DBpia

논문 19-44-06-04 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '19-06 Vol.44 No.06
https://doi.org/10.7840/kics.2019.44.6.1055

무장데이터링크 네트워크의 요구조건을 만족하는 동적 TDMA 구조

최 선 주◆, 백 호 기*, 임 재 성°, 고 광 렬**, 고 요 한***

Dynamic TDMA Structure Satisfying Requirements of Weapon Data Link Network

Seonjoo Choi◆, Hoki Baek*, Jaesung Lim°, Kwangryul Koh**, Yohan Ko***

요 약

현대의 무기 체계는 네트워크를 통해 표적의 최신 좌표 및 상태 정보를 전송할 수 있는 네트워크 기반의 무기 체계(NEW : Network-Enabled Weapon)를 운용하고 있다. 다수의 NEW를 제어하기 위해서 선진국에서는 무장데이터링크 네트워크(WDLN : Weapon Data Link Network)를 연구하고 있으며, 이를 통해 WDLN의 요구조건을 제시하고 있다. 하지만 WDLN에 대한 근실시간 중계, 자원 할당, 그리고 이미지 전송에 대한 분석을 실시한 연구는 부족한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 WDLN의 요구조건을 분석을 통해 동적 자원 할당 및 근실시간 중계, 영상과 같은 대용량 데이터 전송이 가능한 동적 TDMA 구조를 제안한다. 제안하는 구조를 기반으로 WDLN의 슬롯할당 지연과 영상 전송 지연을 수학적 모델을 통해 성능 분석하였으며, 제안하는 구조를 기반으로 다양한 환경에서 운용 가능 여부를 확인하였다.

키워드 : 유도무기, 네트워크 기반 무기, 무장데이터링크, 동적 TDMA, 이미지 전송
Key Words : guided weapon, network-enabled weapon, weapon data link, dynamic TDMA, image transmission

ABSTRACT

Modern weapon systems are operating a network-enabled weapon that can transmit weapon status and the location information of the target using the network. Although some studies have existed for a weapon data link network (WDLN) in advanced countries, there is a lack of research on a fast relay, resource allocation, and performance analysis of image transmission for WDLN. In this paper, we analyze the requirements of WDLN and propose a dynamic TDMA architecture that enables dynamic resource allocation, fast relay, and image transmission. We analyze the slot allocation delay and the video transmission delay of the WDLN through a mathematical model based on the proposed dynamic TDMA architecture. we confirmed the availability of WDLN in various environments. we confirmed the availability of WDLN in various environments.

◆ First Author : Ajou University, Department of Computer Engineering, csg1388@.ajou.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : Ajou University, Department of NCW, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원
* Department of Military Digital Convergence, Ajou University, neloyou@ajou.ac.kr, 정회원
** Agency for Defense Development, kwang@add.re.kr, 정회원
*** Communication/Electric Warfare Laboratory Center, LIG Nex1, yohan.ko@lignex1.com, 정회원
논문번호 : 201903-016-A-RU, Received March 11, 2019; Revised March 22, 2019; Accepted March 27, 2019

www.dbpia.co.kr

Ⅰ. 서 론

최근 전장 환경에서는 이동성 표적 및 시한성 표적과 같이 급변하는 전장 환경에 대응하기 위하여 데이터링크를 무기 체계에 도입하여 사용하는 방안을 연구 중이다. 선진국에서는 JSOW C-1, Harpoon Block II를 데이터링크를 통해 네트워크 기반으로 제어하는 실험을 수행하였으며, 이를 네트워크 기반의 무기체계(NEW : Network-Enabled Weapon)를 제어하는 무장데이터링크(WDL : Weapon Data Link)라고 한다. WDL은 NEW 발사 후 표적 타격 직전까지 관제, 상황정보 공유, NEW의 표적 정밀조준, 재교전 등의 역할을 한다[2]. 다중 표적을 동시에 타격하기 위해서는 WDL이 단일 유도무기로 제어되는 것이 아닌 다수의 유도무기가 네트워크를 통해 동시에 제어되어야 하며 이를 무장데이터링크 네트워크(WDLN : Weapon Data Link Network)라고 한다[1,2].

WDLN를 운용하기 위해서는 다음과 같은 요구조건을 만족해야 한다. 첫 번째로, 다수의 유도무기 제어를 위해 동적 네트워크 구조로 운용해야 한다. 동적 네트워크 구조를 기반으로 동적 네트워크 가입/탈퇴와 동적 자원 요청/할당을 수행할 수 있어야 한다. 두 번째로, 유도무기의 경우 주기적으로 자신의 상태 정보를 주기적으로 통제소에 전송하기 때문에, 슬롯할당 시에 주기를 보장할 수 있는 슬롯할당 알고리즘이 필요하다. 세 번째로, 유도무기의 긴 사정거리를 지원하기 위해서는 공중 통신 중계가 필수적이며, 중계로 인한 지연이 타격 체계에 치명적일 수 있기 때문에 신속한 중계를 보장해야 한다. 마지막으로 표적의 최종 타격을 확인할 수 있도록 대용량의 영상 정보를 근실시간 전송할 수 있어야 한다[3,4].

현재 선진국은 대표적인 전술데이터링크인 Link-16을 기반으로 WDLN을 운용하려 하고 있다. Link-16은 다수의 네트워크 노드를 제어하기 위해 시분할다중접속(TDMA : Time Division Multiple Access) 기반의 다중접속방식을 사용하고 있다. 하지만 Link-16은 사전에 각 노드들에게 타임슬롯을 할당하여 사용한다. 그러므로 새로운 노드의 가입/탈퇴 및 동적 자원 할당이 필요한 동적 환경에서 제한적이다. 이러한 사전할당 방식은 이미지 및 영상과 같은 대용량 데이터 전송에 어려움이 있다[3].

