Link-16 의 메시지 충돌 확률을 고려한 시간 동기 성능 분석

고상순*, 백호기**, 유제풍***, 임재성***
*아주대학교 소프트웨어특성화학과
**아주대학교 장위국방연구소
***아주대학교 컴퓨터공학과
e-mail : {koss0529, neloyou, mecm3355, jaslim}@ajou.ac.kr

Performance Analysis of Time Synchronization considering Message Collision Probability in Link-16

Sangsoon Ko*, Hoki Baek**, Jepung Yu***, Jaesung Lim***
*Department of Software, Ajou University
**Jangwee Institute of National Defense Research Center, Ajou University
***Department of Computer Engineering, Ajou University

요 약

전술데이터링크는 전장 환경에서 모든 플랫폼들을 네트워크를 통해 하나로 묶어 전쟁 효과를 극대화할 수 있는 기반이 되는 통신 기술이다. 이러한 전술데이터링크의 원활한 운영을 위해 플랫폼간 시간 동기가 필수적이며, 대부분 GPS(Global Positioning System)를 사용하고 있다. 전세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 전술데이터링크인 Link-16 에서는 네트워크에 가입하면서 NTR(Network Time Reference)과의 시간을 동기화하는 절차를 제공한다. 이러한 시간 동기 절차는 대략적인 동기와 정밀한 동기의 두 단계로 구분된다. 대략적인 동기는 프레임이 시작하는 첫 타임 슬롯에서 주변 노드로부터 IEM(Initial Entry Message)을 수신하여 전송 시간만큼의 오류를 포함하는 시간 동기 방식이다. 본 논문에서는 모의 실험을 통해 IEM 을 전송하는 노드의 거리에 따른 메시지의 충돌 확률을 구하고, 그 충돌 확률에 따라 시간 동기에 소요되는 시간으로 Link-16 의 시간 동기 성능을 분석하였다.

1. 서론

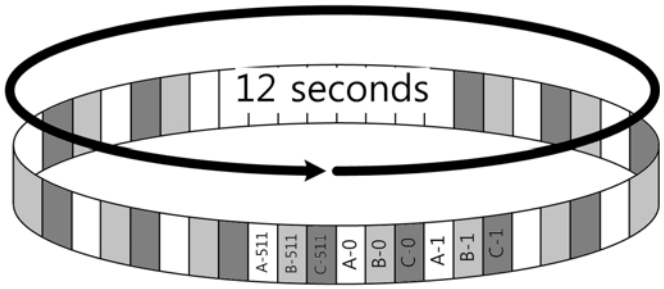
전술데이터링크(TDL: Tactical Data Link)는 전쟁에서 전술 네트워크를 운용하기 위해 기반이 되는 통신 기술로서 과거의 플랫폼기반의 전쟁 환경과 달리 네트워크 중심전(NCW: Network Centric Warfare)환경으로 변화하는 현대전에서 매우 중요한 역할을 담당한다. [2] 전장에서의 플랫폼들은 전술데이터링크를 통해 작전 정보, 피아 식별 정보, 표적 위치 정보, 표적 할당, 무장 정보 등 다양한 전술 데이터를 송수신할 수 있는 환경을 제공함으로써 전장의 상황을 공유하고 작전을 수행할 수 있도록 한다. [3] 전술데이터링크를 통해 공유되는 여러 정보들 가운데 시간 정보는 네트워크의 원활한 운영을 위해 가장 중요한 역할을 담당한다. 전술데이터링크는 TDMA(Time Division Multiple Access)를 기반으로 하기 때문에 네트워크에 가입된 노드 간의 시간 동기가 필수적으로 요구된다. 현재 대부분의 전술데이터링크는 네트워크의 시간 동기를 위해 GPS 를 주로 사용한다. 하지만 GPS 위성은 신호세기가 매우 약하고 암호화되지 않기 때문에 재밍 공격에 매우 취약한 특징이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 전술데이터링크에서는 GPS 에 독립된 별도의 시간 동기 방법이 필요하다. [3]

Link-16 은 전세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 미군의 전술데이터링크 표준이다. Link-16 의 단말기는 평시에 GPS 를 이용해 시간 동기를 획득하지만, 유사시 GPS 를 운영할 수 없는 환경에서도 시간 동기를 획득할 수 있도록 별도의 시간 동기 방식을 제공하고 있다. [4]

본 논문에서는 모의 실험을 통해 Link-16 의 IEM 을 전송하는 노드의 수에 따른 메시지 충돌 가능성을 실험해보고, 얻어진 메시지 충돌 확률을 이용해 시간 동기에 소요되는 시간을 구해 Link-16 의 시간 동기 방식에 대한 성능 분석을 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 Link-16 의 시간 동기 방식을 상세하게 소개하고, 3 장에서는 모의 실험에 대한 환경 및 모의 실험 결과를 설명하며, 4 장에서 결론을 맺으며 마무리하고자 한다.

