Journal of the KIMST, Vol. 21, No. 5, pp. 640-648, 2018
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2018.21.5.640

Research Paper 정보 · 통신 부문

무인수상정 해상무선통신 거리 적응적 동기화 설계 및 구현

박현성*,1) · 김태현1) · 곽상열1) · 노우영2) · 오지명2)

1) 국방과학연구소 제6기술연구본부
2) LIG넥스원㈜ 통신연구센터

A Design and Implementation of Range Adaptive Time Synchronization on USV Maritime Wireless Communication

Hyunsung Park*,1) · Taehyeon Kim1) · Sangyell Gwak1) · Wooyoung Noh2) · Jimyung Oh2)

1) *The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*
2) *Communication R&D Lab, LIG Nex1, Korea*

(Received 2 April 2018 / Revised 8 June 2018 / Accepted 10 August 2018)

ABSTRACT

Time division wireless communication in tactical MANET is attractive to deliver both high data rates and long-range coverage, and to provide scheduled QoS to mission participants. This paper is about the time synchronization issue of multi-mission USV in tactical MANET. As USV communication coverage becomes longer, the synchronization error also becomes higher; therefore, which results in link disconnection, and consequent failures of reconnection because base station cannot configure necessary parameters over long-distant terminal. We propose a range adaptive time synchronization method to compensate for synchronization errors. The issue of long-range time synchronization problem was identified during maritime communication tests, and we verified the proposed method through analyses of both indoor and outdoor test results.

Key Words : 무인수상정(USV), 해상무선통신(Maritime Wireless Communication), 동기화(Synchronization), 시분할 이중통신(TDD), 시분할 다중접속(TDMA)

1. 서 론

전술 MANET(Tactical Mobile Ad-hoc Network) 네트워크에서 시분할 이중통신(TDD; Time Division Duplex), 시분할 다중접속(TDMA; Time Division Multiple Access) 방식은 제한된 주파수 자원을 효과적으로 사용하고 장거리 통신에 유리하며 시간 자원을 스케쥴링하여 작전에 참가하는 통신단말의 계획된 QoS(Quality of Service)를 수행할 수 있다는 측면에서 장점을 가진다. 이는 임의적인 경쟁(Contention)을 기반으로 하는 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Contention Avoidance) 방

* Corresponding author, E-mail: hspark@add.re.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

식을 사용하는 Wi-Fi 기반의 통신 방식에 비하여 전술 MANET에 QoS를 보장하기에 더 적합하다고 할 수 있다[1-3]. 본 논문은 TDD/TDMA 기반의 시분할 통신을 수행하는 복합임무 무인수상정(MMUSV; Multi-Mission Unmanned Surface Vehicle)의 전술 MANET에서 다수의 단말과 기지국 간의 동기화 문제에 관한 것이다. 무인수상정의 해상무선통신 거리가 증가함에 따라 기지국과 단말 간 TDD/TDMA 방식의 전송지연이 비례하여 증가한다. 이로 인하여 단말과 기지국 간의 통신이 단절될 수 있고, 단절이 되었을 경우 동기 오차에 의하여 재접속이 불가능한 문제가 발생할 수 있다. 본 논문은 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 전송 지연으로 발생하는 동기화 오차를 보정할 수 있는 거리 적응적 동기화 방안을 제안한다.

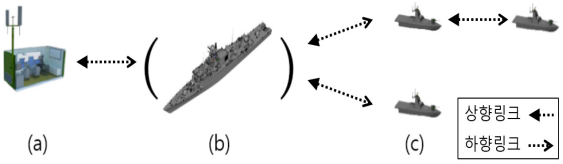

Fig. 1. Concept of USV maritime wireless communication

Fig. 1은 복합임무 무인수상정의 해상무선통신 과정을 표현하였다. (a)는 육상 고지대에서 운영하는 통신 기지국이 위치한 원격통제소이다. (b)는 원격통제소가 탑재될 수 있는 함정으로 모함(Mother ship) 이다. (a)는 하나 이상의 원격통제소가 다수의 지점에서 서로 연결되어 운용될 수 있으며 (a)는 (b)에 탑재되어 운영될 수도 있다. 따라서 (b)는 기지국 간의 중계 역할이 가능하며 독자적으로도 운용 가능하다. (c)는 통신 단말기가 탑재된 하나 이상의 무인수상정이다. 무인수상정은 기지국과 1대 다의 연결이 가능하며, 중계 역할을 수행할 수 있으므로 멀티홉(Multi-hop)으로 연결될 수 있다.

무인수상정의 통신장치는 기지국의 기준 시간에 맞추어 단말기가 동기화를 수행한다. 하향링크(Downlink) 시간동기화는 기지국이 전송하는 기준신호를 단말기가 수신하고 수신시점에 맞추어 단말기의 동작 타이밍을 조정하는 방식으로 시간동기화를 수행한다. 반면 상향링크(Uplink)는 단말기가 전송하는 기준신호를 기지국이 수신할 수는 있으나 기지국이 동작 타이밍을 조정하지는 않는다. 따라서 기지국은 자체 동작 타이밍과 단말기 전송 기준신호 수신시점 간의 오차를 계산하여 단말기에게 알려주고, 단말기는 오차를 보정하여 동작 타이밍을 기지국 기준으로 맞춘다.