본 논문에서는 WDLN의 요구조건을 분석하고, 각각의 요구조건을 만족하는 동적 TDMA 구조 및 슬롯할당 알고리즘을 제안한다. 근실시간 중계와 동적 자원할당이 가능한 프레임 구조를 설계하고, 프레임 구조를 바탕으로 주기성을 보장하는 슬롯할당 알고리즘을 제안한다. 제안하는 WDLN 프레임 구조는 인터럽트슬롯을 통해 동적으로 네트워크에 가입/탈퇴가 가능하며, 영상 전송을 위한 추가적인 타임슬롯 요청이 가능하다. 또한 근실시간 중계 전송을 위해 연속하는 두 개의 타임슬롯을 사용하여 중계 노드가 송신노드로부터 수신한 패킷을 별도의 처리과정 없이 즉시 브로드캐스트하고, 중계로 인해 발생하는 지연을 감소시키기 위해 타임미러링 기법을 적용하였다. 제안하는 프레임 구조를 기반으로 유도무기가 네트워크에 슬롯할당 요청을 실시하였을 때 소요되는 지연을 분석하고 영상 전송 시에 소요되는 지연을 분석하여 제안하는 동적 TDMA 구조를 통해 WDLN을 운용하였을 때 성능을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 WDLN의 구조 및 요구조건을 분석하고, 3장에서는 제안하는 WDLN 네트워크의 요구조건을 만족하는 동적 TDMA 구조의 프레임 구조 및 슬롯할당 알고리즘을 설명한다. 4장에서 제안하는 동적 TDMA의 성능 분석을 실시하고 성능 분석 결과를 설명하고, 5장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. WDLN 구조 및 요구조건

2.1 WDLN 구조

WDLN의 구조를 설명하기 위해 WDLN에 참여하는 노드들을 정의하고 각각의 노드들의 역할을 설명한다. WDLN에는 발사체, 통제소, 유도무기, 공중 중계기가 존재한다. WDLN에 포함되어 운용되는 노드는 다음과 같다. 발사체는 다수의 유도무기를 장착하고 있으며, 사전에 장입된 표적 정보를 바탕으로 작전에 수행될 유도무기의 노드 가입 및 슬롯할당을 요청한다. 따라서 발사체를 통해 다수의 유도무기가 동시에 노드 가입 및 슬롯할당을 받을 수 있다. 통제소는 WDLN에 포함되어 있는 모든 노드의 노드 가입/탈퇴 및 슬롯할당을 수행하며 유도무기에서 송신하는 유도무기의 상태 정보를 수신하여 유도무기를 관제하는 역할을 한다. 통제소는 네트워크에 소속된 모든 노드에 슬롯할당 정보를 브로드캐스트하여 슬롯할당 여부를 전달한다. 마지막으로 무인기(UAV : Unmanned Aerial Vehicle)와 같은 공중 중계 노드는 통제소와 비가시선에 위치한 발사체의 노드 가입/탈퇴 및 슬롯할당 요청을 중계하고, 유도무기에서 전송하는 유도무기의 상태 정보 및 유도무기가 획득한 영상 정보를 중계한다. 공중 중계 노드는 통제소와 비가시선에 위치

www.dbpia.co.kr

한 발사체의 노드 가입/탈퇴 및 슬롯할당 요청을 중계한다. 또한 유도무기에서 전송하는 유도무기의 상태 정보, 유도무기가 촬영한 영상 정보를 중계한다.

2.2 WDLN 구조

2.2.1 주기성 메시지 지원

WDLN의 핵심 기능 중 하나는 작전 중인 유도무기의 상태를 확인하고, 발사 궤적을 추적하는 관제 기능이다. 이를 위해서는 유도무기의 상태 정보를 주기적으로 송수신할 수 있어야 한다. 예를 들어, Link-16는 대표적인 전술데이터링크로써 다수의 작전을 지원하기 위해 멀티넷을 지원하며, 다수의 넷 중에서 Net0을 통해 네트워크 참여 노드들은 PPLI (Precise Participant Location and Identification) 메시지를 주기적으로 전송한다. PPLI 메시지의 주기는 RRN (Recurrence Rate Number)에 따라 결정되며 노드별로 결정된 RRN에 따라 해당 주기로 PPLI 메시지를 전송한다. WDLN에 사용되는 메시지에는 유도무기 상태정보 송신(WIFT : Weapon In-Flight Track), 비행 중 표적정보 갱신(IFTU : In-Flight Target Update)[6], 비행 중 표적 재교전, 통제권 이양, BHI(Bomb Hit Indication), 타격평가가 있다[7]. WDLN 메시지 중에서 WIFT, IFTU는 주기적으로 송수신이 필요하다. WIFT는 유도무기의 상태 정보 및 위치 정보를 포함하고 있으며, 유도무기가 표적을 향해 이동하며 주기적으로 WIFT를 통제소에 전달한다. IFTU는 표적의 최신 좌표 정보를 포함하고 있으며, 이동 표적을 정확히 타격하기 위하여 통제소에서 주기적으로 유도무기로 전송하는 메시지이다. 급변하는 전장 상황에 대응하기 위해서 WIFT, IFTU와 같은 상황인식 정보의 주기적인 업데이트가 필수적이다.

