할다중접속 네트워크 기반의 공중 중계 기반 융합 측위 기법 및 성능 향상 연구

이 규만*, 노 홍준*, 박 형원*, 임 재성^o

Networked Airborne Relay-Based Positioning Scheme and Performance Enhancement Study Based on TDMA Networks

Kyuman Lee*, Hongjun Noh*, Hyungwon Park*, Jaesung Lim^o

요 약

본 논문은 상대항법의 성능을 개선하기 위해 공중 중계 기반 측위 기법을 시분할다중접속 네트워크에 적용하는 융합 측위 기법을 제안한다. 공중 중계 기반의 측위 기법을 시분할다중접속 환경에서 운용하기 위해서는 새로운 슬롯 할당, 중계국 선택, 항법신호 손실 시 대체 방안 등의 문제가 해결되어야 한다. 공중 중계 기반 융합 측위 기법의 서브프레임 구조는 항법신호를 방송 및 중계하는 구간과 데이터와 PPLI(Precise Participant Location Identification) 메시지를 송신하는 데이터송신 구간으로 구분되며, 방송 및 중계 구간을 연속적으로 할당함으로써 메시지 수신 동안 수신기 이동에 의한 영향을 최소화하였다. 또한, 각 기준국에서 수신한 메시지 정보를 바탕으로 추정된 공중 단말과 중심국과의 거리 정보를 이용해 서비스 지역에 고르게 분포하는 공중 단말을 중계국으로 선정한다. 마지막으로 항법신호의 손실로 인해 측위가 불가능한 경우를 대비하여 데이터송신 구간에서 수신되는 PPLI 메시지를 선택하고 이를 추정에 활용하는 방안을 제안하였다. 본 논문에서는 모의실험을 통해 제안하는 공중 중계 기반 융합 측위 기법이 상대항법 보다 높은 정확도를 보임을 확인하였다.

Key Words : Comm/Nav Integration, Airborne Relay-based, Relative Navigation, TDMA networks, Kalman filter

ABSTRACT

In this paper, we propose networked airborne relay-based positioning scheme (N-ARPS) based on time division multiple access (TDMA) networks to improve the performance of relative navigation (RelNav). To integrate the ARPS into TDMA, there are three problems such as slot allocation, selection of airborne relays, and method for signal loss to be solved. A subframe of N-ARPS is designed to assign the slots for broadcast and relay of navigation signals consecutively to minimize the effect of mobility. The selection algorithm determines the optimum set of airborne relays by selecting evenly distributed nodes depending on their distances to the master station. Finally, we uses precise position location information (PPLI) messages, which are received in data transmission period, to estimate a user position when the navigation signals are missing. The simulation results indicate that N-ARPS significantly improves user accuracy over RelNav.

* 본 연구는 LIG 넥스원의 지원으로 수행되었습니다.

※ 본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (2016R1A2A1A05005541)

♦ First Author : Department of Computer Engineering, Ajou University, mool717@ajou.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Department of Computer Engineering, Ajou University, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원

* LIG Nex1 C4I R&D Laboratory, hongjun.noh@lignex1.com, hyungwon.park@lignex1.com

논문번호 : KICS2016-11-350, Received November 11, 2016; Revised December 1, 2016; Accepted December 1, 2016

I. 서 론

위성항법시스템이 낮은 수신신호세기로 인해 주변의 인위적 또는 비인위적 간섭에 취약함에 따라 간섭에 의한 영향이 비교적 적고 보정 데이터와 같은 다수의 정보를 제공할 수 있는 통신 네트워크와 항법을 결합하고자 하는 융합 연구의 필요성이 제기 되었다¹⁾.

JTIDS(Joint Tactical Information Distribution System)의 상대항법은 대표적인 통신 네트워크와 항법이 결합된 형태로 위성항법시스템의 사용이 불가능한 상황을 대비한 보조항법 체계이다. JTIDS는 모든 사용자가 NTR(Network Time Reference)에 동기화 되어 있으며, 할당된 특정 슬롯에 메시지를 송수신하는 TDMA(Time Division Multiple Access) 기반의 통신 시스템이다. 따라서 단말은 메시지의 전파 시간인 TOA(Time of Arrival) 측정을 통해 각 단말로부터의 거리를 추정할 수 있으며, 상대항법은 이러한 거리와 상대적 위치 정보를 이용해 위치를 추정한다. 또한, 상대항법의 모든 네트워크 단말은 자신의 위치, 시각 정보 등을 포함하는 PPLI(Precise Participant Location and Identification) 메시지를 주기적으로 송신하므로 NTR 및 GRU(Ground Reference Unit)과 같은 시각 및 위치 기준 단말과 가시선이 보장되지 않는 단말에도 항법을 제공할 수 있다²⁾. 하지만 상대항법은 항법메시지를 거의 동시에 수신하는 CDMA(Code Division Multiple Access) 기반의 위성항법시스템과 달리 각 단말이 할당된 시간 슬롯에서 메시지를 송신하기 때문에 수신기가 서로 다른 위치에서 PPLI 메시지를 수신하게 되어 정확도가 저하된다³⁾. 또한, GRU와 가시선이 보장되지 않는 노드는 상대적으로 낮은 위치 품질을 가지는 단말을 기준으로 위치를 추정하기 때문에 정확도가 낮다.

미국 FAA(Federal Aviation Administration)은 위성항법시스템이 불가능한 경우 항공 시스템에 정밀하고 안전한 항법을 제공하기 위해 기존 체계인 DME(Distance Measurement Equipment)와 ADS-B(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)의 UAT(Universal Access Transceiver)를 활용하는 방안을 연구하였다. 위 연구는 UAT의 지상국과 DME 기지국에서 주기적으로 송신되는 신호를 이용해 단말과의 거리를 계산하고 위치를 추정하는 기법이다. 따라서 기존 체계의 기지국과 신호를 활용한다는 점에서 경제적이며, 항법시스템에 비해 간섭에 강한 장점을 가진다. 하지만 신호를 송신하는 기지국이 주로 낮은 고도에 위치하고 있으므로 기하학적 영향으로 인해 정확도가 높지 않으며 서비스 범위가 좁다⁴⁾.