2. Link-16 의 시간 동기 방식

Link-16 의 프레임은 (그림 1)과 같이 7.8125msec 길이의 타임 슬롯 1536 개로 구성되어 12 초를 주기로 반복되며, 재밍에 대비하기 위해 주파수를 도약하면서 51 개의 채널을 사용한다. 타임 슬롯이 할당되는 정보는 타임 슬롯의 번호와 <표 1>과 같은 반복되는 주기(RRN: Recurrence Rate Number)로 나타낸다.



(그림 1) Link-16 프레임 구조

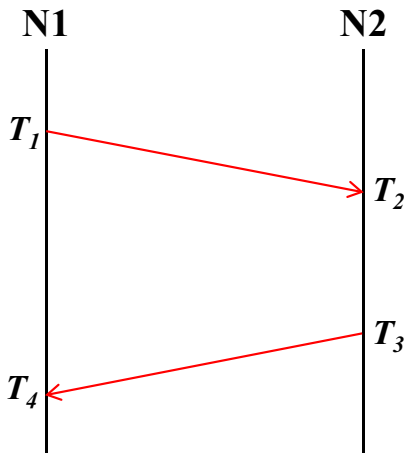
<표 1> Link-16 의 RRN [1]

RRN	Slot Interval	
	(slots)	(time)
15	3	23.4375 msec
14	6	46.8750 msec
13	12	93.7500 msec
12	24	187.5000 msec
11	48	375.0000 msec
10	96	750.0000 msec
9	192	1.50 sec
8	384	3.00 sec
7	768	6.00 sec
6	1536	12.00 sec
5	3072	24.00 sec
4	6144	48.00 sec
3	12288	1.6 min
2	24576	3.3 min
1	49152	6.4 min
0	98304	12.8 min

Link-16 은 TDMA 를 기반으로 운영되는 시스템이기 때문에 네트워크에 가입된 노드의 시간 동기가 필수적이다. Link-16 에서는 노드가 네트워크에 새로 가입할 때 시간 동기 절차를 별도로 운영하고 있다. 시간 동기 절차는 크게 대략적인 동기와 정밀한 동기로 구분된다. [1]

NTR 은 A-0 타임 슬롯에 IEM 을 전송한다. IEM 은 새로운 노드가 가입할 때 이 메시지를 수신하여 대략적인 동기를 획득하게 하기 위해 전송한다. Link-16 의 IEM 은 RRN 이 6 인 메시지로 12 초마다 반복되도록 설계되었다. (그림 1)에서 알 수 있듯이 IEM 은 매 프레임의 가장 첫 번째 슬롯에 전송된다. 뿐만 아니라 정밀한 동기를 획득한 노드도 24 초를 주기로 A-0 타임 슬로에 IEM 을 브로드캐스팅하여 NTR 과 인접하지 않은 노드에 대해 멀티 홉 시간 동기를 지원한다. [5] IEM 을 수신한 노드는 IEM 을 수신한 시간을 프레임의 시작시간으로 간주하고 시간을 조절한다. 이렇게 동기화된 시간은 NTR 로부터 메시지가 전송되는 데 걸리는 시간이 고려되지 않았기 때문에 전파 지연 시간만큼의 오류를 포함하게 된다.

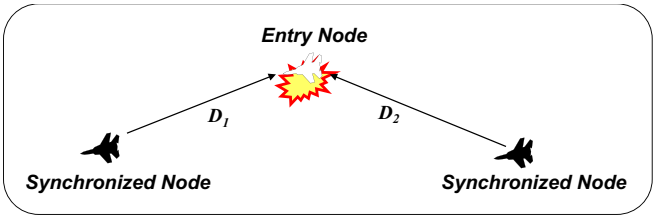
이렇게 획득된 시간의 정확도를 높이기 위해 Link-16 에서는 정밀한 동기 방식을 운영한다. 정밀한 동기는 IEM 을 전송한 노드와 해당 노드에게 할당된 하나의 특정 타임 슬롯 내에서 메시지를 주고받아 전파 지연 시간(T_{prop})을 획득하여 시간 보정에 반영하는 시간 동기 방법이다. (그림 2)와 같이 두 노드 간에 메시지를 교환하면 식 (1)을 이용하여 노드 N1 이 노드 N2 에게 시간을 동기화할 수 있다.