기지국에서는 단말기가 전송하는 기준신호를 검출할 때 기지국의 동작 타이밍을 중심으로 특정 크기의 검출 윈도우(Observation Window)를 설정하고 그 안에 도착한 단말기 전송 기준신호와 타이밍 오차를 계산한다. 만약 전송된 기준신호와의 타이밍 오차가 기준신호의 검출 윈도우를 벗어날 정도로 크다면 기지국은 단말기의 기준신호를 검출할 수 없다. 본 논문에서는 장거리 해상무선통신 과정에서 타이밍 오차가 기준신호 검출 윈도우를 벗어날 정도로 클 경우에 기지국이 단말기의 기준신호를 검출할 수 없는 문제를 식별하였고, 이를 해결하기 위한 거리 적응적인 동적 TDD/TDMA 동기화 방안을 제안한다.

본 논문의 이후 구성은 다음과 같다. 2장에서는 TDD/TDMA의 동기화 방식에 대한 관련 연구들을 살펴보고 본 논문의 문제의식과 차이점을 기술한다. 3장에서는 복합임무 무인수상정의 운용 특성을 반영한 TDD/TDMA 기반의 해상무선통신 동기화 설계와 구현 방식에 대해 기술한다. 또한 2차례의 해상시험을 통하여 본 논문에서 제기한 장거리 해상무선통신 과정에서 발생한 재접속 문제를 식별한 과정에 대하여 기술하였다. 4장에서는 장거리 해상무선통신 과정에서 재접속 문제를 극복할 수 있는 동기화 방법을 제안하고 검증한다. 5장에서는 본 논문을 마무리하고 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 배경 및 관련 연구

TDD, TDMA와 같이 시분할 기반의 시간 동기화를 필요로 하는 방법은 크게 GPS 수신기와 같은 외부장치를 이용하는 Out-band 방식과 별도의 외부장치 없이 통신채널 내에서 자체적으로 해결하는 In-band 방식으로 나눌 수 있다. 본 논문의 복합임무 무인수상정의 기지국들 간에는 GPS 신호를 수신하고 GPS의 1PPS (Pulse Per Second)를 이용하여 시간동기를 주기적으로 교정하는 Out-band 방식을 사용하는 반면, 기지국과 단말 간에는 Pairwise 방식으로 오차를 보정하는 In-band 방식을 사용한다. 관련 연구들에 의하면 TDD, TDMA의 매체접속제어(MAC; Media Access Control) 프로토콜은 멀티 홉 환경에서 μs 수준의 동기화를 보장해야

하는 것으로 알려져 있다[2,3].

기존 In-band 방식의 연구에서 네트워크 시간 동기화 과정은 두 단말 간에 오차를 보정하는 과정과 멀티홉 네트워크 전체를 동기화하는 두 과정으로 구분된다. 두 단말 간에 오차를 보정하는 과정은 패킷 교환방식에 따라서 다시 Pairwise와 One-way로 구분할 수 있다. Pairwise 동기는 동기를 맞추려는 단말과 기준 단말 간에 동기 패킷을 교환한 후, 동기 패킷에 포함된 Timestamp를 사용하여 오차를 계산하여 보정하는 방식이다. 이 방식은 전송 지연으로 발생하는 오차를 보정할 수 있다. 반면 One-way 동기는 송신 단말이 동기 패킷에 Timestamp를 실어 보내고 수신 단말이 자신의 시간에 Timestamp를 적용하는 방식으로, 패킷을 한 번만 전송해도 되지만 단방향에 대한 경로지연(Path loss) 오차가 발생 한다[3]. 본 논문은 두 단말 간의 시간 오차를 보정하기 위하여 Pairwise 동기를 사용하였다.

시간동기화 방식은 기지국을 중심으로 단말이 동기화하는 중앙집중식 방식과 모든 단말이 Ad-hoc 환경에서 분산되어 서로 동기화하는 방식으로도 분류할 수 있다. 분산구조의 시간 동기화 방식에서 전송거리를 고려한 연구 중의 하나인 [4]는 통신거리를 제한한 상태에서 TDMA를 위한 동기화 방법을 제안하였다. 본 논문은 거리 제한없이 적용할 수 있는 중앙집중형의 TDD/TDMA 동기화 방법을 제안한다. 육상 혹은 모함에 위치한 기지국을 중심으로 임무를 수행하는 무인수상정 단말들의 전술 MANET은 상대적으로 적은 수의 단말들이 중앙집중식 동기화를 수행하므로 다수의 단말들로 구성되는 [4]의 분산식 동기화 방법과는 구조적인 차이를 가진다.

많은 수의 센서 노드들이 존재하고 노드의 전력 사용 제한을 고려하는 Ad-hoc 환경에서 무선 센서 네트워크 단말의 동기화에 대한 관련 연구들은 [5]에서 비교하여 소개하고 있다. 무인수상정이 구성하는 네트워크와 비교하였을 때 노드는 멀티홉을 고려하지만 그 수가 상대적으로 매우 적고 전력 사용에 대한 제한이 없다.