최근에는 공중 단말의 통신 링크를 활용하는 ARPS(Airborne Relay-based Positioning Scheme)가 제안되었다. ARPS에서는 지상 기준국에서 항법신호를 송신하고 공중 중계국을 통해 사용자에게 전달한다. 수신기는 중계된 신호의 수신시간차와 전파 시간을 활용해 중계국과 사용자의 위치를 2단계에 걸쳐 순차적으로 추정한다. 위 기법은 항법신호의 중계 및 2단계 알고리즘을 사용하여 기존 위성항법시스템의 대안인 의사위성 기반 항법시스템에서 발생하는 다중경로, 모니터링 지연에 의한 오차의 영향을 감소시키고 정확도를 크게 향상시켰다. 또한, 기준국과 가시선이 보장되지 않는 단말에게도 항법을 제공할 수 있다^{7,8)}.

본 논문에서는 상대항법의 정확도를 개선하고 새로운 통신/항법 융합 체계 개발을 위해 기 제안된 ARPS를 TDMA 네트워크에 융합하는 N-ARPS (Networked ARPS)를 연구하였다. 본 연구에서는 N-ARPS 구현을 위한 슬롯 할당, 중계국 선택 방안, 신호의 손실 또는 차단 시 이를 대체하기 위한 보조 기법을 제안한다. 제안하는 슬롯 할당 방식은 메시지 수신 동안 수신기의 이동에 의한 영향을 최소화하기 위해 측위를 위한 구간인 방송 및 중계 구간을 연속적으로 할당한다. 중계국 선택 방안에서는 중심국이 각 기준국으로부터 수집된 공중 단말의 메시지 정보를 이용해 위치를 추정하고 중심국을 기준으로 서비스 지역에 고르게 분포하도록 선택한다. 마지막으로 보조 기법에서는 항법 신호의 부족 시 일반 단말로부터 수신되는 PPLI 메시지를 추가적으로 활용하여 위치를 결정하였다. 제안된 TDMA 기반 N-ARPS 성능은 모의실험을 통해 상대항법과 비교하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 II장에서는 상대항법과 ARPS에 대해 설명하며, III장에서는 ARPS를 TDMA 네트워크에 융합하기 위한 슬롯 할당, 중계국 선택 알고리즘, 보조 기법을 기술하였다. IV장에서는 제안하는 N-ARPS의 성능 평가를 위한 모의실험 환경 및 오차 모델에 대해 기술하고 모의실험 결과를 분석하였으며, 마지막으로 V장에서 결론을 맺었다.

II. 상대항법 및 중계 기반의 측위 기법

2.1 JTIDS의 상대항법

상대항법은 JTIDS에서 위성항법시스템의 불가 시 항법을 제공하기 위해 운용되는 보조항법이다. 상대항법은 그림 1과 같이 GRU, NTR, JU(JTIDS Unit)으로 구성된다. GRU는 측위의 기준이 되는 고정적이거나 이동성이 적은 단말로 주기적으로 PPLI 메시지를 송신하

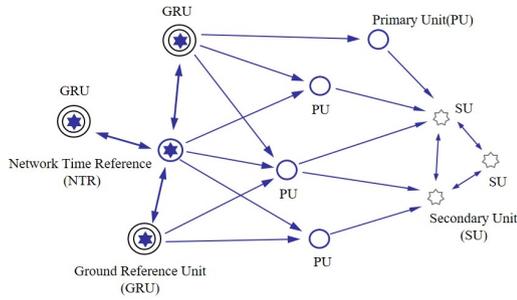


그림 1. 상대항법의 구조
Fig. 1. Structure of Relative navigation

며, 가장 높은 위치 품질을 가진다. NTR은 네트워크 시간의 기준으로 상대항법 좌표계의 원점이기도 하다. JU는 항법을 수행하는 단말로 NTR과의 가시선 여부에 따라 PU(Primary Unit)과 SU(Secondary Unit)으로 구분된다²⁾.

상대항법의 위치 추정에 사용되는 PPLI 메시지는 각 단말의 위치, 품질, 시각 정보 등을 포함하며 해당 단말의 임무, 권한에 따라 전송하는 주기가 결정된다. JTIDS는 TDMA 기반의 통신시스템으로 NTR에 동기화된 시각을 기준으로 할당된 시간 슬롯에 자신의 메시지를 송신한다. 이러한 특성으로 인해 각 단말로부터 PPLI 메시지를 수신하고 업데이트하는데 시간이 소요되며, 위 시간 동안 수신기의 이동으로 인해 PPLI 메시지를 서로 다른 위치에서 수신하므로 TOA 오차가 발생한다⁵⁾. 상대항법에서는 오차의 영향을 최소화하기 위해 플랫폼 내부에 탑재된 관성항법 장비와 칼만 필터를 사용하고 있다. 하지만 관성항법 장비의 경우 시간이 지날수록 오차가 누적되므로 위성항법장비 등을 이용해 주기적으로 보정해야 한다. 따라서 위성항법시스템이 오랜 기간 동안 불가할 경우 관성항법 장비를 이용한 보정은 신뢰도가 떨어진다³⁾. 상대항법에서는 시간 및 좌표의 기준이 되는 NTR과 가시선이 보장되지 않는 단말인 SU에게도 항법을 제공할 수 있다. SU는 인접한 PU로부터 수신한 PPLI 메시지 중 자신보다 높은 위치 품질을 가지는 메시지를 선별하고 이를 이용해 자신의 위치를 추정한다. 그러나 PU는 GRU와 같이 높은 위치 품질을 가지는 단말이 아니므로 PU를 기준으로 추정되는 SU의 정확도는 낮다.

상대항법은 각 단말의 상대적인 거리를 기반으로 위치를 추정하므로 PPLI 메시지를 생성한 단말의 위치와 시간 정확도가 측위 정확도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 PPLI 메시지에 담긴 정보를 활용하여 가장 높은 정확도를 가질 수 있는 소스를 선택하여 사용한다.

소스 선택은 다음과 같이 4단계로 이루어져 있다⁵⁾.

첫 번째는 검사 단계로 단말의 정확한 위치 추정을 위해 소스 간 거리 및 고도차, 그리고 위치 및 시간 품질 등을 비교한다. 두 번째 단계에서는 1단계에서 측정된 품질, 기하학적 위치 등의 데이터를 바탕으로 PPLI 메시지 소스를 정렬한다. 세 번째는 1, 2단계를 통해 결정된 정보를 이용해 PPLI 메시지를 선택한다. 마지막은 전처리 단계로 대기 굴절과 같은 오차의 영향을 보정한다.