(그림 2) 정밀한 동기 방식

$$T_{prop} = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} \quad (1)$$

이러한 시간 동기 방식은 IEM 을 수신하여 대략적인 동기를 획득해야 가능한데, IEM 은 A-0 슬롯에서 모든 노드가 동시에 전송하는 방식이므로 충돌 가능성이 있다. 하지만 Link-16 은 초당 77,000 번의 주파수 도약을 하는 구조로서 하나의 펄스가 충돌이 나지 않기 위해서는 (그림 3)과 같이 메시지를 동시에 전송하는 두 노드의 거리 차가 200 ft 보다 커야 한다. [5] 즉, A-0 타임 슬롯에서 모든 노드가 IEM 을 브로드캐스팅하기 때문에 IEM 을 수신하는 노드는 그 거리 차가 200 ft 이내가 되면 충돌이 발생하여 다음 프레임의 IEM 을 수신할 때까지 12 초를 기다려야 하는 문제점이 있다. IEM 을 수신하지 못한 노드가 NTR 로부터 멀티 홉 간격의 노드라면 다음 IEM 을 수신하기 위해 24 초를 기다려야 하는 경우도 발생할 수 있다.



(그림 3) Link-16 의 메시지 충돌 조건

3. 모의 실험

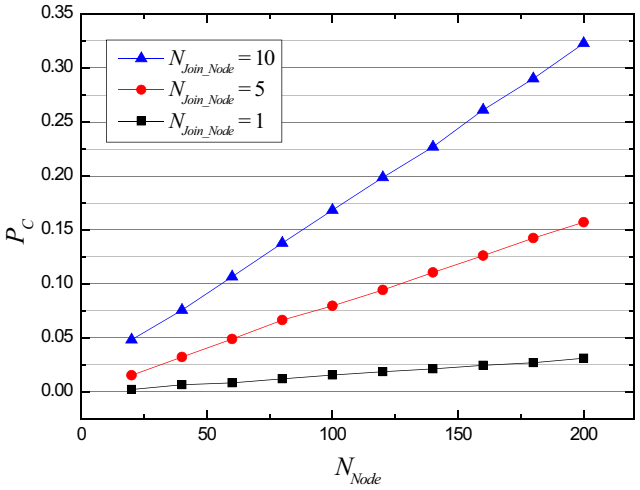
Link-16 의 IEM 충돌 확률(P_c)을 얻기 위한 모의 실험은 최대 메시지 도달 거리를 반경으로 한 원안의 면적에 노드를 균일하게 분포시키고, 모든 노드가 동시에 메시지를 전송할 때 이를 수신하여 네트워크에 가입하려고 하는 노드에 메시지가 충돌할 확률을 그 거리 차가 200 ft 이내일 경우 충돌이 나는 점을 이용하여 실험하였다. 모의 실험 변수는 아래 <표 2>와 같다. 총 1000 번의 모의 실험 결과에 대한 평균값을 그 결과로 사용하였으며, 최대 메시지 지원 반경은 300 nm 로 하였다.

<표 2> 모의 실험 변수

총 실험 횟수	1000 회
노드 수(N_{Node})	20 ~ 200 개 (20 개 간격으로 증가)

가입 노드 수(N_{Join_Node})	1 개, 5 개, 10 개
최대 서비스 지원 반경	300 nm

모의 실험에서는 메시지의 누적 충돌 횟수를 측정하고, 그 횟수를 전체 전송된 메시지 수로 나눔으로써 메시지의 충돌 확률(P_C)을 얻었고, 이를 N_{Join_Node} 를 1 개, 5 개, 10 개일 때의 환경에 따라 각각 측정하였다. 또한 P_C 의 노드 수 증가에 따른 변화를 측정하였다. 결과는 아래 (그림 4)와 같이 N_{Node} 가 증가함에 따라 P_C 선형으로 증가하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 N_{Join_Node} 가 클 때 P_C 가 높았다. N_{Join_Node} 가 1 개일 경우, N_{Node} 가 200 개까지 증가하여도 P_C 가 5% 이내로 나타났고, N_{Join_Node} 가 10 개일 경우 약 32%의 IEM 이 충돌이 발생하는 것으로 나타났다.