2.2.2 중계 전송

유도무기 작전은 긴 사정거리를 바탕으로 먼 거리에 있는 표적을 정밀하게 타격한다. 하지만 유도무기와 통제소의 거리가 멀어질수록 경로 손실 및 가시선 보장이 제한되어 통신에 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 공중 중계 노드를 사용하여 근실시간 중계 전송을 해야 한다. 타임미러링은 프레임 중계를 통해 중계과정에서의 실시간성을 보장하는 중계 방식이다. 타임미러링의 전송 방식은 통제소 또는 유도무기에서 공중 중계 노드로의 업링크 전송은 유니캐스트를 사용하고, 메시지를 수신하는 공중 중계 노드는 다운링크 과정에서 별도의 처리 과정 없이 브로드캐스트한다. 이때 네트워크 전체 노드는 브로드캐스트 되는 정보를 활용하여 공중 중계 노드에 대한 메시지의 성공적 전달여부를 자가적으로 확인 가능하다. 타임미러링 방식에서 중계 노드는 프레임 중계만 진행하므로 네트워크 계층에서 물리 계층과 맥 (MAC : Media Access Control) 계층 통신 장비만을 탑재한다. 이는 중계 노드의 탑재중량을 감소시켜 운용 시간을 증가시킬 뿐만 아니라 중계통신의 실시간성이 보장된다[5].

2.2.3 표적 탐지 영상 전송

유도무기가 종말단계에 돌입하게 되면 유도무기에 장착된 영상획득 장치를 통해 획득된 영상을 중계를 통해 통제소에 전달한다. 유도무기에서 획득된 영상 정보를 전송할 때 영상의 해상도, 비트심도, 압축률을 고려해야 한다. 해상도가 높을수록 영상을 통해 지휘관의 상황 판단에 도움을 주지만 전송해야 하는 데이터의 양은 증가하게 된다. 비트심도는 하나의 픽셀에 필요한 비트의 수를 의미하며 시간적·환경적 요인으로 가시거리가 제한되는 경우 사용되는 적외선 센서 장비는 한 픽셀에 8비트 비트심도를 사용하면 운용가능하다[4]. 영상과 같은 디지털 데이터는 원 데이터를 그대로 전송하면 많은 데이터의 전송이 필요하기 때문에 영상을 압축하여 전송한다. 하지만 압축률이 높은 인터프레임 압축방식의 경우 압축 지연시간 발생과 무선통신 오류로 인해 여러 프레임에 영향을 줄 수 있어 실시간 원격 임무통제에 적용이 제한된다. 압축방식 중에 JPEG 2000은 H.264와 유사한 성능을 제공하며 작전에 필요한 영상품질을 제공하기 위해 20~40:1 의 압축률을 권고하고 있다. 영상의 한 프레임을 전송하는데 소요되는 최대 지연은 200 ms 이내로 전송해야 한다[4].

유도무기가 타격 정확성 향상 및 타격 평가를 위해 송신하는 영상은 표적을 탐색하는 탐색 구간과 표적을 포착, 추적하는 포착/추적 구간 영상으로 구분된다. 탐색 구간 영상은 320x240 해상도의 영상에 비해 640x480 해상도의 영상이 해상도가 높으므로 표적을 식별하는데 용이하다. 하지만 640x480 해상도의 영상을 송신하기 위해서는 비교적 다수의 타임슬롯을 할당하여 전송하기 때문에 모든 영상을 640x480의 해상도로 전송하는데 제한이 있다. 영상 전송을 위한 타임슬롯을 감소시키기 위해서는 전체 화면에서 관심 있는 영역만 잘라내고 압축하여 전송하는 방식을 사용할 수 있다.

www.dbpia.co.kr

Ⅲ. 본 론

본론에서는 제안하는 WDLN 프레임 구조를 설명하고, 주기성을 보장하기 위한 슬롯할당 알고리즘과 대용량 영상 탐지 지연에 대해 설명한다.

3.1 WDLN의 프레임 구조

제안하는 WDLN의 프레임 구조는 기존 전술데이터링크인 Link-16과의 호환성을 위해 1초의 슈퍼프레임으로 구성되어 있으며, 슈퍼프레임 내에 프레임으로 구성되었다. 프레임은 25 ms의 서브프레임으로 구성되어 있으며, 네트워크 환경별로 운용 가능하도록 서브프레임의 개수를 변경하여 가변적인 프레임 길이를 지원할 수 있다. 본 논문에서 프레임의 길이는 100 ms를 기본으로 설정하였다. 따라서 슈퍼 프레임은 100 ms의 프레임 10개로 구성되어 있다. 프레임은 25 ms의 서브프레임 4개로 구분되며 각각의 서브프레임 내에는 6.25 ms의 타임슬롯으로 구성되어 있다. 타임슬롯에서 가드타임은 선진국에서 WDLN을 운용하려 하는 Link-16의 작전반경을 고려하여 2 ms로 설정하고[3,8], 나머지 4.25 ms를 데이터 전송 구간으로 설정했다. 따라서 하나의 서브프레임에는 4개의 타임슬롯이 존재하며, 프레임에는 16개의 타임슬롯, 슈퍼프레임에는 160개의 타임슬롯으로 구성되어 있다. 이를 기반으로 중계 기법인 타임미러링을 적용하기 위해서 타임슬롯 두 개를 결합한 미러링슬롯을 사용한다. 첫 번째 타임슬롯에서는 발사체, 유도무기, 통제소와 같은 노드에서 공중 중계 노드로 메시지를 전송하고, 두 번째 타임슬롯은 공중 중계 노드에서 수신한 메시지를 네트워크에 브로드캐스트하는데 사용한다. 본 논문에서 공중 중계 노드는 유도무기, 통제소, 발사체와 가시선이 보장된다고 가정한다. 미러링슬롯의 시간은 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$T_{TM} = 2 \times T_{slot} \quad (1)$$

식 (1)에서 T_{TM}은 미러링슬롯의 시간을 나타내며 이는 기존 타임슬롯의 시간인 T_{slot}의 2배가 된다. 따라서, 서브 프레임에는 2개의 미러링슬롯이 존재하며, 프레임에는 8개의 미러링슬롯, 슈퍼프레임에는 80개의 미러링슬롯으로 구성되어 있다.

