

# 실시간 UAV 중계를 위한 타임미러링 기반 DTDMA 프로토콜

이 동 준\*, 박 진 혁\*, 임 재 성°, 윤 선 희\*\*, 박 형 원\*\*

## Time Mirroring Based DTDMA Protocol for Real-Time Relay Communication Using UAV

Dongjune Lee\*, Jinhyeok Park\*, Jaesung Lim°, Seonhui Yun\*\*, Hyungwon Park\*\*

### 요 약

본 논문에서는 DTDMA(dynamic time division multiple access) 기법에 타임미러링을 적용한 TM-TDMA(Time Mirroring based TDMA)기법과 이를 활용한 음성통신 보장 알고리즘을 제안한다. 공중 중계통신은 무인기의 중계를 통한 통신방식으로 기존 TDMA 기법을 공중 중계에 적용한다면 중계단말에 트래픽이 집중되므로 중계과정에서의 지연이 증가한다. 제안하는 TM-TDMA 기법은 연속되는 두 타임슬롯을 결합하여 업링크 이후 바로 다운링크가 이루어지게 하여 중계 과정에서의 지연을 없앤다. 슬롯할당 기법은 단일 슬롯을 다수의 미니슬롯으로 구성하여 각 단말이 스스로 요청과 승인을 진행한다. 또한 제안하는 음성통신 보장 기법을 통해 끊김없는 음성 통신을 보장 가능하다. 시뮬레이터를 통한 성능평가에서는 단대단 지연과 패킷 사용율 비교를 통해 제안하는 기법이 중계 과정에서의 추가적인 지연을 제거할 수 있으며, 원활한 음성 통신이 보장 가능하다는 점을 확인한다.

**Key Words** : UAV, communication relay, Link-16, dynamic TDMA, USAP-MA

### ABSTRACT

In this paper, we propose DTDMA(dynamic time division multiple access) protocol adapting a concept of time mirroring(TM), called TM-TDMA. Airborne relay network serves relay communication using UAV(Unmanned Aerial Vehicle). However, adapting the current TDMA to airborne relay networks, the delay in the relay process increases because the traffic is concentrated in the relay terminal. The TM-TDMA combines two consecutive timeslots called mirroring slot as downlink immediately after uplink. Slot assignment in the TM-TDMA is achieved by deviding an empty mirroring slot with multiple mini-slots and the node sends the request packet and confirms by itself. Additionally, seamless voice communication is possible by using the proposed voice guarantee algorithm. Simulation results show that the TM-TDMA eliminates delay in relay transmission and guarantees seamless voice communications.

\* 본 연구는 LIG 벡스원의 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0003-0402-1231)Ajou University Department of Computer Engineering, ldj7202@ajou.ac.kr, 정희원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-0080-9398)Ajou University Department of Computer Engineering, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원

\* (ORCID:0000-0002-0010-3873)Ajou University Department of Computer Engineering, bingo119@ajou.ac.kr, 정희원

\*\* (ORCID:0000-0001-6826-4588, 0000-0002-2697-6576)통신전자전연구소 통신체계PM, seonhui.yun@lignex1.com, hyungwon.park@lignex1.com, 정희원

논문번호 : KICS2017-12-399, Received December 22, 2017; Revised January 26, 2018; Accepted January 26, 2018

## I. 서 론

전장 상황이 NCW(network centric warfare)로 변화함에 따라 각 체계간의 정보를 공유할 수 있게 해주는 전술데이터링크의 중요성이 강조되고 있다. 전술데이터링크는 아군간의 신속한 정보 전달을 통해 작전 임무 수행에서의 효율성을 높이는데 목적이 있다<sup>[1]</sup>. 하지만 지상통신망을 기반으로 한 군 통신망은 지형적 제약으로 인한 통신 단절 문제로 인해 통신의 효율이 떨어지며, 또한 다수의 지상단말을 위성을 통해 지원하기에는 위성 주파수 자원의 제약이 존재한다. 이를 해결하기 위해 위성망과 지상망 사이에 UAV(unmanned aerial vehicle)를 사용하여 부체계로 지원하는 방안이 연구 중이다.

공중 중계 통신은 단절된 네트워크의 중심에서 중계 용도의 무인기를 사용하여 통신 중계를 지원한다<sup>[2]</sup>. 통신 환경은 기존 송신단말과 수신단말 간 단일 홉 통신 환경에서 중계단말이 포함된 2홉 통신환경(1.송신단말에서 중계단말, 2.중계단말에서 수신단말)으로 확장되는데, 중계과정에서의 추가적인 지연으로 인해 음성 통신과 같은 실시간성을 보장하기가 어려워진다. 따라서 공중 중계 환경에 적합한 다중접속방식에 대한 연구가 필요하다<sup>[3]</sup>.

대표적인 전술데이터링크인 Link-16에서는 공중 중계 통신에서 사용될 수 있는 다중 접속 방식으로 각 단말마다 사용 시간을 지정하여 다중 접속을 지원하는 TDMA(time division multiple access) 기법을 사용한다. 하지만 TDMA 기법은 사전에 미리 단말에게 타임슬롯을 할당하여 사용해야 하므로 동적으로 네트워크가 변화하고, 단말의 가입과 탈퇴가 이루어지는 환경에 적합하지 않다<sup>[4]</sup>. 이러한 문제를 해결하기 위해 네트워크 내 단말들이 동적으로 슬롯 자원을 할당할 수 있는 DTDMA(dynamic-TDMA) 기법을 적용할 수 있는데, 대표적으로는 USAP(unifying slot assignment protocol)<sup>[5]</sup>과 USAP-MA(USAP-multiple access)<sup>[6]</sup> 기법이 있다. USAP 기법은 네트워크 내 단말들이 매 프레임마다 존재하는 하나의 브로드캐스팅 슬롯을 통해 슬롯할당을 요청하고, 주변 단말들이 요청에 대한 승인을 했을 때 슬롯을 할당받아 사용하는 방식이다. 하지만 USAP은 프레임마다 단말 승인 정보를 전달하는 브로드캐스팅 슬롯이 하나뿐이므로 네트워크 내 단말 수가 늘어날수록 슬롯할당을 요청하여 승인을 받기까지 오랜 시간이 걸린다. 이러한 문제를 해결하기 위해 USAP-MA는 슬롯할당이 신속하게 이루어지도록 모든 단말의 미니슬롯을 프레임에 포함