2.2 공중 중계기반 측위 기법 (ARPS)

ARPS는 위성항법시스템이 불가한 경우 독립적인 지역 측위를 제공하기 위해 제안된 기법이다. 위 기법은 중심국, 기준국, 중계국, 수신기로 이루어져 있으며, 기존 항법시스템과 달리 중계국을 통해 기준국으로부터 송신된 항법신호를 중계한다⁷⁾.

중심국은 전체 시스템을 관리하는 중앙 센터로 원자 시계를 탑재하고 있어 시스템 시간의 절대적인 기준이 되며, 각 기준국과 지속적으로 메시지를 교환하여 시각 동기를 유지시킨다. 또한, 중심국은 중계국으로부터 수신된 신호를 이용하여 보정 정보를 생성한다. 기준국은 위성항법시스템의 위성과 같이 정확하게 알려진 위치와 시간정보를 바탕으로 항법신호를 생성한다. 모든 기준국은 중심국을 기준으로 서로 동기화되며 주기적으로 항법신호를 방송한다. 중계국은 기존 지상 기반의 시스템에서는 볼 수 없었던 구성요소로 bent-pipe 위성처럼 기준국으로부터 수신한 항법신호를 다른 주파수를 통해 즉시 수신기에 전달하는 역할을 한다. 마지막으로 수신기는 2단계의 측위 알고리즘을 사용하여 중계국의 위치와 수신기 자신의 위치를 동시에 추정한다.

ARPS의 측위 과정은 다음과 같이 2단계로 구성된다. 첫 번째는 항법신호의 중계 역할을 담당하는 중계

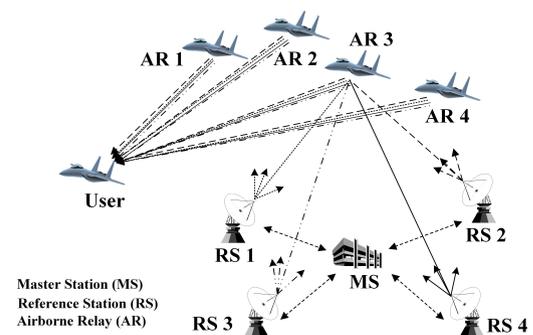


그림 2. 공중 중계 기반 측위 기법의 구성도
Fig. 2. Configuration of the airborne relay-based positioning scheme

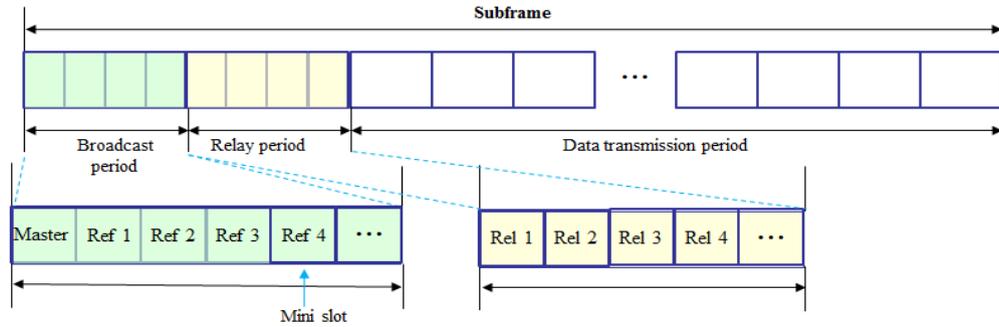


그림 3. TDMA 기반 N-ARPS의 서브프레임 구조
Fig. 3. Subframe structure of the N-ARPS based on TDMA

국의 위치를 추정하는 단계로 각 기준국에서 동시에 송신된 항법신호의 수신시간차를 이용한다. 위 단계에서 수신기는 수신시간차를 통해 중계국과 각 기준국 사이의 거리차를 계산하고 알려진 기준국의 위치를 활용하여 중계국을 추정한다. 두 번째 단계는 사용자의 위치를 추정하는 단계이다. 항법신호에는 언제 기준국으로부터 송신되었는지를 알려주는 타임스탬프가 포함되어, 사용자는 타임스탬프를 이용하여 항법신호의 전체 전파시간을 알 수 있다. 본 단계에서는 1단계에서 추정된 중계국과 기준국 사이의 거리를 계산한 후 이를 전체 전파시간에 해당하는 거리에서 제하여 중계국과 수신기 사이의 거리를 계산하고 이를 바탕으로 수신기의 위치를 추정한다.

III. TDMA 환경에서 중계 기반 측위 기법 융합

기 제안된 ARPS는 CDMA 기반으로 제안되었기 때문에 위 기법을 TDMA 네트워크에 운용하기 위해서는 몇 가지의 문제들이 해결되어야 한다. 첫 번째는 수신기가 특정 시간 슬롯에 할당된 메시지를 수신하는 동안 이동에 의해 발생하는 TOA 오차 영향을 최소화하는 것이며, 두 번째는 항법 목적의 중계국의 위치를 미리 설계하여 운용하는 기존 ARPS와 달리 TDMA 기반 N-ARPS에서는 네트워크 내 공중 단말을 중계국으로 활용하므로 전체 서비스 지역에 걸쳐 고른 정확도를 제공할 수 있는 중계국을 선택하는 알고리즘이 요구된다. 마지막으로 N-ARPS에서 항법 신호는 통신 링크를 통해 전달되므로 채널 상태에 따라 손실될 가능성이 있어 이러한 상황을 대비한 방안이 요구된다.

3.1 ARPS 융합을 위한 시간 슬롯 할당 방안

TDMA 네트워크에서는 단말이 할당된 특정 시간 슬롯에 항법신호를 송신하므로 신호의 수신 동안 수신기의 이동에 의한 TOA 오차로 인해 정확도가 저하된다. 특히 ARPS는 인접 단말로부터 PPLI 메시지를 수신하여 위치를 추정하는 상대항법과 달리 중계국을 통해 기준국으로부터 수신한 항법신호를 전달하고 이를 이용해 수신기의 위치를 추정하므로 슬롯 할당에 따른 TOA 오차의 영향이 크다. 따라서 본 논문에서는 슬롯 할당이 정확도에 미치는 영향을 최소화하도록 다음과 같이 연속적인 할당 방안을 제안하였다.