Wi-Fi의 대중화에 힘입어 하드웨어 가격이 저렴해진 상용 Wi-Fi 제품을 기반으로 원래의 Wi-Fi 표준의 근거리 네트워크(WLAN; Wireless Local Area Network) 설계 의도와는 다르게 장거리 무선통신을 위한 WiLD (WiFi-based Long Distance) 연구가 활발하다[6]. WiLD 관련 연구들 중 [7-11]은 모두 TDMA 방식을 사용하여 수십 km 거리를 연구 대상으로하여 본 연구와 유사성이 높으나 장거리 무선통신으로 발생할 수 있는 시간 동기화 문제에 대하여 직접적인 문제 제기를 하고 있지는 않다. 또한 본 연구는 Mobile WiMAX(IEEE 802.16e[12])에 기반한 PHY와 MAC을 자체적으로 개발하여 사용하므로 상용 하드웨어를 사용하는 WiLD 연구의 범주와는 직접적인 관련이 적다.

Mobile WiMAX는 직교주파수 분할다중접속(OFDMA; Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) 방식과 TDD를 사용하는 대표적인 상용통신 중 하나이다. 이 중 단말의 네트워크 진입을 위한 초기 타이밍 알고리즘이 [13, 14]에서 제시되어 IEEE 802.16e(Mobile WiMAX) 표준 제정에 많은 영향을 끼쳤다. 본 논문은 Mobile WiMAX의 초기 타이밍 알고리즘에 기반하여 장거리 해상무선통신 과정에서 단말기의 기준신호를 검출하기 위한 거리 적응적인 동적 TDD/TDMA 동기화 방안을 제안한다.

3. 설계 및 해상시험

복합임무 무인수상정의 해상무선통신의 설계는 Mobile WiMAX(IEEE 802.16e) 표준을 기반으로 하였다. 표준에서 명시된 전체 규약(Protocol) 중 복합임무 무인수상정의 해상무선통신에 관한 제안요구사항(RFP; Request for Proposal)을 충족하는데 필요한 규약에 한하여 재설계하여 구현하였다. 설계에 대한 검증은 실내 실험실과 야외 해상시험을 통하여 다양한 환경 하에서 성능 검증을 수행하였다.

3.1 시간 동기화 방식과 프레임 구조 설계

기지국과 단말의 시간 동기화 과정에서 In-band 방식을 사용한 이유는 GPS 교란의 영향을 고려하였기 때문이다. 만약 GPS 교란으로 인하여 기지국과 단말이 GPS 신호를 수신하지 못할 경우 시간 동기화가 수행되지 못하여 단말들이 기지국과 접속이 불가능한 상황이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 단말들이 기지국의 기준신호에 동기를 맞출 수 있는 In-band 방식으로 설계하였다. 즉 GPS 교란으로 인하여 기지국과 단말이 GPS 신호를 원활히 수신할 수 없는 상황에서도 단말들이 기지국을 중심으로 동기화가 가능하여 통신의 연결을 유지할 수 있도록 설계되었으며, 이는 기지국 단위로 독자적인 전술 임무 수행이 가능

하게 한다.

Fig. 2는 복합임무 무인수상정의 무선통신을 위한 프레임 구조를 보여준다. 복합임무 무인수상정은 TDD/TDMA를 사용하며 주파수 자원의 사용 효율을 높이기 위하여 직교 주파수 채널 다중화(OFDM; Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) 방식으로 설계하였다.

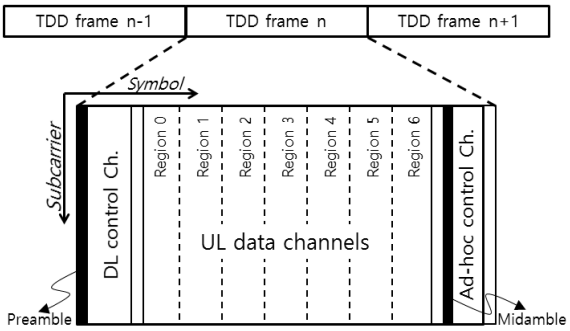

Fig. 2. Design of USV wireless communication frame structure

IEEE 802.16e 표준의 경우 MAN(Metropolitan Area Network)의 범주에 속하므로 기지국으로부터 단말들 간의 일대다 중거리 통신을 목표로 한다. 따라서 WiMax 단말은 중계(Relay) 기능을 수행하지 않으며 Ad-hoc 환경과 같은 무선 메쉬 네트워크(Wireless Mesh Network)를 구성할 수 있는 기능을 제공하지 않는다. 하지만 복합임무 무인수상정의 단말은 중계 기능을 수행할 수 있도록 PHY와 MAC을 자체적으로 개발하였으므로 하나 이상의 무인수상정들이 무선 메쉬 네트워크를 구성할 수 있도록 하였다. 이를 위한 Ad-hoc 제어 채널은 Fig. 2의 상향링크(UL) 다음에 위치하도록 하였다.

3.2 하향링크 시간 동기화 설계

하향링크(DL)의 시간 동기화를 위한 기준신호(Reference Signal)는 DLCCH(Downlink Control Channel) 직전의 OFDM 심벌(Symbol)에 위치하는 Preamble을 사용하였다. Preamble은 다수의 OFDM Subcarrier에 랜덤 코드(Random code)를 채운 형태를 가진다. 또한 Preamble은 시간 도메인(Time domain) 상에서 동일한 샘플 주기를 반복하는 특성을 가진다.