시켜 사용한다. 하지만 USAP-MA는 지상에서의 음성 통신을 목적으로 만들어진 기법이므로, 2홉으로 통신되는 공중 중계 환경에 적용한다면 네트워크 내 단말수에 따른 중계 과정에서의 전송 지연이 기하급수적으로 증가한다. 이는 음성통신을 목적으로 설계된 의도와 달리 통신에서의 실시간성을 보장할 수 없다.

본 논문에서는 공중 중계 통신 환경에서 타임미러링 기법을 사용하여 중계로 인한 추가적인 지연을 줄이고, 실시간성을 보장하기 위한 TM-TDMA (time mirroring based TDMA) 기법을 제시한다. 타임미러링이란 중계단말이 송신단말로부터 수신한 패킷에 대해 처리과정 없이 즉시 브로드캐스팅하는 방식을 말한다<sup>[7]</sup>.

TM-TDMA 기법에서는 타임미러링 기법을 적용하기 위해 연속되는 2개의 슬롯을 하나의 미러링슬롯으로 지정하여 첫 번째 슬롯에서는 송신단말에서 중계단말의 통신을 진행하고 이어지는 두 번째 슬롯에서 중계단말과 수신단말의 통신이 이루어지도록 하여 중계 과정에서의 지연을 감소시킨다. 슬롯할당에서는 예약되지 않은 하나의 미러링슬롯을 다수의 미니 슬롯으로 분할하여 각 단말이 랜덤엑세스를 통해 슬롯을 할당받도록 한다. 각 단말은 중계단말에서 브로드캐스팅 되는 정보를 토대로 승인 여부를 알 수 있다. 음성 통신 보장방식은 다수의 미러링슬롯을 음성 블록으로 지정하고 음성 데이터를 전달하는 슬롯을 반드시 포함시키는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘을 통해 음성 패킷은 통신에서의 우선순위를 확보하여 실시간성을 보장받을 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 관련 DTDMA 기법에 대한 설명을 한 뒤, III장에서는 제안하는 기법에 대해 설명한다. IV장에서는 모의실험의 환경과 모의실험 결과를 통하여 제안 기법의 성능 및 활용 가능성을 검증한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺으며 논문을 마무리한다.

## II. 관련 연구

### 2.1 Link-16의 다중 접속 방식

Link-16는 대표적인 전술데이터링크로써 TDMA 기법을 사용하여 각 단말이 통신한다. Link-16는 한 프레임에 총 7.8125 밀리초 길이의 타임슬롯 1,536개로 구성된다. 각 타임슬롯은 사전 설계에 의해 이미 각 단말에게 할당되어 있으며, 이는 작전임무수행동안 고정된다. 각 단말은 할당받은 타임슬롯을 알고 있으며 자신이 할당받은 타임슬롯에서 데이터를 전송한다.

하지만 Link-16는 사전에 슬롯을 할당받아 통신하기 때문에 단말의 슬롯의 할당이 유동적이지 못하다. 따라서 전송할 데이터가 없는 단말 또한 슬롯을 점유하여 슬롯 낭비가 발생하며, 실시간으로 상황이 변화하는 곳에서 대처가 불가능하다는 단점이 있다.

### 2.2 USAP

USAP 기법은 네트워크 내 코디네이터 없이 단말이 비경쟁 방식으로, 보내고자 하는 데이터가 있을 때 슬롯을 할당받아 사용하기 위해 고안된 기법이다. 프레임 구조는 브로드캐스트 구간과 TDMA 구간으로 나누어진다. 브로드캐스트 구간은 매 프레임 초기 첫 슬롯이다. 프레임마다 지정된 단말이 사용권한을 가지며, TDMA 구간 타임슬롯 요청과 승인에 관한 정보를 공유한다. TDMA 구간은 브로드캐스트 구간을 통해 TDMA 구간 타임슬롯을 할당받은 단말이 패킷을 전송하는 구간이며, 브로드캐스트 구간에서 모든 단말로부터 승인을 받아야 TDMA 타임슬롯을 할당 가능하다. 만약 다섯 개의 단말이 존재하는 네트워크라면, TDMA 타임슬롯을 할당받기 위해 요청패킷을 전송하고 전체 노드로부터 승인을 받는데 다섯 프레임이 소요된다.

USAP 기법은 각 단말이 동적으로 슬롯을 할당하여 통신이 가능하지만, 단말이 요청패킷을 전송하고 TDMA 타임슬롯을 할당 받기까지 모든 단말의 승인을 받는데 소요되는 프레임의 수가 증가한다. 따라서 네트워크 내 단말의 수가 증가할수록 슬롯 할당에 필요한 프레임 소요 시간 또한 증가하는 단점이 있다.