그림 3은 TDMA 네트워크에 ARPS를 융합하기 위해 제안된 서브프레임의 슬롯 할당 구조를 나타낸다. 측위 정확도 유지를 위해서는 TOA 측정치가 자주 업데이트 되어야 한다. 제안하는 프레임은 상대항법의 12초 프레임을 그림에서 보는 바와 같이 1초의 서브 프레임으로 나누어 설계하였으며 서브프레임은 방송, 중계, 데이터 송신 구간으로 나뉜다. 방송 구간은 기준국이 항법신호를 생성, 전송하고 중심국이 중계국 선택 결과를 알리는 구간이며, 중계 구간에서는 중계국이 기준국으로부터 수신한 항법신호의 수신시각 정보 및 기준국의 위치 정보를 포함한 메시지를 수신기에 전달한다. 마지막 데이터 송신 구간에서는 일반 단말이 자신의 데이터를 송신하며, 주기적으로 PPLI 메시지를 방송한다. 기존 JTIDS의 시간 슬롯은 가장 먼 거리에 위치하는 단말(약 300 NM)의 슬롯 충돌을 방지하고 데이터 수신을 보장하기 위한 가드타임을 포함하여 7.8125 ms 길이로 설계되었다. 하지만 여러 단말로부터 메시지를 수신하여 측위를 수행하는 항법에서는 넓은 범위의 송수신을 보장할 수 있는 긴 길이의 시간 슬롯이 오히려 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 이러한 이유로 항법신호 송신을 위한 방송 구간과 중계 구간은 미니슬롯으로 나뉘어 할

당되며, 미니슬롯의 길이는 기존 JTIDS와의 호환을 위해 시간 슬롯의 정수배로 결정된다. 미니 슬롯의 최소 길이는 항법신호의 안전한 수신을 보장할 수 있는 가드타임을 포함하며, 가드타입은 중계국의 고도에 따른 커버리지에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$t_{mg} = \frac{\sqrt{\left[R \left(\cos^{-1} \left(\frac{R}{R+h} \cos \alpha \right) - \alpha \right) \right]^2 + h^2}}{c} \quad (1)$$

R 은 지구의 반지름으로 6378 km이며, h 는 중계국의 고도이다. α 는 중계국과 기준국 사이의 양각이며, c 는 빛의 속도를 나타낸다.

3.2 중계국 선택 알고리즘

N-ARPS에서는 네트워크 내 공중 단말이 중계국의 역할을 대신한다. 공중 단말은 위성항법시스템의 위성 에 비해 낮은 고도에 위치하고 단말 사이의 거리가 비교적 가까워 위치에 따른 수신기의 추정 정확도가 크게 변화한다. 따라서 중계국의 역할을 하는 공중 단말을 높은 정확도를 보장할 수 있도록 선택하는 것이 중요하다.

참고문헌 [9]에 의하면 수신기를 기준으로 항법신호 송신기가 고르게 분포하며 그 중 하나의 송신기가 수신기의 수직방향에 위치할 때 높은 정확도를 제공할 수 있는 것으로 알려져 있다. 융합 측위 기법에서는 측위 구조의 중심에 위치하여 시스템을 관리하는 중심국을 기준으로 중계국을 선택하는 방안을 다음과 같이 제안하였다.

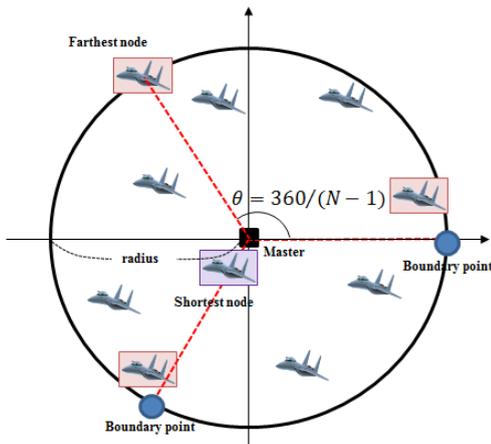


그림 4. 중계국 선택 방안 예시 (4기 선택)
Fig. 4. Example of the relay selection algorithm (four relay selection)

1. 각 기준국은 공중 단말로부터 수신한 메시지 정보를 중심국으로 전송하며, 중심국은 수신 메시지의 전파 시간을 이용해 계산된 거리를 바탕으로 공중 단말의 위치를 추정하여 중계국 후보군 리스트를 만든다.
2. 중계국 후보군의 평균 고도를 이용해 서비스 가능 범위를 계산하고 중계국 분포의 최대 반경을 계산한다.
3. 중심국을 기준으로 반경 안에 위치한 중계국 후보군들의 거리를 계산하고 가장 근거리 노드와 원거리 노드를 하나씩 선택한다.
4. 마지막 단계는 그림 4와 같이 선택된 원거리 노드를 기준으로 $360 / (N - 1)^\circ$ 만큼 떨어진 지점에 $N - 2$ 개의 경계 지점을 설정하고, 설정된 지점으로부터 가장 근거리에 있는 노드들을 나머지 중계국으로 선택한다.

3.3 측위 지속성 유지를 위한 보조 신호 선택 방안

N-ARPS는 기존 항법시스템과 달리 항공노드의 통신링크를 활용해 항법신호를 전달하고 중계 신호를 이용해 중계국과 수신기의 위치를 추정하므로 통신링크의 채널 상태에 따라 항법신호가 전달되지 않는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 항법신호의 차단 및 손실로 인해 측위가 불가능한 상황을 대비한 보조 방안이 요구된다.

N-ARPS 단말은 상대항법의 JU와 같이 네트워크 내에서 추정된 자신의 위치 정보를 PPLI 메시지를 통해 주기적으로 송신한다. 본 논문에서는 이러한 특징을 활용해 신호의 부족으로 인해 위치 추정이 불가능할 경우 부족한 수만큼의 PPLI 메시지를 추가적으로 이용하는 방안을 고안하였다. 지역항법에서 수신기와 항법신호 송신기 간의 거리가 비교적 가깝기 때문에 상대적 위치에 따라 정확도가 크게 변화한다. 따라서 어떠한 노드로부터 수신한 PPLI 메시지를 보조 기법에 이용하느냐가 중요하다. 중계국은 선택 알고리즘에 의해 중심국을 기준으로 고르게 분포하도록 선택되므로 이 원리를 이용하여 보조 PPLI 메시지의 단말을 선택하도록 다음과 같이 제안하였다.