Fig. 3은 하향링크의 시간동기화 구조에서 기준신호로 사용하는 Preamble을 단말이 탐색하는 과정을 나타낸다. Preamble이 가지고 있는 특성을 이용하면 Preamble의 전송 여부 및 전송 위치의 확인이 가능하다. 먼저 Preamble을 빨리 탐색하기 위한 전단계(Coarse detection)로써 시간 도메인의 반복 특성을 이용한 자동교정(Auto-correlation) 및 최고 에너지(Peak energy) 탐색을 수행한다. 그 다음 단계는 세밀하게 탐색(Fine tuning) 하는 단계로써 랜덤 코드(Random code)의 특성을 이용한 교차교정(Cross-correlation) 및 최대 에너지(Maximum energy) 탐색을 수행 한다[15]. 이렇게 2단계 과정을 거치면서 단말은 Preamble 위치를 중심으로 프레임 시작 위치 결정할 수 있다. Preamble의 탐색에 성공한 단말은 프레임의 시작 위치를 가리키는 동작 신호(Enable signal)와 펄스 신호(Pulse signal)를 발생시키고 프레임 시작 위치를 기준으로 내부 샘플 카운터를 초기화 한다.

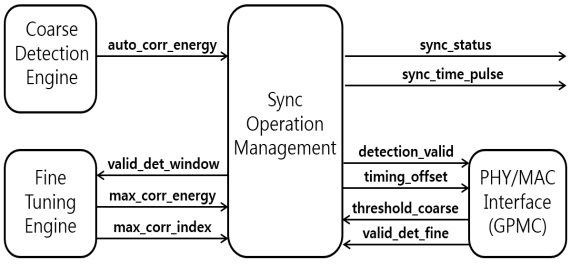

Fig. 3. Downlink time synchronization procedure

3.3 상향링크 시간 동기화 설계

상향링크(UL)의 시간 동기를 위하여 기지국과 단말기 또는 Ad-hoc 연결 상태에서 중계(Relay)를 수행하는 (상위)단말기와 (하위)단말기 사이에서는 Pairwise 방식으로 Handshaking을 수행한다. 하위 단말기는 하향링크 시간 동기화 결과를 기준으로 AHCCH(Ad-hoc Control Channel) 직전의 OFDM 심벌(Symbol)에 위치하는 기준신호인 Midamble을 전송한다. 기지국 또는 (상위)단말기는 전송된 Midamble을 수신하여 자체 동작 타이밍과 Midamble 수신시점 사이의 타이밍 오차를 계산하여 RTD(Round Trip Delay)를 산출한 후 산출 결과를 다시 (하위)단말기에 전송하여 상향링크 타이밍을 보정하도록 한다.

상향링크에서 기지국과 단말기 사이의 타이밍 오차는 기지국과 단말기 간의 거리에 따른 경로지연($RTD = 2T_D$)으로부터 비롯된다. 즉 기지국과 단말기 사이의 거리가 증가할수록 타이밍 오차는 함께 증가하며

거리가 일정수준 이상 커지면 Midamble 수신시점이 기지국의 검출 윈도우 범위를 벗어나 단말기의 접속이 불가능하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법은 단말기 전송 기준신호의 초기타이밍(Initial Timing)을 변경하는 것이다. 거리에 의한 경로지연을 고려하여 기준신호의 전송시점을 미리 당겨주면 기지국과 단말기 간의 거리가 증가하여도 기지국의 검출 윈도우 안에 기준신호가 수신될 수 있다.

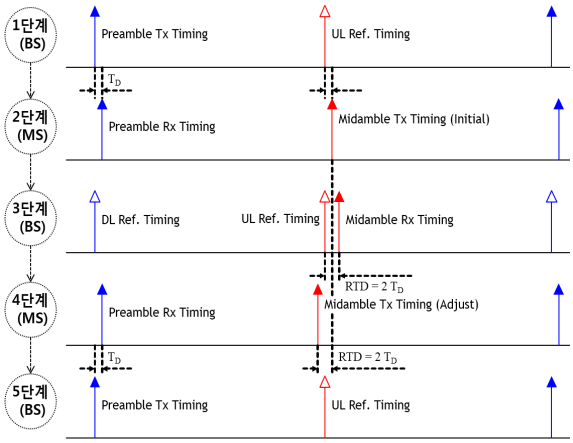

Fig. 4. Initial timing of uplink time synchronization

Fig. 4는 상향링크의 초기타이밍 설정 과정을 1단계부터 5단계 순으로 도식하였다. 1단계에서 기지국(BS; Base Station)이 전송한 Preamble로부터 T_D 만큼 경로지연이 발생하고, 2단계에서 단말기(MS; Mobile Station)는 경로지연(T_D)이 반영된 시점에 Preamble을 수신하고 동시에 Midamble의 초기 전송시점에 경로지연이 반영된다. 3단계에서 기지국(BS)은 자체 동작 타이밍과 Midamble 수신시점 사이의 타이밍 오차를 측정하여 RTD를 산출하고 그 결과를 단말기(MS)에게 전달하고, 4단계에서 단말기(MS)는 기지국(BS)로부터 RTD 값을 전달받아 현재 전송시점에서 왕복지연시간만큼 프레임 전송시점을 앞당겨 전송한다. 왕복지연시간을 반영한 이후로 5단계에서는 타이밍 오차가 보정되어 상향링크의 초기타이밍 설정과정이 완료된다.