(그림 4) 노드 수(N_{Node})에 따른 IEM 충돌 확률(P_c)

위의 결과를 이용하여 k 번의 IEM 충돌이 일어날 경우의 확률은 아래 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$p(k) = P_c^{k-1}(1 - P_c) \tag{2}$$

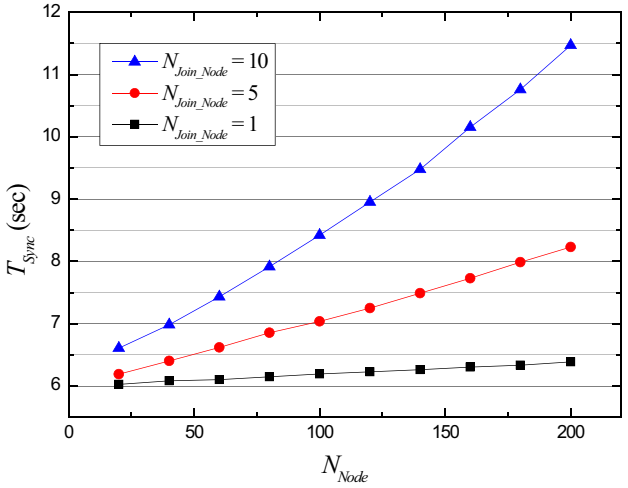
또한 k 번 충돌이 일어날 경우 정밀한 동기를 하기 위해 시간 동기를 획득하는 데에 소요되는 평균 시간은 아래 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$f(k) = (k-1)\,T_{frame} + \frac{T_{frame}}{2} \tag{3}$$

식 (2)와 (3)을 이용해서 시간 동기에 소요되는 시간에 대한 기대값(E[T_{sync}])을 아래 식 (4)와 같이 얻을 수 있다.

$$E[T_{sync}] = \sum_{k=1}^{\infty} p(k)f(k) \tag{4}$$

본 논문에서 수행한 모의 실험에서는 T_{Sync} 에 대한 기대값이 무한대가 되기 때문에 5 번째 IEM 을 수신할 때 성공했다고 가정하고, 결과를 측정하였다. (그림 5)는 N_{Node} 에 따른 T_{Sync} 의 변화를 나타낸다. N_{Join_Node} 가 1 일 경우 N_{Node} 가 200 개 까지 증가하여도 6.5 초 이내에 모든 노드가 동기를 획득하였고, N_{Join_Node} 가 10 개일 경우 N_{Node} 가 150 을 넘어가면서 10 초 이상의 시간이 소요되는 것으로 나타났다.



(그림 5) 노드 수(N_{Node})에 따른 시간 동기에 소요된 시간(T_{sync})

4. 결론

본 논문에서는 Link-16 내의 시간 동기 방식에 메시지 충돌 가능성을 지적하고 그 확률을 구해 시간 동기에 소요되는 시간의 기대값을 모의 실험을 통해 얻었다. 본 논문에서 지적한 IEM 충돌 가능성에 대한 문제점을 보완할 새로운 프로토콜을 제안한다면 시간 동기에 소요되는 시간을 줄이고 노드의 빠른 가입을 지원할 수 있도록 할 수 있을 것이다.

Acknowledgement

이 논문은 2013 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2013R1A2A1A01016423).

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2013-(H0301-13-2003)).

참고문헌

[1] Gruman Northrop, "Understanding Link-16, a guidebook for new users", 3rd Ed.

[2] 백호기, 임재성, 구자열, 오일혁, “전파 지연이 긴 공중 전술 TDMA 네트워크에서 송신자 간 거리 기반 보호 시간 제어 기법”, 한국통신학회논문지, 2012, 37(11) pp. 1104-1111.

[3] 백호기, 정승명, 임재성, “네트워크중심작전을 위한 전술 데이터링크 기술동향” 정보과학회지, 2010, 28(7), pp. 59-69.

[4] Nan Wu, Hua Wang, Jingming Kuang, "Performance analysis and simulation of JTIDS network time synchronization," *Frequency Control Symposium and Exposition, 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International* , vol., no., pp.836,839, 29-31 Aug. 2005

[5] Paul, S. R. "Link 16 Operations for the Air Force Wing and Unit Manager" *The MITRE Corporation Documentation* 3 (1999): 326-348.