1. 수신기는 측위 1단계를 통해 추정된 중계국들의 위치를 바탕으로 손실된 중계 신호의 방향을 판단한다.
2. 판단된 방향에서 중심국과 인접한 중계국들이 이루는 방위각을 반으로 나누어 경계 지점을 재설정한다.
3. 설정 지점으로부터 가장 가까운 단말의 PPLI 메시지 측정치를 위치 결정에 추가하여 위치를 추정한다.

3.4 수신기 위치 추정 절차

N-ARPS의 측위 절차는 기존 ARPS와 동일하게 2단

계로 구성되며, 상대항법과 같이 확장 칼만 필터를 이용해 위치를 결정하였다. 첫 번째는 중계국의 위치를 추정하는 단계로 기준국과 중계국 사이의 TOA 측정치를 기반으로 결정한다. N-ARPS는 TDMA를 기반으로 제안되었기 때문에 할당된 시간 슬롯 정보를 통해 각 항법신호의 송신시각을 알 수 있으며 이를 이용해 기준국과 중계국 사이의 의사거리를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_{r_j}^{a_i} &= [t_{r_j, a_i} - \{t_s + l_{ms} \times (n_{r_j} - 1)\}] \times c \\ &= d_{r_j}^{a_i} + b_{r_j} - b_{a_i} + \epsilon_{r_j}^{a_i} \end{aligned} \quad (2)$$

수식 (2)에서 t_{r_j, a_i} 는 j 번째 기준국으로부터 송신된 항법신호가 i 번째 중계국에 수신된 시간을 나타내며, t_s 는 서브프레임의 시작 시간을 의미한다. l_{ms} 는 방송 구간과 중계 구간에 할당된 미니 슬롯의 길이이며, n_{r_j} 는 j 번째 기준국에 할당된 슬롯 번호이다. $d_{r_j}^{a_i}$ 는 j 번째 기준국과 i 번째 중계국 사이의 실제 거리이며, b_{r_j} 와 b_{a_i} 는 각각 기준국과 중계국의 시간 오프셋을 의미한다. ϵ 는 TOA 측정치의 오차를 나타낸다.

N-ARPS에서 중계국과 수신기의 위치는 확장 칼만 필터 알고리즘에 의해 추정된다. 본 논문의 확장 칼만 필터는 PV(Position velocity) 모델을 이용하여 모델링하였으며, 중계국 위치 추정단계의 상태 벡터는 다음과 같다.

$$X = [x_{a_i}, \dot{x}_{a_i}, y_{a_i}, \dot{y}_{a_i}, z_{a_i}, \dot{z}_{a_i}, b_{a_i}, \dot{b}_{a_i}] \quad (3)$$

수식 (3)에서 $(x_{a_i}, y_{a_i}, z_{a_i})$ 는 중계국의 위치, $(\dot{x}_{a_i}, \dot{y}_{a_i}, \dot{z}_{a_i})$ 는 중계국의 속도를 나타내며, b_{a_i} 는 중계국 시간 오프셋의 변화율을 의미한다. 중계국 위치 추정을 위한 확장 칼만 필터의 시스템 모델은 다음과 같이 정의된다^[10].

$$\Phi = \text{diag}[\phi \ \phi \ \phi \ \phi], \quad \phi = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$H = \begin{bmatrix} x_{a_i} - x_{r_j} & 0 & y_{a_i} - y_{r_j} & 0 & z_{a_i} - z_{r_j} & 0 & 0 & 0 \\ d_{r_j}^{a_i} & & d_{r_j}^{a_i} & & d_{r_j}^{a_i} & & & \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Q = \text{diag}[Q_{PV} \ Q_{PV} \ Q_{PV} \ Q_{dk}], \quad R = \sigma_m^2 \times I \quad (6)$$

$$Q_{PV} = \begin{bmatrix} S_p \Delta t^3 & S_p \Delta t^2 \\ 3 & 2 \\ S_p \Delta t^2 & S_p \Delta t \\ 2 & \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$Q_{dk} = \begin{bmatrix} S_f \Delta t + \frac{S_g \Delta t^3}{3} & \frac{S_g \Delta t^2}{2} \\ \frac{S_g \Delta t^2}{2} & S_g \Delta t \end{bmatrix}$$

여기서 Φ 는 상태벡터 변이행렬, Δt 는 샘플링 간격, H 는 관측 행렬, Q 는 시스템 잡음 공분산 행렬, R 은 측정치 오차, σ_m^2 는 측정치 잡음의 분산을 나타낸다. $\text{diag}[p]$ 는 p 로 이루어진 대각행렬을 뜻하며, S_p, S_f, S_g 는 각각 백색 잡음, 시각 주파수 잡음, 시각 주파수 변화율 잡음의 스펙트럼 진폭을 나타낸다.

위 시스템 모델을 바탕으로 확장 칼만 필터는 측정치와 예측치의 차를 보상함으로써 새로운 상태 벡터와 오차 공분산 행렬을 추정할 수 있으며, 이를 통해 중계국의 위치를 결정한다. 두 번째 단계에서는 중계국과 수신기 사이에 관측된 TOA 측정치를 이용하여 수신기의 위치를 결정한다. 중계국과 수신기 사이의 관측 거리는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \rho_u^{a_i} &= [t_{r_u, a_i} - \{t_s + l_{ms} \times (N_r + n_{a_i} - 1)\}] \times c \\ &= d_u^{a_i} + b_{a_i} - b_u + \epsilon_u^{a_i} \end{aligned} \quad (8)$$

수식 (8)에서 t_{r_u, a_i} 는 수신기에서 i 번째 중계국을 통해 전달된 신호를 수신한 시각이며, N_r 은 기준국의 수이다. n_{a_i} 는 i 번째 중계국에 할당된 슬롯 번호를 의미하며, b_u 는 수신기의 시간 오프셋을 나타낸다. $d_u^{a_i}$ 는 i 번째 중계국과 수신기 사이의 계산 거리이다. 두 번째 단계는 중계국과 수신기 간의 TOA 측정치를 이용해 수신기의 위치를 추정하는 단계이므로 상태 벡터와 관측 행렬은 수식 (9)와 (10)으로 표현되며, 다른 시스템 모델은 동일하게 사용된다.

$$X = [x_u, \dot{x}_u, y_u, \dot{y}_u, z_u, \dot{z}_u, b_u, \dot{b}_u] \quad (9)$$

$$H = \begin{bmatrix} x_{a_i} - x_u & 0 & y_{a_i} - y_u & 0 & z_{a_i} - z_u & 0 & 0 & 0 \\ d_u^{a_i} & & d_u^{a_i} & & d_u^{a_i} & & & \end{bmatrix} \quad (10)$$

수식 (9)에서 (x_u, y_u, z_u) 와 $(\dot{x}_u, \dot{y}_u, \dot{z}_u)$ 는 수신기의 위치와 속도를 나타내며, b_u 는 수신기 시간 오프셋의 변화율이다.