그림 1은 WDLN의 프레임 구조를 나타냈다. 매 프레임의 시작은 비콘슬롯으로 시작한다. 비콘슬롯은 노드의 슬롯할당 정보 및 통제소에서 송신하는 비주기성 메시지를 전송하는데 사용한다. 공중에서 작전 중

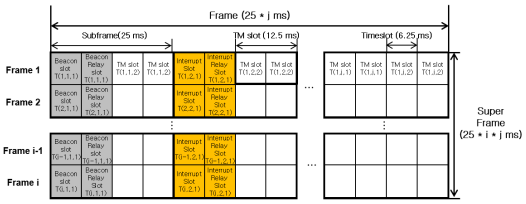

그림 1. WDLN 프레임 구조
Fig. 1. Frame structure of WDLN

인 유도무기뿐만 아니라 지상에서 슬롯할당을 요청하는 발사체는 브로드캐스트 되는 비콘슬롯의 슬롯할당 정보를 통하여 슈퍼프레임 내 빈 슬롯의 정보를 획득 가능하다. 따라서 비콘슬롯을 통해 전송되는 비콘 메시지는 WDLN에 참여하는 모든 노드에 전달되어야 하므로 미러링슬롯으로 사용하며, 이를 위해 비콘슬롯 이후에 비콘 릴레이슬롯이 존재한다. 각각의 프레임에는 인터럽트슬롯이 존재하며 인터럽트슬롯은 동적 노드의 가입/탈퇴를 지원한다. 발사체가 작전을 위해 노드 가입 및 슬롯할당 요청과 유도무기에서 영상을 전송하기 위한 추가적인 슬롯할당 요청을 인터럽트 슬롯을 통해 요청한다.

그림 1에서 $T_{(i,j,k)}$는 i번째 프레임, j번째 서브프레임 k번째 미러링슬롯을 나타내며, $T_{(1,1,1)}$은 비콘 전달 구간으로 비콘슬롯으로 사용되고 있으며, $T_{(1,2,1)}$은 인터럽트 슬롯으로 사용되고 있다.

3.2 WDLN의 슬롯할당 알고리즘

WDLN에서 슬롯할당을 필요로 하는 노드는 매 프레임에 존재하는 인터럽트슬롯을 통해 슬롯할당을 요청한다. 만약, 다수의 노드가 동시에 인터럽트슬롯을 통해 슬롯할당 요청을 하는 경우 충돌이 발생할 수 있다. 따라서 노드는 슬롯할당 요청을 실시할 때 요청 메시지를 바로 인터럽트 슬롯에 전송하지 않고, 매 프레임 랜덤변수 P_n을 생성하여 P_a보다 작은 경우 슬롯할당을 요청한다. P_n은 각각의 유도무기가 생성하는 랜덤변수이고, P_a는 인터럽트 슬롯의 충돌 조절 및 슬롯할당 요청의 우선순위를 설정하는 변수이다. 만약 P_n의 값이 P_a보다 클 경우에는 다음 프레임에 P_n을 다시 생성하여 재실시 한다. 다른 표적보다 우선순위가 높은 작전을 수행하는 경우 P_a를 증가시켜 WDLN 가입 및 슬롯할당에 우선순위를 부여할 수 있다. 예를 들어, 특정 노드의 P_a를 1로 설정하면 해당 노드는 인터럽트 슬롯의 경쟁을 최소화 할 수 있다. 슬롯할당을 요청하는 경우 슬롯할당 요청 메시지는 통제소에 전

www.dbpia.co.kr

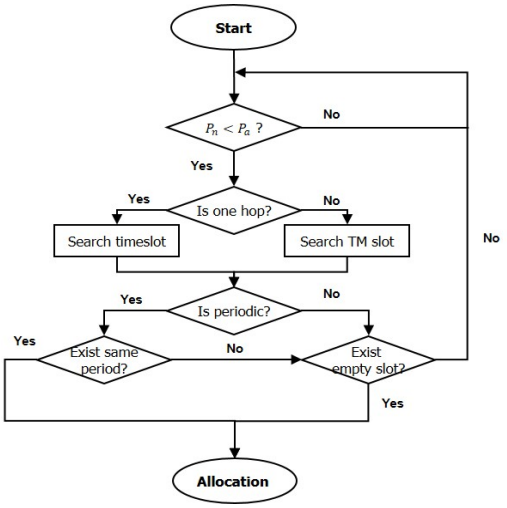

그림 2. WDLN의 슬롯할당 알고리즘 순서도
Fig. 2. Flow chart slot assignment for WDLN using TM

달되며 요청 사항이 단일 홉 통신인지 2 홉 통신인지를 판단하여 필요한 슬롯이 일반 타임슬롯 또는 미러링슬롯이 판단한다. 본 논문에서는 할당하는 모든 슬롯이 미러링슬롯 이라고 가정하였다. 중계가 필요한 슬롯인지를 판단한 후, 요청 슬롯이 WIFT, IFTU와 같이 주기적으로 전송이 필요한 슬롯할당인지 그 외에 비주기적인 메시지를 전송하기 위한 슬롯할당인지 파악한다. 만약 주기적인 메시지라면 기존에 할당 정보를 바탕으로 같은 주기를 갖는 구간을 탐색한다.