기지국과 단말기 사이의 거리 증가에 따른 문제점 해결하기 위하여 2단계에서 설정하는 Midamble 초기 전송시점을 기지국 단말기 간 거리를 감안하여 미리 당겨준다. 그 결과로 3단계에서 기지국이 측정하는 자체 동작 타이밍과 Midamble 수신시점 사이의 타이밍 오차는 거리에 따른 RTD보다 작아지고 Midamble 수신시점을 기지국의 검출 윈도우 범위 안으로 포함시킬 수 있다.

상향링크의 초기타이밍 설정에 성공한 기지국은 단말의 위치가 이동함으로 변경되는 Midamble 수신 시점으로부터 지속적으로 Observation window의 Offset을 조정(Ranging)함으로써 상향링크의 동기화가 완성된다.

3.4 기준신호 검출을 위한 초기타이밍 설정 문제

무인수상정의 장거리 해상무선통신 과정에서 기준신호를 검출하기 위한 초기타이밍을 어느 정도 설정하는 것이 적절한가라는 질문에서 본 논문의 문제의식이 시작되었다. 만약 기지국과 단말기 간의 거리를 항상 예측할 수 있다면 시간동기화의 타이밍 문제는 없어진다. 하지만 기지국과 단말기 간의 거리를 항상 예측하기는 어렵다. 예를 들면 일시적인 정전에 의하여 해상에서 통신 단말의 전원이 꺼졌다가 리부팅 된 경우, 혹은 단말 자세의 변화와 가시선(LOS; Line of Sight)의 차단으로 인한 수신신호세기(RSS; Received Signal Strength)가 감소하여 연결이 단절된 경우 기지국은 단말의 현재 위치를 파악하기 어렵다. 설령 통신 단말이 자신의 현재 위치를 유지하고 있다고 하더라도 이를 기지국 쪽으로 전달하기 위해서는 통신의 연결이 선행되어야 하므로 기지국은 단말의 위치를 명확히 파악할 수 없다. 따라서 이와 같은 타이밍 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 단말기가 초기 접속할 때 기지국과 단말기 간 거리의 범위를 정의해야 한다. 즉 거리의 범위가 정의되면 그에 맞추어 기준신호의 초기타이밍을 적절히 설정할 수 있다.

기지국과 단말기 간의 거리를 항상 예측할 수 없기 때문에 거리의 범위 정의가 근본적으로 어려우므로 본 논문은 단말기의 초기 Ramping 과정에서 기준신호의 초기타이밍을 가변하는 방법을 제안한다. 단말기 초기 Ramping이란 불분명한 단말기 초기 위치에 따라 발생하는 송수신 신호세기의 불확실성을 해소하기 위하여 단말기 RF 모듈의 송수신 이득을 일정한 단계로 증가시키며 네트워크 가입을 수행하는 절차이다. 기존의 Ramping은 자동이득제어(AGC; Automatic Gain Control) 과정에서 송신이득과 수신이득만 변경하고 있으나, 본 논문에서는 기준신호의 초기타이밍을 변경 대상에 추가하여 Ramping 절차를 수행함으로써 기준신호 검출을 위한 초기타이밍의 설정을 병행하는 방법을 제안한다.

3.5 해상무선통신 시험

복합임무 무인수상정 무선통신 장치의 재접속에 관한 문제는 2차례의 해상시험을 실시하는 과정 중에 식별되었다. 해상무선통신 장치의 최대통달 거리 시험을 위하여 무인수상정의 무선통신 장치를 시험선에 탑재하여 연결이 지속될 때까지 시험선을 이동하여 통신 거리와 수신신호세기를 측정하였다. 이를 위하여 기지국을 육상에 설치하고 지구 곡률을 고려하여 첫 번째 Fresnel 영역(1st Fresnel Zone)의 60 %가 확보될 수 있을 만큼의 충분히 높은 지점에 안테나를 위치시켰다.

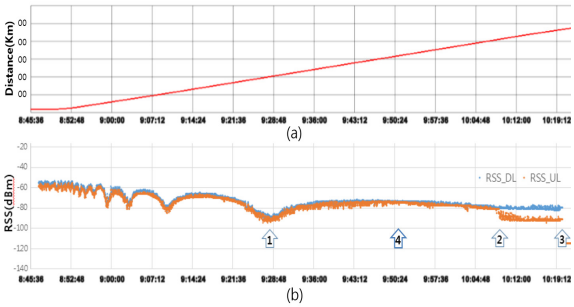

Fig. 5. Maritime test result of commination range (a) communication range (b) received signal strength