### 2.3 USAP-MA

USAP-MA는 USAP 기법의 단말이 증가할수록 슬롯할당 시간이 증가하는 문제를 해결하고, 군 통신 환경에서 솔루션 시스템을 위해 개발된 기법이다. 한 프레임은 음성 통신을 지원하기 위해 125 밀리초 프레임 길이를 가지며, 프레임은 부트스트랩, 브로드캐스트, 예약 구간으로 구성된다. 부트스트랩 구간에서는 각 단말이 자신의 미니슬롯을 통하여 슬롯할당 정보와 슬롯 요청, 탈퇴에 대한 정보를 50비트의 USAP 패킷을 주변 단말에게 공유한다. 한 프레임에 단말의 수만큼 미니슬롯이 존재하여 한 프레임에서도 전체 단말이 자신의 정보를 주변과 공유한다. 브로드캐스트 구간은 프레임 당 두 개의 슬롯이 포함되며 부트스트랩 구간에서 예약을 하지 못한 단말에 대해 최소한의 전송을 보장하기 위해 존재한다. 만약 열 개의 단말이 존재한다면, 한 프레임에 두 단말 씩, 총 다섯 프레임

마다 한 번의 패킷 전송을 보장한다. 예약 구간은 부트스트랩을 통해 타임슬롯을 할당받은 단말이 데이터를 전송하는 구간이며 총 여덟 개의 슬롯이 존재한다.

USAP-MA 기법을 2홉으로 확장되는 공중중계 환경에 적용하게 된다면 기존 중계단말 또한 지상 단말과 같이 예약 슬롯을 할당받아 사용 가능하다. 중계단말은 자신이 할당받은 슬롯을 통해 수신단말에게 데이터를 전달하는데, 이 때 중계단말이 패킷을 전달하는 동안 송신단말로부터 받는 패킷이 쌓여 중계과정에서의 실시간성이 보장되지 않는다.

그림 1은 중계통신 환경에서 중계단말을 포함한 각 단말이 TDMA 슬롯에 할당된 상태를 나타낸 것이다. 각각 R0부터 R6까지 할당받은 지상단말들이 중계단말로 데이터를 전송한다면, 중계단말은 할당받은 R7에서만 데이터 전송을 할 수 있기 때문에 시간이 지날수록 중계단말에서의 부하가 심해지고 이는 중계과정에서의 지연을 증가시킨다.

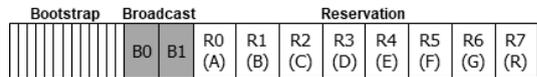


그림 1. USAP-MA에서의 중계 통신  
Fig. 1. Relay communication adapting USAP-MA

### 2.4 타임미러링

타임미러링은 프레임 릴레이를 통해 중계과정에서의 실시간성을 보장하기 위한 중계 방식이다. 타임미러링의 전송 방식은 수신단말에서 중계단말로 의 업링크 전송은 유니캐스트(unicast)를 사용하고, 패킷을 수신한 중계단말은 다운링크 과정에서 별도의 처리 과정 없이 브로드캐스트(broadcast)한다. 이 때 네트워크 전체 단말은 브로드캐스팅 되는 정보를 활용하여 중계단말에 대한 패킷의 성공적 전달여부, 슬롯 할당 승인 여부를 자가적으로 확인 가능하다. 타임미러링 방식에서 중계단말은 프레임 릴레이만 진행하므로 네트워크 계층에서 물리 계층과 MAC 계층 통신 장비만을 탑재한다. 이는 중계노드의 탑재중량을 감소시켜 운용 시간을 증가시킬 뿐만 아니라 중계통신의 실시간성이 보장된다.

## III. 본 론

본론에서는 공중중계 통신 환경에 대해 설명한 뒤, 앞서 설명한 타임미러링 방식을 TDMA에 적용한 TM-TDMA 기법의 프레임 구조와 슬롯할당방식, 음

성패킷에 대한 할당방식을 설명한다.

### 3.1 공중중계 통신환경

본 논문에서의 공중 중계 통신 환경은 그림 2와 같다. 공중중계 통신은 송신단말과 수신단말 사이에 중계단말이 포함된 2홉 형태의 통신환경이다.

중계용 무인기는 운용 고도( $h$ )에서 정적으로 위치하여 지상단말의 중계 통신을 지원한다. 이 때 중계통신 범위는 경로손실(pathloss)이 없다는 가정하에 무인기의 고도( $h$ )와 안테나의 성능에 따른 지표면과의 양각( $\theta$ )을 토대로 식(1)과 같이 산출 가능하며, 중계 고도에 따른 최대 중계통신 범위는 표 1과 같이 주어진다.

$$d = h * \frac{1}{\tan\theta} \tag{1}$$

표 1에 따르면 고도 2 km에서 5°의 양각을 가진 무인기 운용된다고 가정했을 때, 최대 22.86 km의 통신 반경을 지원 가능하며, 만약 무인기가 운용 고도가 10 km에서 중계 통신을 지원한다면, 최대 반경 114.3 km까지의 통신을 지원 가능하다.

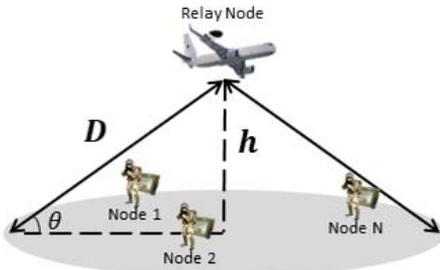


그림 2. 공중 중계 통신 환경  
Fig. 2. Airborne relay network environments

표 1. UAV의 운용 고도에 따른 통신 반경  
Table 1. Communication radius according to UAV altitude

UAV altitude (km)	Elevation angle(degree)	Communication radius (km)
2	5	22.86
4	5	45.72
5	5	57.15
10	5	114.3

### 3.2 프레임 구조

TM-TDMA의 프레임 구조는 Link-16의 프레임과

호환성을 위해 12초 길이의 슈퍼프레임 내부에 1초 길이의 서브프레임 12개를 가진다. 또한 타임슬롯은 7.8125 밀리초 길이를 가지며 한 서브프레임 당 128개의 타임슬롯으로 구성된다. 프레임은 비콘 전달 구간과 데이터 전달 구간으로 구성된다.