같은 주기를 갖는 구간에 슬롯할당이 가능한 경우, 해당 주기에 슬롯할당을 진행하고, 해당 주기에 슬롯할당이 불가능한 경우에는 빈 슬롯을 탐색한다. 본 논문에서 주기의 의미는 주기가 1인 경우 매 프레임에 한 번 전송을 실시하고, 주기가 2인 경우 2개의 프레임마다 한 번 전송을 실시한다. 예를 들어 주기가 2인 데이터를 요청하는 경우 요청하는 주기와 같이 주기가 2로 데이터를 전송하는 노드를 찾고 같은 주기로 전송가능한지를 판별한다. 만약 같은 주기를 갖는 노드와 함께 사용이 불가능하다면 빈 슬롯 주기를 탐색하여 슬롯을 할당한다. 만약 할당 가능한 슬롯이 존재하지 않는다면 다음 프레임의 인터럽트 슬롯에 재요청을 실시한다. 그림 2는 WDLN의 슬롯할당 알고리즘을 순서도를 통해 나타냈다.

Ⅳ. 성능 분석

4.1 성능 분석 환경

본 논문에서는 WDLN의 동적 TDMA 성능을 분석하기 위해 MATLAB을 통해 성능을 분석하였다. 영상의 해상도(γ)의 경우 320x240과 640x480로 설정하였으며, 각각의 비트 영상의 비트심도(B)는 8bit로 설정하였다[4]. 프레임 당 서브 프레임의 개수(N_{sub})는 4개와 8개로 실시하였으며, 따라서 프레임의 길이는 100 ms와 200 ms로 설정하였다. 영상 압축률(ρ_{comp})은 20:1, 30:1, 40:1 로 설정하였다[4]. 또한 WDLN의 데이터 전송속도(R)는 전술데이터링크의 이미지 전송속도를 고려하여 300~500 Kbps로 설정하였다[3,4,8]. 성능 분석은 슬롯할당 지연과 이미지 전송 지연을 분석하였다. 표 1은 성능 분석의 파라미터를 나타냈고, 표 2는 성능 분석에 사용된 심볼과 설명을 정리하였다.

Table. 1. The parameter of performance analysis
표 1. 성능 분석을 위한 파라미터

Parameters	Values
γ	320x240, 640x480
N_{sub}	4, 8
B	8 bits
ρ_{comp}	20:1, 30:1, 40:1
R	300~500 Kbps

표 2. 성능 분석을 위한 심볼
Table. 2. The symbol of performance analysis

Symbol	Description
T_{TM}	Time of time mirroring slot
T_{slot}	Time of time slot
P_n	Random variable for interrupt slot
P_a	Probability of try for slot request
P_s	Probability to access a node for slot request
Ω	The number of nodes to access the interrupt slot concurrently
T_{frame}	Time of the frame
T_{sub}	Time of the subframe
N_{sub}	The number of subframe in the frame
τ_i	Time of frame delay
N_{TM}	The number of time mirroring slot for image transmission
N_{i_bit}	The number of bit for a image frame
B	Bit depth of the image
γ	Resolution of the image
ρ_{comp}	Ratio of the compression for image
L_{TM}	The number of bit to transmit the time mirroring slot
R	The data rate of the WDLN
T_{data}	Time of the slot to transmission data
T_{i_delay}	Delay for the image transmission

www.dbpia.co.kr

4.2 성능 분석

4.2.1 슬롯할당 지연 성능 분석

WDLN에서 발사체가 유도무기의 노드 가입 및 슬롯할당을 위해 통제소에 요청을 하거나, 비행 중인 유도무기가 영상 정보를 전송하기 위해 추가적인 슬롯 할당을 요청하는 경우 인터럽트슬롯을 통해 요청할 수 있다. 이로 인해 발사체와 유도무기가 동시에 요청을 하는 경우 충돌이 발생할 수 있다. 이때 노드의 수에 따라 슬롯할당 과정에 진입할 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_s = \binom{\Omega - 1}{0} P_a (1 - P_a)^{\Omega - 1} \quad (2)$$

식 (2)에서 P_s는 하나의 노드가 슬롯할당 과정에 진입할 확률을 나타내고 Ω는 네트워크에 참여하기 위해 동시에 요청한 노드의 수를 나타낸다. 이때 슬롯 할당을 위해 필요한 시간인 슬롯할당 지연을 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E[\tau] = \sum_{i=1}^{\infty} (1 - P_s)^{i-1} P_s \times \tau_i \quad (3)$$

식 (3)에서 $E[\tau]$는 슬롯할당 지연의 기댓값을 나타내고, i는 시도 횟수를 의미한다. τ_i는 시도 횟수 증가로 인해 발생하는 지연을 나타낸다. 따라서 τ_i는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_i = \tau_{i-1} + T_{frame} \quad (\tau_1 = N_{sub} \times T_{sub}) \quad (4)$$

식 (4)에서 T_{frame}은 한 프레임의 시간을 나타낸다. N_{sub}는 하나의 프레임을 구성하는 서브프레임의 개수를 나타내며, T_{sub}는 서브프레임의 시간을 나타낸다.