IV. 제안 측위 알고리즘 성능 평가

본 장에서는 제안하는 N-ARPS와 상대항법의 성능을 비교하기 위한 모의실험 환경과 오차모델에 대해서 기술하며, 모의실험 결과의 비교, 분석을 통해 성능을 평가하였다.

4.1 모의실험 환경

4.1.1 모의실험 가정 사항

기준국은 유선 및 무선을 통한 다양한 시각동기 기법을 이용해 중심국과 매우 정확하게 유지할 수 있다. 따라서 본 모의실험에서는 기준국의 시간 오프셋(b_r)에 의한 영향은 없는 것으로 가정하였다^[11]. 또한, 동등한 비교와 모의실험의 복잡성을 낮추기 위해 상대항법의 수신기는 공중에 위치한 PU로부터 수신한 PPLI 메시지를 이용하여 위치를 추정하며, GRU의 PPLI 메시지는 PU의 위치 추정을 위해 사용하는 것으로 가정하였다. 마지막으로 모의실험에서 수신기는 일정한 속도와 고도로 이동하는 것으로 간주하였다.

4.1.2 모의실험 구성

구성요소의 기하학적 위치는 항법시스템의 정확도를 결정하므로 모의실험 구성 시 반드시 고려되어야 하는 사항이다. 모의실험에서 공중 단말은 네트워크 내 단말의 분포를 고려하여 90 km × 90 km 영역에 균등하게 분포하도록 생성하였으며, 고도는 9~11 km 사이에서 임의적으로 선택되었다. 기준국의 배치 반경은 공중 단말의 평균 고도인 10 km의 커버리지를 고려하여 52 km로 설정하였다. 중계국 선택의 기준이 되는 중심국은 구성 요소 배치의 중심에 있는 것으로 설정하였으며, 기준국과 중계국은 각각 최소 측위 조건을 고려하여 4기로 결정하였다. 확장 칼만 필터의 시스템 모델 변수는 각각 $\sigma_m^2 = 1$, $S_p = 1$, $S_f = 0.018$, $S_g = 0.0355$ 이며, 수신기의 초기 위치 및 속도 오차는 각각 300 m와 10 m/s로 설정하였다^[10]. 마지막으로 방송 및 중계 구간의 미니슬롯 길이는 상대항법과의 동등한 비교를 위해 JTIDS의 슬롯의 길이(7.8125 ms)로 설정하여 진행하였다. 그림 5는 위와 같이 구성된 모의 실험 환경을 보여준다.

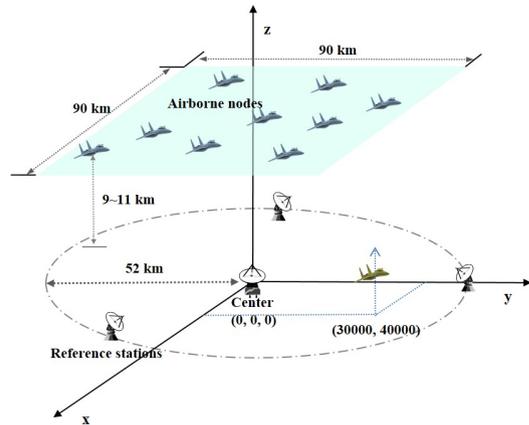


그림 5. 모의실험 구성도
Fig. 5. Configuration for simulations

4.2 오차모델

TOA 측정치는 시간 오프셋, 다중경로, 대류권 및 전리층 지연과 같은 대기권 영향, 수신기 잡음 등의 요인에 의해 오차가 발생한다. 모의실험에서는 중계국과 수신기 위치 결정에 영향을 미치는 요소로 다중경로 지연, 대류권 지연 및 수신기 잡음의 3가지 요인을 고려하였다.

대류권 지연에 의한 오차는 전 양각 범위에서 안정적인 Hopfield 모델을 사용하였다^[12]. 건조(dry)와 습윤(wet) 요소로 구성되는 대류권 지연 오차는 $m = d_{dry} + d_{wet}$ 으로 정의되며, 수식(11)과 같다.

수식 (11)에서 굴절률 N_* 은 수식 (12)에 의해 정의되며, D 는 항법신호 송신기와 수신기 사이의 경사거리를 의미한다. h_{tx} 와 h_{rx} 는 각각 송신기와 수신기의 높이, h_* 는 건조와 습윤 요소의 고정 높이 ($h_{dry} = 42.7$ km, $h_{wet} = 12$ km)를 나타낸다. P , T , f 는 각각 기압, 온도, 상대 습도를 의미한다($P = 1010.25$ mbar, $T = 291.15$ K, $f = 50\%$).

다중경로 오차는 양각 0°에서의 다중경로 지연을 발생시키는 SatNav toolbox를 이용하였다. SatNav toolbox에 의해 생성된 오차는 의사거리 측정치에 적용하기 전 $M = (1 - \frac{\tan^{-1}\alpha}{\tan^{-1}(\pi/2)})$ 에 의해 크기가 조정되며, 여기서 α 는 항법신호 송신기와 수신기 사이의 양각이다. 수신기 잡음은 정규 분포를 따르는 임의의 수($n \sim N(0,1)$)에 신호의 형태에 따른 표준편차를 곱하여 생성하였다^[13].

4.3 모의실험 결과

제안하는 N-ARPS의 성능을 평가하기 위해 MATLAB을 통한 모의실험을 진행하였다. 첫 번째 모의실험에서는 상대항법과 N-ARPS의 선택 알고리즘에 따른 정확도를 분석하였다. 두 번째 모의실험에서는 수신기의 고도와 배치 중심으로부터의 거리에 따른 수신기의 정확도를 평가하였다. 마지막으로 항법신호 손실로 인해 보조 방안을 사용할 경우 위치 추정 정확도에 미치는 영향을 분석하는 모의실험을 진행하였다.