Fig. 5는 최대통달거리 시험 중 육상 기지국을 통하여 시험선이 기록한 시간에 따른 통신 거리와 수신신호세기에 대한 시험결과 그래프이다. x축의 시간 경과에 따라 상단 (a) 그래프에서 통신 거리가 증가하면서 해수면 반사파에 의한 상쇄간섭의 영향으로 하단 (b) 그래프에서 수신신호세기가 감소했다가 다시 증가하는 물결 모양의 굴곡 패턴이 형성되었다. 형성된 패턴으로 인하여 1번 화살표(9시 28분 경) 지점에서 상당히 낮은 수신신호세기를 나타내었으나 통신 가능한 수신감도보다 높았기 때문에 통신 연결 상태를 유지하였다. 하지만 2번 화살표(10시 08분 경) 지점에서 하향링크 수신신호세기(RSS_DL)는 정상적이나 상향링크 수신신호세기(RSS_UL)의 경우 상쇄간섭보다 빠르게 낮아지는 경우가 발생하였다. 이는 무인수상정의 생존성 향상을 위하여 제어데이터(Control Message)가 대부분인 하향링크(DL)의 경우 가장 안정적이지만 속도가 낮은 MCS(Modulation & Coding Scheme) 단계의 변복조를 수행하는 반면 상향링크의 경우 센서에서 획득된 많은 용량의 데이터를 빠른 속도로 전송하기 위하여 높은 MCS 단계를 사용하였기 때문에 요구하는 수신감도가 상대적으로 높기 때문이다.

3번 화살표(10시 20분 경) 지점에서는 상향/하향링크의 통신이 단절되어 즉각적인 재접속에 실패하였고 수분 동안 단절된 상태가 지속되었다. 따라서 해당 시점에서 최대통달거리를 기록하고 시험선을 변침하여 기지국으로 복귀하였다. 복귀 과정에서 지속적으로 재접속을 시도하였으나 4번 화살표 지점까지 거슬러 올라갔어야 재접속에 성공할 수 있었다. 즉 통신이 가능한 수신감도보다 높은 영역에 진입하여서도 즉각적인 재접속이 이루어지지 않았다. 이러한 원인의 분석 과정에서 기지국이 단말기가 전송하는 기준신호를 검출하기 위하여 설정한 신호검출 윈도우의 크기가 기록한 최대통달거리를 수용할 수 있는 범위에 미치지 못한다고 판단되었으며, 이를 단말기 전송 기준신호의 타이밍 오차로 추정하여 이론적으로 계산하고자 하였다.

아래는 설정된 검출 윈도우 크기에 단말기 전송 기준신호의 타이밍 오차를 계산하기 위한 거리 산출식이다. 1 km의 거리에 소요되는 전파의 경로지연시간(T_D)을 구하기 위하여 전파의 속도(0.3 km/μs)로 나누었다. 경로지연시간은 Pairwise로 송신과 수신에 동일한 시간이 소요되므로 2를 곱하였다. 따라서 수식 (1)에서 기지국과 단말기 간의 거리의 증가에 따른 지연시간은 1 km 당 약 6.66 μs가 소요된다고 할 수 있다.

$$2\,T_D/km = \frac{2}{0.3km/\mu s} \simeq 6.66\,\mu s/km \qquad (1)$$

결과적으로 시간 도메인 상 기지국에서 기준신호의 초기타이밍을 조정하여 접속 가능한 최대거리(km)는 Midamble을 검출할 수 있는 시간 구간을 수식 (1)에서 구한 약 6.66 μs로 나누어서 추정할 수 있다. RATG (Receive Ad-hoc Time Gap)는 업링크 채널과 Ad-hoc 채널 사이에서 채널 전환과 Midamble이 위치하고 있는 구간이다(Fig. 2 참조). 따라서 채널 전환에 필요한 전환 지연(Switching Time)이 추가적으로 더 소요되므로 이론적으로 계산된 거리에 비하여 더 작아진다.

이를 수식적으로 정리하면, 시간 도메인 상에서 기지국의 RATG 시간 간격을 $\Delta RATG$라 할 때, 채널전환에 필요한 채널전환지연(d)과 채널 가이드 구간(g)으로부터 Offset이 이동 가능한 최대 구간(Δw)은 수식 (2)와 같다.

$$\Delta w = \Delta RATG - d - g \tag{2}$$

Offset의 이동단계 수를 n이라 할 때 Initial Timing Offset 단계를 조정하여 접속 가능한 거리는 이동단계별 최대 Offset 위치(O_n)인 수식 (3)으로부터 결정된다.

$$\begin{aligned} o_1 &= 0, \\ o_2 &= \frac{\Delta w}{n}, \\ o_3 &= 2\frac{\Delta w}{n}, \\ &\cdots \\ o_n &= (n-1)\frac{\Delta w}{n} \end{aligned} \tag{3}$$

4. 제안 및 검증

4.1 Ramping을 이용한 기준신호의 초기타이밍 설정

기지국과 단말기 간의 거리를 항상 예측할 수 없기 때문에 거리의 범위 정의가 근본적으로 어려우므로 본 논문은 단말기의 초기 Ramping 과정에서 기준신호의 초기타이밍을 가변하는 방법을 제안한다. 기존의 Ramping 과정은 송신이득과 수신이득만 변경하고 있으나, 기준신호의 초기타이밍을 변경 대상에 추가하여 Ramping 절차를 수행하도록 변경하였다.

Fig. 6은 단말기가 기지국의 자동이득제어(AGC)를 이용한 단말기의 네트워크 참가 과정에서 제안한 기준신호의 초기타이밍을 가변하는 방법을 예로 들었다.