4.2.2 영상 전송 지연 성능 분석

제안하는 WDLN의 프레임 구조에서 영상을 송신하기 위해서는 필요한 미러링슬롯의 개수를 산출해야 한다. 영상 전송을 위해 요구되는 미러링슬롯의 개수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{TM} = \lceil \frac{N_{i_bit} \times B \times \rho_{comp}}{L_{TM}} \rceil \quad (5)$$

식 (5)에서 N_{TM}은 영상의 한 프레임을 전송하기 위해 필요한 미러링슬롯의 개수를 나타내며, N_{i_bit}는 해상도에 따른 전송해야 하는 비트 수를 나타낸다. 예를 들어, 해상도의 320x240 영상을 전송하기 위해서 필요한 N_{i_bit}는 76,800 비트이다. B는 영상의 비트심도를 나타내며, ρ_{comp}는 영상의 압축률을 나타낸다. L_{TM}은 하나의 미러링슬롯이 전송할 수 있는 비트의 수를 나타내며 다음과 같이 나타낸다.

$$L_{TM} = R \times T_{data} \quad (6)$$

식 (6)에서 R은 WDLN의 데이터 전송속도를 의미하며, T_{data}는 타임슬롯에서 데이터를 전송하는 시간을 나타낸다. 식 (5)와 식 (6)을 통해 N_{TM}이 산출되면 영상 전송에 필요한 시간을 계산할 수 있다. 영상 전송에 필요한 시간은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{i_delay} = T_{TM} \times N_{TM} + T_{TM} \times (\lceil \frac{N_{TM}}{2 \times N_{sub} - 2} \rceil + \lceil \frac{N_{TM} - 1}{2 \times N_{sub} - 2} \rceil) \quad (7)$$

식 (7)에서 T_{i_delay}는 영상 한 프레임을 전송하기 위해 필요한 시간을 나타낸다. T_{TM}과 N_{TM}을 통해 데이터 전송에 필요한 시간이 계산된다. 추가적으로, 제안하는 WDLN 프레임 구조의 비콘슬롯과 인터럽트슬롯을 고려하여 추가적인 미러링슬롯이 사용되기 때문에 식 (7)에 추가적인 계산식을 적용하였다.

4.2.3 성능 분석 결과

그림 3은 인터럽트슬롯을 통해 동시에 슬롯할당 요청을 실시하는 노드의 수가 증가함에 따른 슬롯할당 지연을 나타냈다. 슬롯할당 지연은 노드에서 슬롯할당 요청 메시지를 통제소에 송신하고 슬롯할당 승인 메시지를 수신하기까지 필요한 시간을 의미한다. 슬롯할당 승인은 추가적인 타임슬롯을 사용하지 않고 매 프레임 초기에 존재하는 비콘 메시지를 통해 슬롯할당 정보를 브로드캐스트할 때 확인할 수 있다. 그림 3은 P_a의 변화에 따라 슬롯할당 지연을 나타냈다.

실험 결과 같은 프레임에서 동시에 요청하는 노드의 수가 증가할수록 슬롯할당 지연이 증가하는 것을 확인할 수 있다. P_a가 0.1인 경우에는 노드의 수가 2개 이하일 때에도 만족하는 P_n이 적어 다른 P_a에 비

www.dbpia.co.kr

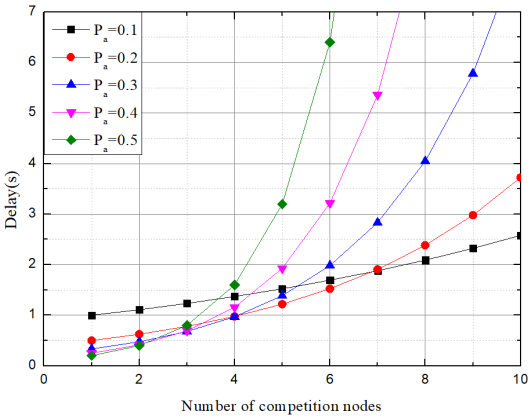

그림 3. 경쟁 노드의 수에 따른 슬롯할당 지연
Fig. 3. Slot allocation delay according to the number of competition nodes

해 지연이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. P_a가 0.2 이상인 경우에는 동시에 요청하는 노드의 수가 적을 경우에는 1초 이내에 슬롯할당을 받을 수 있으나 4개 이상의 노드가 요청하는 경우에는 지연이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 슬롯할당 지연을 감소시킬 수 있는 방안으로는 WDLN에 존재하는 빈 미러링슬롯을 이용하여 슬롯할당을 요청하는 방법이 있다. 빈 미러링슬롯을 이용하여 슬롯할당 요청을 수행한다면 인터럽트 슬롯에 동시에 요청하는 상황을 감소시켜 슬롯할당 지연을 감소시킬 수 있다. 하지만 공중 중계 노드가 모든 타임슬롯을 오버히어링 해야 하기 때문에 공중 중계 노드의 추가적인 전력소모를 발생시켜 작전지속능력이 감소된다.

그림 4는 2홉 환경에서 WDLN의 데이터 전송속도가 증가함에 따라 영상 전송에 필요한 지연을 나타냈다. 영상 전송에 필요한 영상의 압축률은 20:1, 30:1, 40:1 압축을 실시하여 전송하였으며 프레임의 길이는 100 ms로 실시하였다. 또한 영상 전송에 허용 가능한 최대 지연은 200 ms라고 가정하였다[4].