4.3.1 선택 알고리즘 비교

상대항법의 소스 선택 알고리즘과 N-ARPS의 중계국 선택 알고리즘은 수신기의 위치 추정 결과와 밀접한 관련이 있다. 본 모의실험에서는 선택 알고리즘에 의해 선택된 PU 또는 중계국과 수신기 사이의 기하학적 분포 관계에 따른 정확도를 비교하였다.

표 1은 선택 알고리즘에 따라 4기의 PU 또는 중계국을 선택하였을 경우 수신기의 위치에 따른 PDOP (Position Dilution of Precision)을 비교한 결과이다. PDOP는 3차원 측위의 정확성을 보여주는 값으로 결과에서 확인할 수 있듯이 수신기가 중심국의 근처에 위치한 경우에는 상대항법에 근접한 정확도를 보이나 중심으로부터 벗어날수록 정확도의 저하가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 상대항법의 소스 선택 알고리즘은 각 단말로부터 수신한 PPLI 메시지 정보를 이용하여 수신기에 최소의 DOP 값을 보장하는 PU를 선택하는 반면 N-ARPS의 알고리즘은 중심국을 기준으로 서비스 지역에 골고루 분포하도록 중계국을 선택하였기 때문이다. 하지만 이러한 알고리즘의 차이에도 불구하고 N-ARPS의 선택 알고리즘이 최소를 보장하는 상

표 1. 수신기 위치에 따른 PDOP 비교
Table 1. Comparison of PDOP according to the position of a user

| | RelNav | N-ARPS |
|----------------------------------|--------|--------|
| Good geometry (10, 10, 10) | 2.912 | 2.991 |
| Poor geometry (30000, 20000, 10) | 2.975 | 3.078 |

대항법의 알고리즘에 비해 크게 저하되지 않음을 확인하였다.

4.3.2 정확도 비교

두 번째 모의실험에서는 수신기의 고도와 배치 중심으로부터의 거리에 따른 수신기의 정확도를 비교하였다. 모의실험에서 PU와 중계국은 첫 번째 모의실험과 동일하게 선택 알고리즘을 이용하여 임의 생성된 공중 단말들 중에서 선정하도록 하였으며, PU와 중계국은 임의 선택된 방향을 향해 50 m/s 속도로 일정한 고도를 유지하며 이동하는 것으로 설정하였다.

그림 6은 사용자의 수평 위치가 (30000, 40000)일 때 고도에 따른 RMS(Root Mean Square) 오차를 비교한 것이다. 결과에서 확인할 수 있듯이 N-ARPS는 프레임 초기에 항법신호의 전송을 위한 방송 및 중계 구간을 연속적으로 할당함으로써 항법신호 수신 동안 이동에 의한 TOA 오차를 감소시켰기 때문에 수신기의 정확도가 상대항법에 비해 향상된다. 또한, 수신기의 고도가 증가할수록 PU 또는 중계국과의 거리가 가까워지고 비슷한 평면에 위치하게 되므로 기하학적 요인에 의한 오차가 증가함을 확인하였다.

그림 7은 기준국과 중계국이 배치된 중심으로부터의 거리에 따른 수신기 오차를 비교한 결과이다. 앞서 언급하였듯이 N-ARPS의 선택 알고리즘은 중심에 위치

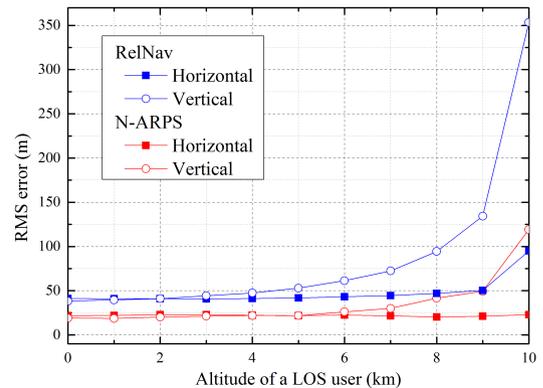


그림 6. 수신기 고도에 따른 정확도 비교
Fig. 6. Accuracy comparison according to a user altitude

$$d_* = \frac{10^{-6}}{5} \times N_* \times D \times \left(\left(1 - \frac{h_{rx}}{h_*} \right)^5 - \left(1 - \frac{h_{tx}}{h_*} \right)^5 \right) \times \frac{h_*}{h_{rx} - h_{tx}}, \quad * \in [dry, wet] \quad (11)$$

$$N_{dry} = 77.6 \times \frac{P}{T}, \quad N_{wet} = 22770 \times \frac{f}{T^2} \times 10^{\frac{7.4475 \times (T-273)}{T-38.3}} \quad (12)$$

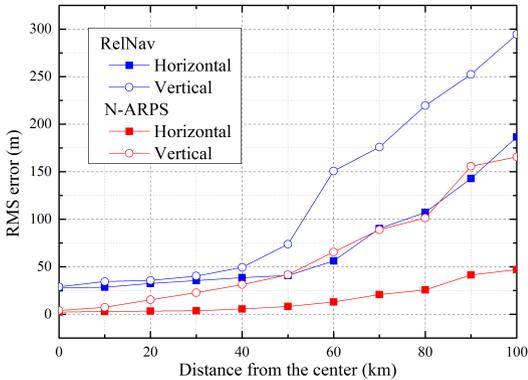


그림 7. 중심으로부터 거리에 따른 정확도 비교
Fig. 7. Accuracy comparison according to the distance from the center

한 중심국을 기준으로 중계국을 선택하므로 수신기가 중심에서 멀어질수록 기하학적 요인의 저하로 인해 오차가 증가한다. 그림에서 볼 수 있듯이 선택 알고리즘의 제한에도 불구하고 N-ARPS는 비교적 넓은 지역에 고른 분포의 정확도를 제공할 수 있음을 확인하였다.

4.3.3 보조 기법의 정확도 영향 분석

N-ARPS에서는 항법신호의 손실 또는 차단으로 인해 부족한 경우 데이터송신 구간에서 수신한 PPLI 메시지를 추가적으로 활용하는 보조 기법을 운용한다. 수신기는 이 기법을 통해 측위 지속성을 유지할 수 있으나 PPLI 메시지의 TOA 측정치 오차로 인해 위치 추정 정확도가 영향을 받는다. 본 모의실험에서는 보조 기법의 영향을 분석하기 위해 중계 신호 중 하나의 신호가 손실된 것으로 가정하고 데이터 송신 구간에서 수신된 PPLI 메시지를 위치 결정에 이용할 경우의 수신기 오

차를 평가하였다.