비콘 전달 구간은 하나의 비콘슬롯으로 이루어진다. 매 슈퍼프레임의 시작에 존재하며, 프레임 초기 슬롯할당 정보를 포함한 데이터를 네트워크 전체 단말에 브로드캐스팅한다. 지상 단말들은 브로드캐스팅되는 비콘 정보를 통하여 슈퍼프레임 내 빈 슬롯의 정보를 획득하고 빈 슬롯에 대한 슬롯할당을 요청할 수 있다.

데이터 전달 구간은 타 체계와의 호환을 위해 TDMA 타임슬롯과 네트워크 내 중계 통신을 위한 미러링슬롯으로 구성된다. 미러링슬롯은 타임머리링 방식을 적용하기 위해 두 개의 연속된 TDMA 타임슬롯을 결합하여 사용한다. 첫 번째 TDMA 타임슬롯에서 중계단말은 데이터를 수신하고 이어지는 두 번째 TDMA 타임슬롯에서 수신한 데이터를 바로 브로드캐스팅하여 중계가 바로 이루어진다.

미러링슬롯의 길이( $L_{MS}$ )는 식(2)와 같이 기존 TDMA 타임슬롯 길이( $L_{TS}$ )의 두 배가 된다.

$$L_{MS} = 2 * L_{TS} \tag{2}$$

그림 3은 TM-TDMA 기법의 프레임 구조를 나타낸 것이다.  $T_{(i,j,k)}$ 를  $i$ 번째 서브 프레임,  $j$ 번째 미러링슬롯,  $k$ 번째 타임슬롯이라고 한다면,  $T_{(1,1,1)}$ 은 비콘 전달 구간으로 비콘을 통해 전체 노드에게 첫 번째 서브프레임의 할당 가능한 슬롯을 공유한다. 비콘 슬롯 이후의 타임슬롯은 데이터 전달 구간으로 사용되

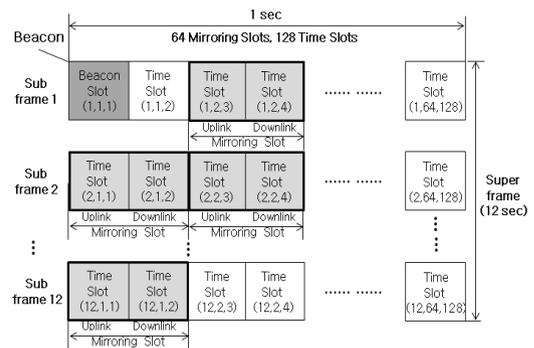


그림 3. TM-TDMA의 프레임 구조  
Fig. 3. Frame structure of TM-TDMA

는데, 중계 용도와 타 체계와의 통신 용도에 따라 슬롯을 구분한다. 각각  $T_{(1,2,3)}$ 과  $T_{(1,2,4)}$ ,  $T_{(2,2,1)}$ 와  $T_{(2,1,2)}$ ,  $T_{(2,2,3)}$ 와  $T_{(2,2,4)}$ ,  $T_{(12,1,1)}$ 와  $T_{(12,1,2)}$ 는 중계 통신을 위해 두 개의 타임슬롯을 하나의 미러링슬롯으로 결합하여 사용하는 형태이고  $T_{(1,1,2)}$ ,  $T_{(1,64,128)}$ 과 같은 타임슬롯은 타 체계와의 통신을 위해 타임슬롯으로 사용중이다.

### 3.3 슬롯할당 알고리즘

미러링슬롯을 할당받고자 하는 단말은 슈퍼프레임 내부에 할당을 받지 않은 미러링슬롯에서 슬롯할당을 진행한다. 할당받을 수 있는 미러링슬롯에 대한 정보는 슈퍼프레임 초기 브로드캐스팅되는 비콘 패킷 정보, 다른 단말이 데이터 통신 과정에서 미러링슬롯에서 중계노드에서 브로드캐스팅하는 정보를 사용하여 구성한다.

슬롯할당을 위해 단말의 할당을 받지 못한 미러링슬롯은 다수의 미니슬롯으로 구분한다. 미러링슬롯에서 구분 가능한 미니슬롯의 수( $N_{ms}$ )는 공중중계 환경과 단말의 데이터 전송률( $R$ )에 따라 달라진다. 군 환경에서는 작전환경에 따라 무인기의 고도와 통신반경이 고정적이기 때문에 각 지상 단말은 사전 정보에 따라 미니슬롯의 개수를 파악 가능하다. 각 미니 슬롯의 구성은 미러링슬롯과 같이 업링크와 다운링크로 구성되며, 각 링크마다 가드 타임( $L_{gt}$ )과 패킷 전송 시간( $L_{req}$ )으로 구성한다.  $L_{gt}$ 는 공중 중계 환경의 최대 전파지연 시간으로써 식(3)과 같이 통신 반경( $d$ )에 대해 빛의 속도( $c = 3 \times 10^8$ )로 나눔으로써 산출 가능하다.  $L_{req}$ 는 요청 패킷을 수신한 뒤 이를 처리하는 시간으로써 식 (4)와 같이 패킷의 길이와 단말의 데이터율을 통해 계산한다. 본 논문에서는 요청 패킷의 크기를 USAP-MA 기법과 같은 50 비트라고 가정한다. 식 (4)와 식(5)를 통해  $L_{req}$ 와  $L_{gt}$ 의 합이 하나의 링크 길이가 되며, 미니 슬롯은 업링크와 다운링크로 이루어짐으로써 식(5)와 같은 방식으로 미러링슬롯에서 구성 가능한 미니슬롯의 개수가 결정된다.