실험 결과 해상도(γ)가 320x240이고 압축률이 40:1인 경우에는 데이터 전송속도가 350 Kbps 이상에서 200 ms 내에 전송이 가능하였다. 또한 압축률이 30:1인 경우에는 450 Kbps 이상의 데이터 전송속도를 지원하는 경우 최대 지연 이내에 전송이 가능했다. 하지만, 20:1인 경우에는 500 Kbps의 데이터 전송속도를 지원하더라도 200 ms 내에 전송이 불가능하며, 해상도가 640x480인 경우에는 최대 지연인 200 ms 이상의 지연을 보이고 있다. 따라서 2홉 환경에서 해상도 640x480를 지원하기 위해서는 추가적인 방법 필

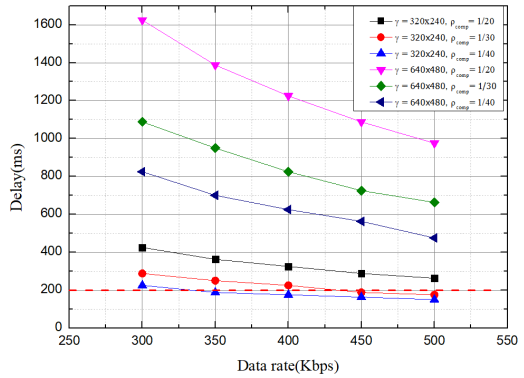

그림 4. WDLN의 데이터 전송속도에 따른 이미지 전송 지연
Fig. 4. The image transmission delay according to the WDLN data rate

요하다. 데이터 전송속도를 향상시키거나 높은 압축률을 통해 전송하는 데이터의 양을 감소시킬 수 있다. 만약 500 Kbps에서 해상도가 640x480 영상을 전송하기 위해서는 100:1의 영상 압축률을 사용할 경우 187.5 ms의 지연이 발생한다. 만약 40:1의 압축률을 사용하는 경우에는 1.3 Mbps의 데이터 전송속도를 지원해야 200 ms 이내에 전송이 가능하다. 또 다른 방안으로는 프레임의 길이를 증가시키는 방안이 있다.

그림 5는 그림 4와 동일한 환경에서 프레임 길이를 100 ms와 200 ms로 하였을 때 해상도 320x240 영상을 전송하였을 때 이미지 전송 지연을 비교하였다. 실험 결과 프레임 길이가 증가할수록 비콘 슬롯과 인터럽트 슬롯으로 발생하는 지연이 감소하기 때문에 프레임 길이가 100 ms 인 경우에 비해 200 ms 인 경우 이미지 전송 지연이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

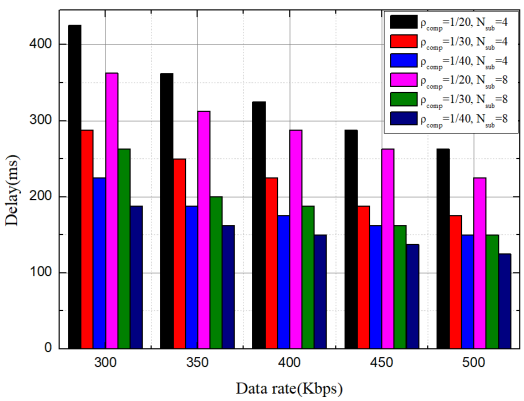

그림 5. WDLN의 데이터 전송속도와 프레임 길이에 따른 이미지 전송 지연
Fig. 5. The image transmission delay according to the WDLN data rate and length of frame

www.dbpia.co.kr

하지만 프레임 길이가 길어질수록 이미지 전송 지연은 감소하지만 슬롯할당 지연이 증가한다. 따라서 적절한 프레임 길이를 선정하여 이미지 전송 지연과 슬롯할당 지연을 조정할 필요가 있다.

그림 6은 WIFT, IFTU와 같은 주기성 데이터가 백그라운드 트래픽으로 존재하는 경우 영상 전송 지연을 나타냈다. 매 프레임에 백그라운드 트래픽이 존재하지 않을 경우부터 백그라운드 트래픽의 양을 증가시켜 최대 5개의 미러링슬롯을 백그라운드 트래픽으로 사용할 때 영상 전송 지연을 나타냈다. 영상의 해상도는 320x240으로 영상의 압축률은 40:1로 설정하였고, 데이터 전송속도는 300 Kbps, 400 Kbps, 500 Kbps를 나타냈으며, 각각 프레임의 길이가 100 ms, 200 ms 인 경우를 나타냈다.

실험 결과 데이터 전송속도가 300 Kbps이고 프레임 길이가 100 ms인 경우에는 백그라운드 트래픽이 존재하지 않는 환경에서도 최대 지연시간인 200 ms 이상인 225 ms의 영상 전송 지연이 발생했다. 프레임 길이가 100 ms 인 경우에는 500 Kbps에서 프레임 당 백그라운드 트래픽이 1개 존재하는 경우 최대 지연시간 이내의 지연을 보이지만, 백그라운드 트래픽이 2개 존재하는 경우 500 Kbps에서도 200 ms 이상의 지연을 보이고 있다. 프레임 길이가 200 ms 일 경우에는 400 Kbps, 500 Kbps를 지원하는 경우 백그라운드 트래픽 3개를 지원 가능하며, 백그라운드 트래픽이 4개로 증가하면 500 Kbps만 지원 가능함을 확인할 수 있다.

