

# Link-16에서 시간 동기를 위한 충돌 확률 성능 분석

김동영\*<sup>1</sup>, 김기석\*\*<sup>1</sup>, 김진기\*\*<sup>2</sup>, 최주영\*\*\*<sup>1</sup>, 송영환\*\*\*<sup>2</sup>, 윤동원\*<sup>2</sup>

## Collision Probability Analysis for Fine Synchronization in Link-16

Dongyeong Kim\*<sup>1</sup>, KI SEOK KIM\*\*<sup>1</sup>, JIN KI KIM\*\*<sup>2</sup>, Joo-Young Choi\*\*\*<sup>1</sup>,  
Young-Hwan Song\*\*\*<sup>2</sup>, and Dongweon Yoon\*<sup>2</sup>

---

이 논문은 2020년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UC200030ED)

---

### 요약

본 논문에서는 전술 데이터 링크 표준인 Link-16의 정밀 시간 동기 과정에서 발생하는 JU(Joint Tactical Information Distribution System Unit)들 간의 충돌 확률을 분석하고 안정적인 통신을 위해 JU가 각 타임 슬롯에서 정밀 시간 동기를 시도할 확률과 전체 JU의 수에 따른 정밀 시간 동기 성공 확률을 계산한다. JU가 정밀 시간 동기에 성공할 확률, 여러 차례 정밀 시간 동기를 시도하였을 때 한 번 이상 성공할 확률, 그리고 모든 JU가 각각 일정 횟수 이내에 정밀 시간 동기를 성공할 확률을 유도하고, 유의수준  $\alpha$ 에서 정밀 동기 성공 확률이  $1 - \alpha$  이상이 되기 위해 필요한 파라미터 조건을 계산한다. 유도된 확률식을 컴퓨터 모의실험을 통해 검증하고 타당성을 입증하여, Link-16의 정밀 시간 동기 시스템의 안정성과 효율성을 최적화할 수 있는 정밀 시간 동기 충돌 확률 분석 방법을 제안한다.

### Abstract

In this paper, we analyze the collision probability among JU(Joint Tactical Information Distribution System Unit)s that occur in the fine synchronization of Link-16, a tactical data link standard, and calculate the probability that JUs attempt fine synchronization in each time slot and the total number of JUs needed for reliable communication. We derive the probability that each JU will succeed in fine synchronization, the probability of success at least once when fine synchronization is attempted consecutively, the probability of all JUs to succeed at least once for some fine synchronization attempts, and the parameter condition needed for the probability of all JUs to succeed at a value of  $1 - \alpha$  or more where  $\alpha$  denotes the significance level. We propose a method for optimizing the reliability and efficiency of the Link-16's fine synchronization system by verifying the validity of a derived probability formula through computer simulation experiments.

### Keywords

tactical data link, Link-16, synchronization, random access, collision

---

\* 한양대학교 융합전자공학부(\*<sup>2</sup> 교신저자)

- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0000-0001-5369-2424>

- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0001-9631-3500>

\*\* 국방과학연구소

- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0000-0003-3225-8789>

- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0001-7630-6020>

\*\*\* 한화시스템(주)

- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0009-0009-5383-271X>

- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0002-5582-3317>

• Received: Feb. 16, 2023, Revised: Mar. 28, 2023, Accepted: Mar. 31, 2023

• Corresponding Author: Dongweon Yoon

Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04763, Korea

Tel.: +82-2-2220-0362, Email: [dwyoon@hanyang.ac.kr](mailto:dwyoon@hanyang.ac.kr)

## 1. 서 론

2022년 2월 러시아-우크라이나 전쟁이 발발했다. 전 세계는 압도적인 군사력을 가진 러시아가 우크라이나를 금방 점령할 것이라고 예측했지만, 4개월이 지난 2022년 6월부터 우크라이나는 러시아에게 점령당한 지역들을 차례차례 탈환하고 있으며, 마침내 11월 헤르손을 탈환하였다. 영국의 정보통신본부(GCHQ) 수장인 제레미 플레밍은 모두의 예상과 달리 러시아가 전쟁에서 고전하고 있는 이유가 러시아군의 정보전 패배때문이라고 주장했다[1].

현대전과 미래전에 있어서 정보전은 전쟁 전체의 판도를 바꿀 수 있을 만큼 영향력이 지대하다는 점을 간과하고 있던 미국은 일찍부터 정보전의 우위를 달성하기 위해 전술 데이터 링크 Link-16을 개발하고 실전 배치하여 운용하고 있다[2]-[5]. 전술 데이터 링크는 지리적으로 분산된 전투 요소들을 서로 연결하여 실시간으로 데이터를 교환할 수 있게 하는 실시간 정보 공유 체계이다. 이를 통해 군은 전체 전장 상황에 대한 정보 공유 및 판단을 신속화 하여, 정보 우위를 달성하고 선제적 행동을 취함으로써 보유한 전투 요소들의 효율성을 극대화할 수 있다[6].