$$L_{req} = \frac{D_{req}}{R} \tag{3}$$

$$L_{gt} = \frac{d}{c} \tag{4}$$

$$N_{ms} = \frac{L_{MS}}{2 \times (L_{gt} + L_{req})} \tag{5}$$

표 2. 중계통신환경에 따른 미러링슬롯 내 미니슬롯 수  
Table 2. Number of mini-slots according to communication environments

UAV altitude(km)	Datarate (Mbps)	Number of mini-slots
2	2	77
2	5.5	90
5	2	36
5	5.5	38

각 단말은 다수의 미니슬롯에 무작위로 요청 패킷을 전송하여 미러링슬롯을 할당받는다. 슬롯 요청과 승인에 대해서는 타임미러링 방식을 적용하여 중계단말이 할당 결과를 즉시 브로드캐스팅하여 단말 스스로 슬롯할당 요청과 승인을 판단할 수 있다.

그림 4는 할당받지 못한 미러링슬롯을 다수의 미니슬롯으로 구성하는 그림이다. 미니슬롯의 구성은 미러링슬롯과 동일하게 타임미러링 방식을 적용한다. 미니슬롯은 업링크와 다운링크로 구성되며 중계단말이 수신한 이후 바로 브로드캐스팅하는 구조를 가진다. 슬롯할당이 필요한 각 단말은 할당받지 않은 미러링슬롯의 미니슬롯에 대해 무작위의 정수를 선택한 뒤, 해당 순서의 미니슬롯에 요청 패킷을 전송한다.

요청 패킷을 수신한 중계단말은 수신 정보를 지상 단말에게 브로드캐스팅한다. 네트워크 전체의 지상 단말은 브로드캐스팅되는 정보를 활용하여 별도의 승인 과정 없이 스스로 해당 미니슬롯에 전송한 요청에 대한 성공여부 확인 가능하다. 하나의 미니슬롯에 단일 단말이 요청 패킷을 전송하고, 브로드캐스팅을 통하여 수신한 패킷이 자신이 보낸 패킷과 동일하다면, 해당 슬롯에 대한 승인이 이루어진 것으로 판단하고 해당 미러링슬롯을 점유한다. 반면 다수 단말이 동일한 미니슬롯에 요청 패킷을 송신하여 충돌이 일어나더라도 중계단말은 해당 패킷을 그대로 브로드캐스팅하기 때문에 각 단말은 수신한 패킷이 자신이 보낸 패킷과 동

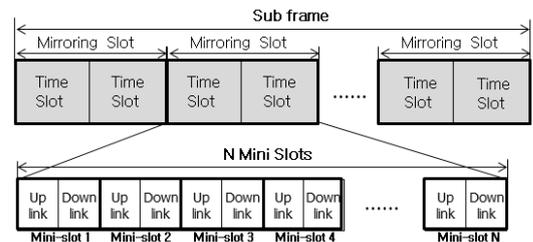


그림 4. TM-TDMA의 미니슬롯 구성  
Fig. 4. Mini-slot format of TM-TDMA

일하지 않으므로 슬롯할당에 실패한 것으로 간주한다.

중계단말에서 브로드캐스팅되는 패킷으로 충돌이 일어난 것을 확인한 단말은 이후 미니슬롯에 대해 재전송을 진행한다. 재전송에서는 충돌이 다시 일어나는 것을 방지하기 위해 802.11 무선랜 표준<sup>18)</sup>의 이진 지수 백오프를 적용한다. 이진 지수 백오프란, 무작위 정수 선택 범위를 이전 전송에서의 선택 범위보다 두 배 늘려 무작위의 정수를 선택하고 그에 대한 미니슬롯에 요청 패킷을 전송한다. 만약 무작위로 나온 정수가 해당 미니슬롯 개수를 초과한다면, 더 이상 경쟁을 진행할 수 없으므로 다음 미러링슬롯에 대한 경쟁에 참여한다.

미니슬롯에 대한 접근은 각 단말이 보내려는 데이터의 우선순위에 따라 범위를 달리한다. 실시간성이 보장되어야 하는 음성 패킷이 데이터 패킷보다 우선순위를 가지게 되며, 음성에 대한 슬롯할당은 전체 미니슬롯 개수 중에서 처음 10%의 미니슬롯에서 우선적으로 랜덤엑세스 경쟁을 진행함으로써 우선순위를 보장 가능하다. 만약, UAV가 5km 상공에서 중계를 지원하고 2Mbps 데이터율을 가진다면, 36개의 미니슬롯이 존재하기 때문에 3개의 미니슬롯에서 우선적으로 랜덤 액세스를 진행한다.

### 3.4 음성 데이터에 대한 슬롯할당 알고리즘

TM-TDMA 기법에서는 음성 통신을 보장하기 위해 음성 통신에서 허용 가능한 지연( $V_{accept}$ )에 대한 길이만큼 연속되는 미러링슬롯을 음성 블록으로 구분하고, 각 음성블록마다 하나의 음성 패킷 슬롯을 할당하여 원활한 음성 통신을 보장한다.

$$N_{VB} = \left\lceil \frac{V_{accept}}{2 \times L_{MS}} \right\rceil \quad (6)$$

하나의 음성 블록에 포함되는 미러링슬롯의 개수는 식(6)과 같이 산출 가능하다. 미러링슬롯의 길이가 15.625 밀리초인 TM-TDMA 기법에서는 하나의 음성 블록은 연속되는 4개의 미러링슬롯으로 구성된다. 즉, 하나의 서브프레임에는 총 16개, 슈퍼프레임에는 192개의 음성 블록이 존재한다.