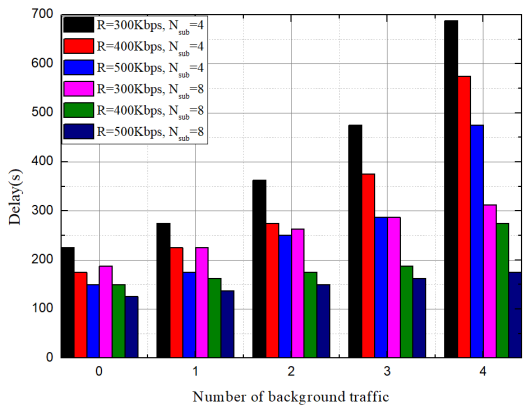

그림 6. WDLN의 백그라운드 트래픽에 따른 이미지 전송 지연
Fig. 6. The image transmission delay according to the background traffic of WDLN

V. 결 론

본 논문에서는 WDLN을 운용하기 위한 요구조건을 분석하고 이를 바탕으로 동적 TDMA 구조를 설계하였다. 제안하는 동적 TDMA 구조는 근실시간으로 노드 가입/탈퇴 및 자원할당이 가능하다. 제안하는 WDLN의 동적 TDMA 구조는 타임미러링을 적용하였다. 이를 통해 근실시간 데이터 중계가 가능하고 다양한 프레임 길이를 지원하여 확장성뿐만 아니라 기존의 데이터링크와의 호환성을 보장할 수 있다. 또한 영상과 같은 대용량 이미지 전송이 가능하다. 제안 기법의 검증은 수학적 분석을 통해 슬롯할당 지연 및 영상 전송 지연을 분석하였고, 이를 통해 제안하는 동적 TDMA 구조는 WDLN의 요구조건을 만족하며 일부 환경에서 운용 가능함을 확인하였다.

References

[1] W. S. Lee, S. H. Wi, and K. J. Kwon, "The study of concept about the weapon data link for precision engagement coping with the time sensitive target," in *Proc. Korea Inst. of Military Sci. and Technol.*, pp. 1629-1630, 2018.

[2] C. S. Lee, Y. H. Ko, and K. R. Koh, "Research of modem techniques for NEW," in *Proc. Korea Inst. of Military Sci. and Technol.*, pp.1595-1596, 2018

[3] H. K. Baek, J. S. Lim, J. Y. Koo, J. H. Jin, P. S. Chun, and I. H. Oh, "Reliable dynamic TDMA scheme with new packing method for image transmission over Link-16," *J. KICS*, vol. 37C, no. 11, pp. 1045-1053, 2012.

[4] S. B Lee, K. R. Koh, J. M. Kim, and Y. G. Kwon, "A study on digital image processing for weapon data link," in *Proc. Korea Inst. of Military Sci. and Technol.*, pp. 1645-1646, 2018.

[5] D. J. Lee, J. H. Park, J. S. Lim, S. H. Yun, and H. W. Park, "Time mirroring based DTDMA protocol for real-time relay communication using UAV," *J. KICS*, vol. 43, no. 2, pp. 252-259, 2018.

[6] S. F. Conley, "Test and evaluation strategies for network-enabled systems," *Int. Test and*

www.dbpia.co.kr

Evaluation Assoc. J., vol. 30, no. 1, pp. 111-116, 2009.

[7] S. R. Frame, "Real-Time targeting for network enabled weapons," *Int. Test and Evaluation Assoc. J.*, vol. 31, pp. 316-320, 2010.

[8] Y. G. Kim, J. S. Lim, H. J. Noh, and K. M. Lee, "Tactical data link message packing scheme for imagery air operations," *J. KICS*, vol. 37B, no. 4, pp. 278-287, 2012.

최 선 주 (Seonjoo Choi)

2016년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학 학사
2018년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학과 석사
2018년 3월~현재 : 아주대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 데이터링크, 주파수 도약 알고리즘, 주파수 공유

[ORCID:0000-0002-9597-4857]

백 호 기 (Hoki Baek)

2006년 2월 : 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학 학사
2008년 2월 : 아주대학교 정보통신공학 석사
2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학 박사
2014년 3월~2015년 2월 : 아주대학교 장위국방연구소 선임연구원
2015년 3월~현재 : 아주대학교 국방디지털융합학과 특임교수

<관심분야> 전술데이터링크, 다중 접속, 시간동기, 위치인식, 무선 네트워크, 무인기 네트워크

[ORCID:0000-0001-9213-7845]

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 국방전술네트워크 연구센터장

<관심분야> 이동 및 위성통신, 무선네트워크, 국방전술통신

[ORCID:0000-0003-0080-9398]

고 광 렬 (Kwangryul Koh)

1991년 2월 : 단국대학교 전자공학과 학사
1993년 2월 : 단국대학교 전자공학과 석사
2013년 2월 : 충남대학교 전자정보통신공학과 박사
1993년 3월~현재 : 국방과학연구소 책임연구원

<관심분야> 원격측정, 무장데이터링크

[ORCID:0000-0002-0379-9079]

고 요 한 (Yohan Ko)

2005년 2월 : 중앙대학교 전자공학부 공학사
2007년 2월 : 중앙대학교 전자공학부 공학석사
2011년 2월 : 중앙대학교 전자공학부 공학박사
2011년 1월~현재 : LIG넥스원 수석연구원

<관심분야> MIMO-OFDM 시스템, 항법 시스템, 디지털 신호처리, 능동배열안테나, 데이터링크

[ORCID:0000-0002-4324-8861]

www.dbpia.co.kr