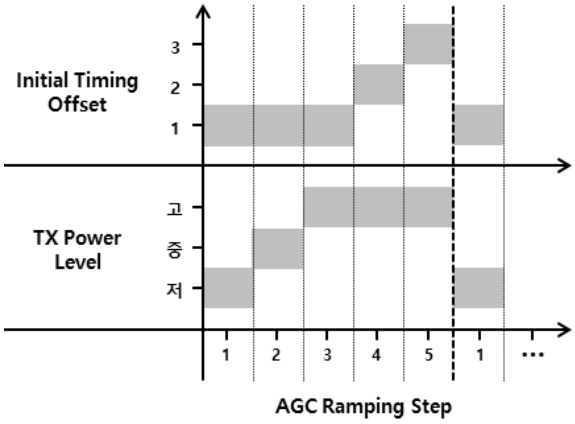

Fig. 6. Initial timing offset of reference signal during TX power ramping

기지국과 단말기가 인접해 있는 근거리부터 기준신호의 초기타이밍을 검출할 수 있는 구간으로 기본 윈도우 위치(Default Window Offset)가 설정된다(Fig. 6의 AGC 1단계). 기본 윈도우 위치는 AGC 단계가 최대출력에 도달할 경우(Fig. 6의 AGC 3단계)까지 유지한다. AGC 단계가 최대출력 단계에서도 단말의 접속이 성공하지 못하였을 경우에는 AGC를 최대출력으로 유지한 상태로 기본 윈도우 위치를 4단계로 이동한다. 즉 단말이 현재 검출될 수 있는 윈도우의 크기를 벗어났다고 판단하고 Offset을 증가시킨다. 이동할 수 있는 Offset의 최대값은 검출 가능한 시간 구간의 크기와 같다(Fig. 6에서는 5단계가 최종 단계). 따라서 시간 도메인 상에서 기준신호의 초기타이밍을 조정하여 접속 가능한 최대거리는 RATG의 크기에서 수식 (2)의 Δw를 수식 (1)에서 구한 약 6.66 μs로 나누어 산출한 값이 된다.

4.2 채널 모의기를 사용한 검증

제안한 Ramping 과정에서 거리에 따른 기준신호의 적응적 초기타이밍 설정 방법은 실험실에서 상용 채널 모의기(Channel emulator)를 활용하여 검증하였다. 사용한 채널 모의기 장비는 이론적으로 계산된 거리만큼 송신 신호를 지연시켜서 수신되도록 하여 Ramping을 이용한 기준신호의 초기타이밍 설정 방법이 정상적으로 동작하는지 확인할 수 있다.

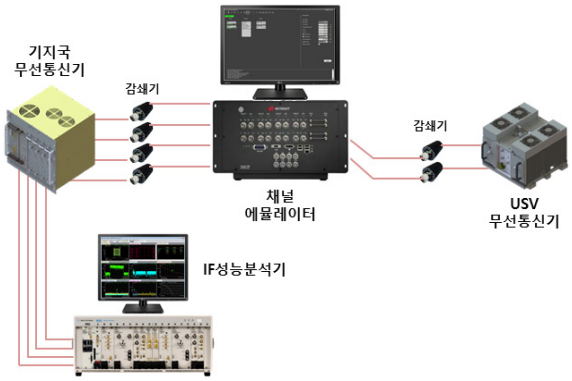

Fig. 7. Experimental setup of proposed algorithm verification using channel emulator

Fig. 7은 채널 모의기를 경유하여 연결한 무인수상정 기지국과 단말의 시험 구성도이다. 채널 에뮬레이터는 Keysight 사의 Propsim FS8 모델을 사용하였으며

감쇄기를 사용하여 유선으로 4x2 MIMO 환경을 구성하였다.

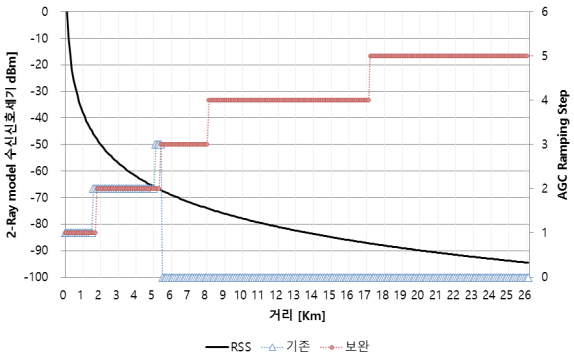

Fig. 8. Comparison of communication range with or without range adaptive time synchronization algorithm

지연시간을 늘려가며 통신거리가 증가하는 것을 모의하기 위해 전파의 속도에 해당하는 지연시간을 점진적으로 증가시켰다. Fig. 8에서 기지국과 단말의 안테나 높이를 각각 17 m와 3 m로 가정하여 설정하고 거리에 따른 2-Ray 경로손실 모델의 수신신호세기를 기반으로 거리 적응적 동기화 알고리즘 적용 전/후의 통신 연결 거리를 비교하였다. 기존 3단계로 구성된 AGC Ramping 과정에서는 3단계에서 약 5.4 km(18 μs 지연) 이후 통신 연결에 실패한 반면 5단계로 이루어진 ACG Ramping 과정을 통한 거리 적응적 동기화 알고리즘 적용한 후 5단계에서 약 26 km(86 μs 지연) 거리까지 통신 연결에 성공하는 것을 확인하였다.