식 (6)를 통하여 음성 블록 크기가 설정이 되었다면, 음성 패킷을 가진 단말은 그림 5의 알고리즘을 통해 음성 블록마다 한 개의 슬롯을 삽입한다. 음성 데이터 슬롯 할당 알고리즘은 처음으로 각 음성블록에 대해 빈 슬롯이 존재하는지 확인한다. 만약 빈 슬롯이 없다면, 다음으로 해당 음성 블록에 존재하는 미러링

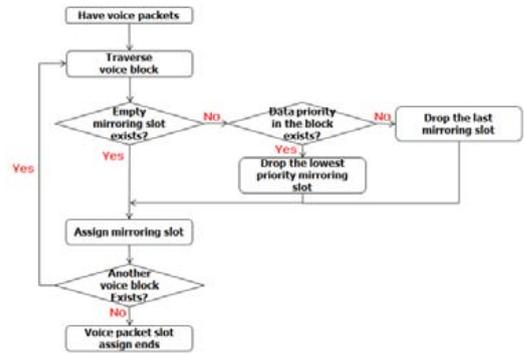


그림 5. 음성 블록을 활용한 음성 데이터 슬롯할당 알고리즘  
Fig. 5. Slot assignment for voice data algorithm using voice block

슬롯 중 가장 낮은 우선순위를 가진 데이터에 대해 슬롯을 해제한 뒤 음성 데이터 슬롯을 삽입한다. 데이터 간의 우선순위가 없다면 음성 블록의 가장 마지막 슬롯을 해제하고 음성 슬롯을 할당한다.

각 블록마다 삽입된 음성 슬롯은 최악의 경우에도 허용 지연인 125 밀리초 미만의 간격으로 분포되기 때문에, 원활한 음성 통신을 보장 가능하다. 또한 음성 데이터에 대한 슬롯할당은 음성 블록에 포함되는 미러링슬롯의 수만큼 음성 통신이 보장되기 때문에 15.625 밀리초 길이의 미러링슬롯을 가지는 TM-TDMA 기준으로 최대 4개의 음성 채널을 동시에 사용 가능하다.

## IV. 모의 실험

### 4.1 모의실험 환경

본 논문에서는 공중중계 통신 환경에서 제안하는 기법의 성능을 분석하기 위해 USAP-MA과 TM-TDMA 기법을 MATLAB 시뮬레이터를 통하여 성능을 평가하였다. 시뮬레이션 환경은 그림 2과 같은 구성으로 진행되었으며, 결과값은 10,000회 모의실험 결과값의 평균을 사용하였다. 모의실험에 적용된 변수

표 3. 모의실험 변수  
Table 3. Simulation parameters

Parameters	Values
Number of Nodes	100 nodes
Number of packets in data	3, 5 packets
UAV altitude	2 km
Communication radius	22.86 km
Data rate	2 Mbps

는 표 3과 같다.

전체 네트워크에는 하나의 UAV가 공중중계를 지원한다. 중계단말은 5km의 고도에 위치하며, 최대 중계 통신 반경은 25km이다. 본 성능평가에서는 중계통신에서의 성능만을 비교하기 위해 중계단말을 통한 통신만을 진행하며, 통신 과정에서 채널 환경 악화로 인한 오류는 없는 것으로 가정했다. 또한 모의실험에서는 중계통신 성능만을 비교하기 위해 USAP-MA와 TM-TDMA 기법 모두 다 체제와 연동 없이 모든 슬롯을 중계 용도로 사용한다. 따라서 TM-TDMA 기법의 모의실험에서 슈퍼프레임은 한 개의 비콘슬롯과 미러링슬롯으로 구성된다. 트래픽 모델은 전체 100개의 지상 단말 중에서 프레임 당 패킷을 발생시키는 단말 수에 따라 성능 비교를 하였다. 또한 데이터의 크기는 균등 분포에 따라 하나의 데이터를 보내는데 평균 3개와 5개의 슬롯이 소모되는 것으로 모의실험을 진행했다.

#### 4.2 모의실험 결과

그림 6는 지상 단말 수의 증가에 따른 공중중계 환경에서의 USAP-MA와 TM-TDMA 기법의 단대단 지연(end-to-end delay)을 비교한 것이다. 단대단 지연이란, 송신단말에서 생성된 데이터가 중계단말을 거쳐 수신단말에게 송신이 완료될 때까지의 시간이다.

실험 결과 두 평균 데이터 크기 모두 USAP-MA가 적은 수의 지상 단말이 있을 때 TM-TDMA 기법 대비 데이터를 전달하는데 적은 지연을 보였다. 하지만 단말 수가 증가할수록 USAP-MA의 지연이 급격히 증가하면서 TM-TDMA 지연이 더 좋은 성능을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 평균 데이터 크기가

증가할수록 더 성능의 역전이 빠르게 나타났다. 평균 데이터 크기가 3인 환경에서는 단말 수가 40개인 환경에서 역전이 일어난 반면 데이터 크기가 5인 환경에서는 20개인 환경에서 성능역전이 발생했다. 제안 기법에서는 단말의 수가 60개 미만일 때까지 지연의 증가폭이 적고, 이후에 값이 증가하는데 이는 한 프레임의 미러링슬롯 수가 64개이기 때문이다. 결과적으로 제안하는 기법이 다수의 단말이 존재하는 네트워크와 대용량의 데이터 크기 전송 환경에 더 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있다.