그림 8은 (30000, 20000, 3000)에 위치한 수신기가 정상적으로 위치를 추정할 경우와 보조 기법을 통해 추정했을 경우의 ENU(East, North, and Up) 오차를 비교한 결과이다. 결과에서 확인할 수 있듯이 보조 기법을 사용하게 되면 데이터 송신 구간에서 수신된 PPLI 메시지를 측위에 활용하게 되므로 PPLI 메시지 수신 동안 수신기의 이동에 의한 TOA 오차가 위치 정확도를 저하시킴을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 상대항법의 성능을 개선하기 위해 제안된 ARPS를 TDMA 네트워크에 융합하는 N-ARPS (Networked ARPS)를 제안하였다. ARPS를 TDMA 네트워크에서 운용하기 위해서는 슬롯 할당, 중계국 선택, 항법신호 손실 시 대안 등이 해결되어야 한다. N-ARPS의 서브프레임 구조는 상대항법에서 PPLI 메시지 수신 동안 수신기 이동에 의한 오차 증가 문제를 최소화하기 위해 항법신호를 방송 및 중계하는 구간을 프레임 초기에 연속적으로 할당한다. 또한, 중심국을 기준으로 공중 단말과의 거리 정보를 고려하여 서비스 지역에 고르게 분포하는 공중 단말을 중계국으로 선정함으로써 높은 정확도를 유지하도록 하였다. 마지막으로 항법신호의 손실에 의한 측위 불능의 경우를 대비하여 데이터 송신 구간에서 수신한 PPLI 메시지를 선택적으로 위치 추정에 활용하도록 제안하였다. 모의실험을 통하여 제안하는 N-ARPS가 동일한 환경에서 상대항법에 비해 높은 정확도를 보장할 수 있음을 확인하였다. 위 결과를 통해 기 제안된 ARPS를 다양한 기존 통신 네트워크에 융합하여 적용한다면 위성항법시스템이 불가능한 환경에서도 정밀한 항법을 제공할 수 있음을 검증하였다.

References

[1] J. McNeff, "Changing the game changer - The way ahead for military PNT," *Inside GNSS*, vol. 5, pp. 44-51, 2010.
 [2] W. R. Fried, "Principle and simulation of JTIDS relative navigation," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 14, pp. 76-84, 1978.
 [3] K. Kim, K. Lee, and J. Lim, "Alternative scheme of INS-Dependent positioning for relative navigation without GRUs," *J. KICS*,

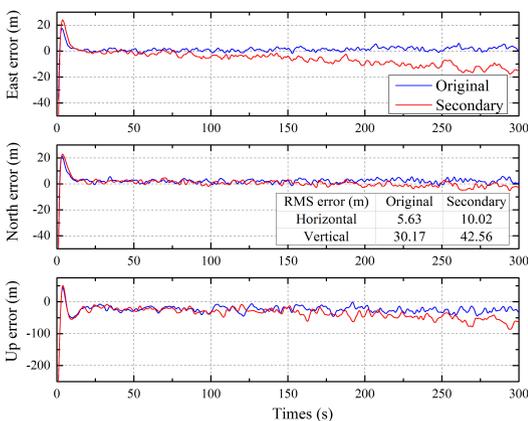


그림 8. 수신기의 ENU 오차
Fig. 8. ENU(East, north, and up) errors of the user

vol. 40, pp. 2520-2527, Dec. 2015.

- [4] M. Kayton and W. R. Fried, *Avionics navigation systems*, 2nd Ed., John Wiley & Sons: New York, 1997.
- [5] J. F. O. Ranger, "Principles of JTIDS relative navigation," *J. Navigation*, vol. 49, pp. 22-35, 1996.
- [6] L. Eldredge, P. Enge, M. Harrison, R. Kenagy, S. Lo, R. Loh, and R. Niles, "Alternative positioning, navigation & timing (PNT) study," *Int. Civil Aviation Organization Navig. Syst. Panel (NSP), Working Group Meetings*, Montreal, Canada, 2010.
- [7] K. Lee, H. Noh, and J. Lim, "Airborne relay-based regional positioning system," *Sensors*, vol. 15, pp. 12682-12699, 2015.
- [8] K. Lee and J. Lim, "A positioning algorithm using virtual reference for accuracy improvement in relay-based navigation system," *J. KICS*, vol. 40, pp. 2102-2112, Oct. 2015.
- [9] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance*, 2nd Ed., Ganga-Jamuna Press: Lincoln, MA, USA, 2006.
- [10] R. G. Brown and P. Hwang, *Introduction to random signal and applied Kalman filtering*, 4th Ed., John Wiley & Sons, 2012.
- [11] J. W. Kim and D. S. Eom, "TDoA-Based practical localization using precision time-synchronization," *J. KICS*, vol. 38C, pp. 141-154, Feb. 2013.
- [12] J. J. Wang, J. Wang, D. Sinclair, L. Watts, and H. K. Lee, "Tropospheric delay estimation for pseudolite positioning," *J. Glob. Position Syst.*, vol. 4, pp. 106-112, 2005.
- [13] E. Kaplan and C. Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2nd Ed., Artech House 2005.

이 규 만 (Kyuman Lee)



2011년 2월 : 아주대학교 전자공학과 학사
 2011년 3월~현재 : 아주대학교 컴퓨터공학과 석박사통합과정 <관심분야> 위치인식, 신호원 추적, 전술데이터링크

노 흥 준 (Hongjun Noh)



2008년 2월 : 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학과 학사
 2015년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학과 박사
 2015년 3월~현재 : LIG넥스원 <관심분야> 위성통신, 지상/위성 통합 네트워킹, 이동통신

박 형 원 (Hyungwon Park)



2003년 2월 : 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학과 학사
 2005년 2월 : 아주대학교 정보통신공학과 석사
 2009년 8월 : 아주대학교 정보통신공학과 박사
 2009년 9월~현재 : LIG넥스원 <관심분야> 전술데이터링크, 군 위성통신, 이동통신

임 재 성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자공학과 학사
 1985년 2월 : KAIST 영상통신 석사
 1994년 8월 : KAIST 디지털통신 박사
 1998년 3월~현재 : 아주대학교 소프트웨어융합학과 정교수
 <관심분야> 이동통신, 무선네트워크, 국방전술통신