5. 결론 및 향후 연구

본 논문은 TDD/TDMA를 사용하는 무인수상정의 장거리 무선통신 과정에서 전송 지연으로 발생하는 동기화 오차를 보정할 수 있는 거리 적응적 동기화 방안을 제안하였다. 제안한 방안은 실제 해상시험 과정에서 발생한 재접속 실패의 원인을 분석하는 과정을 통하여 식별하였으며, 이를 Ramping을 이용한 거리 적응적인 기준신호의 초기타이밍을 설정하는 방법을 제안하여 해결하고자 하였다. 제안한 방안은 상용 채널 모의기를 사용하여 이론적으로 계산된 거리만큼 송신 신호를 지연시켜서 수신하도록 하여 기준신호의 초기타이밍이 거리의 증가에 따라 정상적으로 설정되어 동작하는지 확인하였다.

본 논문은 TDD/TDMA 기반의 통신에 기초하고 있으므로 시분할 통신 관련 방식을 사용하는 분야에 적용 가능하다. 제안한 방안은 기준신호를 검출하기 위한 초기타이밍을 조정하여 접속 가능한 최대거리를 시간 도메인 상의 채널 전환 구간 안에서 동적으로 동기화할 수 있게 한다. 채널 전환 구간 이상의 거리에서 재접속이 가능하기 위해서는 채널 전환 구간 자체를 확장하여야 하며 이는 RF와 모뎀 동작 구조의 전반적인 수정을 필요로 하므로 무인수상정의 운용 개념에 따라 설계 초기에 미리 반영되어야 한다. 또한 채널 전환 구간과 AGC Ramping 과정의 단계를 확장하는 것은 단말의 네트워크 진입 시간을 증가시키는 Trade-off 관계에 있으므로 무인수상정의 운용 개념에 따라 최적화하는 것이 중요하며, 이를 향후 연구를 통하여 계속 진행하고자 한다.

References

[1] D. Koutsonikolas, T. Salonidis, H. Lundgren, P. LeGuyadec, Y. C. Hu, and I. Sheriff, “TDM MAC Protocol Design and Implementation for Wireless Mesh Networks,” in Proceedings of the 2008 ACM CoNEXT Conference, ser. CoNEXT ’08. New York, NY, USA: ACM, pp. 28:1-28:12, 2008.

[2] P. Djukic and P. Mohapatra, “Soft-TDMAC: A Software-Based 802.11 Overlay TDMA MAC with Microsecond Synchronization,” IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 11, No. 3, pp. 478-491, March 2012.

[3] M. H. Seo, J. S. Kim, H. W. Cho, S. H. Jung, J. H. Park, and T. J. Lee, “A Study on Cross-Layer Network Synchronization Architecture for TDMA-Based Mobile Ad-Hoc Networks,” The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 37, pp. 647-656, 2012.

[4] G. Allard, V. Genc, and J. Yelloz, “Fully Distributed Clock Synchronization in Wide-Range TDMA Ad-Hoc Networks,” in 2011 - MILCOM 2011 Military Communications Conference, pp. 920-925, Nov. 2011.

[5] S. M. Lasassmeh and J. M. Conrad, "Time Synchronization in Wireless Sensor Networks: A Survey," in Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon), pp. 242-245, March 2010.

[6] I. Hussain, N. Sarma, and D. Saikia, "TDMA MAC Protocols for WiFi-based Long Distance Networks: A Survey," Vol. 94, pp. 1-8, 05 2014.

[7] P. Dutta, S. Jaiswal, D. Panigrahi, and R. Rastogi, "A New Channel Assignment Mechanism for Rural Wireless Mesh Networks," in IEEE INFOCOM 2008 - The 27th Conference on Computer Communications, April 2008.

[8] S. Nedevschi, R. K. Patra, S. Surana, S. Ratnasamy, L. Subramanian, and E. Brewer, "An Adaptive, High Performance Mac for Long-distance Multihop Wireless Networks," in Proceedings of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, ser. MobiCom '08. New York, NY, USA: ACM, pp. 259-270, 2008.

[9] A. Dhekne, N. Uchat, and B. Raman, "Implementation and Evaluation of a TDMA MAC for WiFi-based Rural Mesh Networks," Jan 2009.

[10] Y. Ben-David, M. Vallentin, S. Fowler, and E. Brewer, "JaldiMAC: Taking the Distance Further," in Proceedings of the 4th ACM Workshop on Networked Systems for Developing Regions, ser. NSDR '10. New York, NY, USA: ACM, pp. 2:1-2:6, 2010.

[11] D. Panigrahi and B. Raman, "TDMA Scheduling in Long-Distance WiFi Networks," in IEEE INFOCOM 2009, pp. 2931-2935, April 2009.

[12] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1," IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor 1-2005 (Amendment and Corrigendum to IEEE Std 802.16-2004), pp. 1-822, 2006.

[13] X. Fu and H. Minn, "Initial Uplink Synchronization and Power Control(Ranging Process) for OFDMA Systems," in Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04. IEEE, Vol. 6, pp. 3999-4003, Nov. 2004.

[14] C.-C. Lee, J. Krinock, M. Singh, and M. Paff, "Comments on OFDMA Ranging Scheme Described in IEEE 802.16ab-01/01r1," 2001.

[15] H. A. Mahmoud, H. Arslan, and M. K. Ozdemir, "An Efficient Initial Ranging Algorithm for WiMAX (802.16e) OFDMA," 2008.