그림 7은 단대단 지연을 평가한 그림 6에서 송신노드가 중계노드에게 패킷을 전달하는 시간을 제외한 중계노드에서 수신노드로 전달하는데 소요되는 시간만을 나타낸 것이다. 모의실험 결과 USAP-MA 기법에서 일어나는 지연의 90% 이상 대부분이 중계과정에서의 지연임을 확인할 수 있다. 이는 송신단말이 다수인 반면, 중계단말이 하나인 환경이기 때문에 중계단말의 부하가 발생하기 때문이다. 결과적으로 지상단말 수와 데이터 크기가 증가할수록 중계단말의 부하가 심해진다. 이는 단대단 지연에서의 실시간성 보장을 불가능하게 만들며, 운용시간이 증가할수록 중계단말에서 데이터가 축적됨으로 인한 버퍼 오버플로우 문제 또한 발생 가능하다. 이에 반해 TM-TDMA 기법에서는 중계노드가 업링크 이후 바로 다운링크를 진행한다. 중계단말은 수신한 패킷을 즉시 브로드캐스팅함으로써 중계과정에서의 추가적인 지연이 발생하지 않는다. 또한, TM-TDMA 기법은 중계단말에서 송신단말로부터 하나의 패킷만을 보유한 뒤, 즉시 브로드캐스팅하기 때문에 중계단말의 버퍼는 하나의 패킷을 저장할 수 있는 저장소를 가지고 중계 통신을 운용

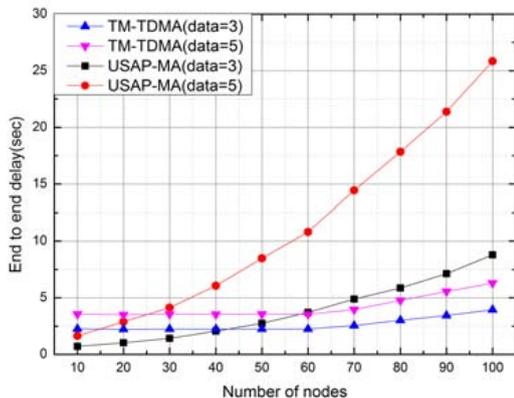


그림 6. 평균 데이터 크기에 따른 단대단 지연 비교  
Fig. 6. Comparison of end to end delay according to average data size

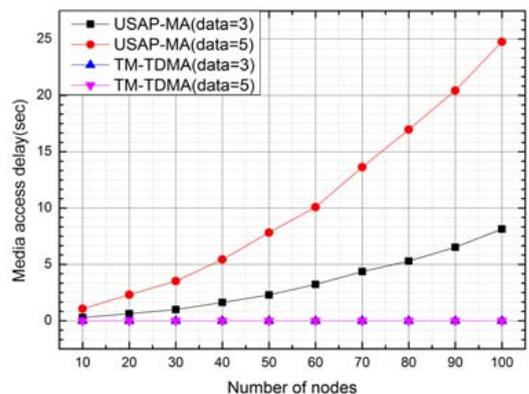


그림 7. 단말 수에 따른 중계과정에서의 지연 비교  
Fig. 7. Comparison of media access delay according to number of nodes

가능하다는 장점을 가진다.

그림 8은 TM-TDMA 기법에서 음성 채널의 수에 따른 데이터 전송에서의 단대단 지연을 나타낸 그림이다. 모의실험에서 음성 채널의 수는 음성채널이 존재하지 않는 0개부터 시작하여 기존 음성 블록 크기의 절반 이상인 2개까지 그 수를 증가시키며 진행하였다. 모의실험 결과 음성 패킷에 대한 지연은 음성 블록마다 무조건 전송을 보장하기 때문에 평균 125 밀리초의 균등한 값을 가지는 것을 확인 가능하다. 음성 통신의 허용 가능한 최대 지연이 125 밀리초라는 것을 감안하였을 때, 제안하는 기법을 통해 원활한 음성 통신을 보장할 수 있다. 음성 채널의 수가 증가할수록 데이터 패킷의 지연은 증가하는 경향을 보이는데, 이는 음성 채널의 증가에 따라 음성블록의 음성 패킷이 차지하는 비율 증가하면서 데이터 패킷이 할당 가능한 슬롯 수가 감소하기 때문이다.

그림 9는 USAP-MA와 TM-TDMA 기법의 음성 채널 수에 따른 슬롯 사용율을 비교하였다. 슬롯 사용율이란 전체 프레임 중에서 중계단말에서 수신단말로 패킷을 전송하는데 사용되는 슬롯 비율이다.

실험 결과 공중 중계 통신은 2홉으로 데이터 전송이 이루어지기 때문에 중계에 사용되는 슬롯의 비율이 0.5를 초과하지 않는 것을 확인할 수 있다. USAP-MA의 경우에는 송신단말이 다수인 것에 반해 중계단말이 한 개의 슬롯을 할당받아 사용하기 때문에 슬롯사용율이 0.1에 미치지 못하며, 이로 인해 중계과정으로 적용함에 따른 통신 효율이 매우 떨어진다. 이에 반해, 제안하는 TM-TDMA 기법은 미러링 슬롯 개수인 64개에 도달할 때까지 효율이 꾸준히 향상되고 이후에는 일정한 비율을 유지하는 것을 확인할

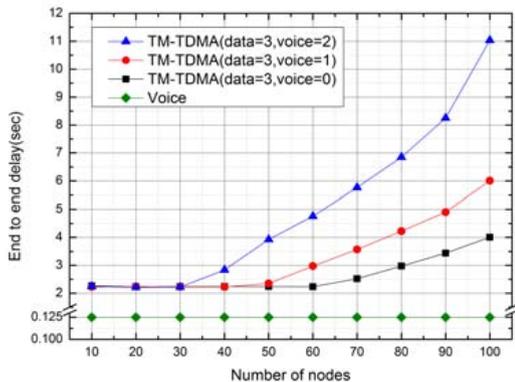


그림 8. 음성 채널 수에 따른 단대단 지연 비교  
Fig. 8. Comparison of end to end delay according to number of voice channels

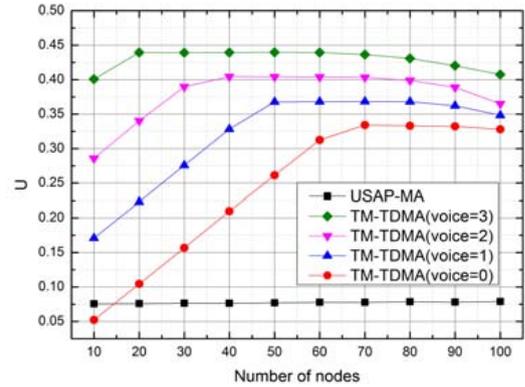


그림 9. 음성 채널 수에 따른 중계노드 슬롯사용률 비교  
Fig. 9. Comparison of slot utilization according to number of voice channels

수 있다. 또한 음성 채널의 개수가 증가할수록 슬롯 사용율이 증가한 뒤 감소하는데, 이는 음성 패킷은 슬롯 할당을 보장받기 때문에 경쟁으로 슬롯을 할당받지 못하는 슬롯 비율이 줄어들기 때문이다. 단말 수가 70 개 이상일 때 수치가 떨어지는 것은 단말 수의 증가에 따른 경쟁이 심화되어 슬롯 할당 가능성이 감소하므로 단말의 수가 일정치를 넘으면 슬롯 사용율이 감소하는 경향을 보인다.

## V. 결론

본 논문에서는 TDMA 기반 공중중계 통신 환경에서 데이터 및 음성 통신의 실시간성을 보장할 수 있는 기법인 TM-TDMA 기법을 제시하였다.

공중중계 통신 환경은 기존 통신 환경과 달리 2홉 통신이고 통신 반경이 넓어지기 때문에 새로운 통신 환경에 적합한 다중접속방식에 대한 연구가 필요하다. 기존 DTDMA 방식은 중계단말에 대한 고려가 되지 않았기 때문에 기존 기법을 공중중계에 그대로 적용하기에는 중계 통신 환경에서의 실시간성을 보장할 수 없다.

제안하는 기법은 DTDMA 기법에 타임머링 방식을 적용하여 Link-16과의 호환성을 보장함과 동시에 중계 통신의 실시간성을 보장함으로써 단절된 네트워크를 신속하게 중계한다. 그리고 모의실험을 통해 제안하는 기법이 기존 USAP-MA 대비 중계과정에서의 지연을 없애고, 전체적인 성능에서도 USAP-MA 대비 지연에서 좋은 성능을 나타냄을 확인하였다.

References

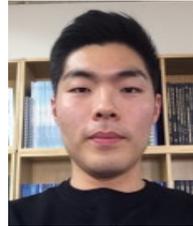
- [1] H. Baek, J. Lim, J. Koo, J. Jin, P. Chun, and I. Oh, "Reliable dynamic TDMA scheme with new packing method for image transmission over Link-16," *J. KICS*, vol. 37, no. 11, pp. 1045-1053, Dec. 2012.
- [2] M. F. J. Pinkney, D. Hampel, and S. DiPierro, "Unmanned aerial vehicle (UAV) communications relay," *IEEE MILCOM*, vol. 1, pp. 47-51, Mclean, USA, Oct 1996.
- [3] G. Lav, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, 2016.
- [4] K. Yang, H. Baek, J. Lim, and H. Park, "Priority based medium access control and load balancing scheme for shared situational awareness in airborne tactical data link," *J. KICS*, vol. 41, no. 10, pp. 1210-1220, Oct. 2016.
- [5] C. David. Young, "USAP: a unifying dynamic distributed multichannel TDMA slot assignment protocol," *IEEE MILCOM*, vol. 1, pp. 235-239, Mclean, USA, Oct 1996.
- [6] C. David. Young, "USAP multiple access: dynamic resource allocation for mobile multihop multichannel wireless networking," *IEEE MILCOM*, vol. 1, pp. 271-275, Atlantic city, USA, Nov 1999.
- [7] H. Baek and J. Lim, "Design of future UAV-Relay technical data link for reliable UAV control and situational awareness," *accepted to IEEE Commun. Mag.*
- [8] IEEE 802.11e/D4.0, Draft Supplement to Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS), Nov. 2002.

이 동 준 (Dongjune Lee)



2016년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학 학사  
 2016년 3월~현재 : 아주대학교 컴퓨터공학 석사과정  
 <관심분야> 전자공학, 통신공학

박 진 혁 (Jinhyeok Park)



2010년 3월 : 공군사관학교 전산과 졸업  
 2017년 3월~현재 : 아주대학교 NCW학과 석사 과정  
 <관심분야> 전자공학, 통신공학, 항법 및 측위

임 재 성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자공학 학사  
 1985년 2월 : KAIST 영상통신 석사  
 1994년 2월 : KAIST 디지털통신 박사  
 1998년 3월~현재 : 아주대학교 소프트웨어학과 정교수

2004년 3월~현재 : 아주대학교 국방기술네트워크 연구센터장  
 <관심분야> 위성통신, 무선네트워크, 국방전술통신

윤 선 희 (Seonhui Yun)



2006년 2월 : 충남대학교 전자전파정보통신공학부 졸업  
 2008년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 석사  
 2008년~2012년 : 한국전자통신연구원 연구원  
 2009년~2014년 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 박사과정

2015년~현재 : LIG넥스원 선임연구원  
 <관심분야> 이동통신, 위성통신, 항재밍

**박 형 원 (Hyungwon Park)**



2003년 2월 : 이주대학교 정보

및 컴퓨터공학과 졸업

2005년 2월 : 이주대학교 정보

통신공학과 석사

2009년 8월 : 이주대학교 정보

통신공학과 박사

2009년 9월~현재 : LIG넥스원 수

석연구원

<관심분야> 전송데이터링크, 군 위성통신, 이동통신