미국에서 운용 중인 Link-16의 경우, 다른 전술 데이터 링크와 달리 상대방의 GPS 신호 재밍에 대비하여 GPS 대신 별도의 시간 동기 방법을 이용하여 JU(Joint Tactical Information Distribution System Unit)들 간의 동기를 맞춘다[5]. 이때 시간 동기 방법은 IEM(Initial Entry Message)을 이용하여 시간 동기를 획득하는 초기 시간 동기(Coarse synchronization) 과정과 초기 동기 이후 패킷 왕복 시간(RTT, Round Trip Timing)를 이용하여 시간 동기를 획득하고 유지하는 정밀 시간 동기(Fine synchronization) 과정으로 2단계에 걸쳐 진행된다. Link-16은 TDMA(Time Division Multiplexing Access)를 기반으로 각 JU가 NTR(Network Time Reference)과 시간 동기화에 필요한 메시지를 송수신함으로써 시간 동기를 이루는데, 이 과정에서 각 JU는 랜덤 액세스로 NTR에게 메시지를 송신하기 때문에 JU들 간에 충돌이 발생할 수 있다[7].

이와 관련하여 충돌을 줄이기 위한 많은 초기 동기 연구들이 진행되어 왔다[8]-[10]. 참고문헌 [8]에서는 Link-16의 초기 시간 동기 방식을 JU들간의 거리에 따라 모의실험을 통해 분석하였으며, [9]에서는 동적 릴레이 노드 선택 방식을 통한 초기 동기 방식을 제시하였고, [10]에서는 초기 동기에서의 충돌 확률을 낮추면서 빠른 시간 동기 전략을 제안하였다.

정밀 시간 동기를 위해 Link-16에서는 정밀 시간에 사용되는 타임 슬롯 풀에서 각 JU가 임의의 타임 슬롯을 랜덤하게 선택하는 랜덤 액세스 방식을 사용한다. 랜덤 액세스 방식은 각 JU가 서로 어떤 타임 슬롯에 접근하는지 알지 못하는 상황에서 효과적으로 시간 동기를 맞출 수 있는 접근 방법이다. 유한한 타임 슬롯 풀에서 랜덤하게 정밀 시간 동기 시도가 이루어지기 때문에 필연적으로 충돌이 발생할 수밖에 없고, 이러한 충돌이 많아지면 전체 시스템이 불안정해지게 된다. 충돌을 줄이기 위해 RTT 타임 슬롯의 풀의 크기를 증가시키거나, JU가 정밀 시간 동기를 시도하는 횟수를 낮추도록 JU의 정밀 시간 동기 시도 확률을 감소시키는 방법이 있다. 그러나 이러한 방법은 각각 전술 데이터 링크의 효율성이나 안정성을 크게 낮추게 되므로, RTT 타임 슬롯 풀의 크기와 JU의 정밀 시간 동기 시도 확률을 적절하게 선택하는 것은 중요한 문제이다.

본 논문에서는 랜덤 액세스 기반 정밀 시간 동기 시스템에서의 충돌 확률 분석을 기반으로 일정 수준의 안정성을 만족하는 가장 높은 데이터 송수신 효율성을 갖도록 파라미터를 설정하는 방법을 제시하고 성능을 분석한다. JU가 정밀 시간 동기 성공할 확률과 연속적으로 정밀 시간 동기를 시도하였을 때 한 번 이상 성공할 확률, 그리고 모든 JU가 각각 일정횟수 이내에 정밀 시간 동기를 성공할 확률을 유도하고, 유의수준  $\alpha$ 에서 모든 JU가 정밀 시간 동기를 1회 이상 성공할 확률이  $1-\alpha$  이상이 되기 위해 필요한 파라미터 조건을 계산한다. 컴퓨터 모의실험을 통해 성능 분석을 하고 결과를 비교하여 유도된 확률식을 검증한다. 본 논문에서 제안하는 방법을 이용하면 주어진 환경에서 안정적이고 효율적으로 정밀 시간 동기 시스템 운용에 필요한 최적화된 파라미터를 고속으로 찾을 수 있을 것이다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 TDMA에 기반하여 Link-16에서 사용하는 정밀 시간 동기 방식과 이에 따른 충돌, 충돌에 관여하는 조건들에 대하여 살펴본다. 3장에서는 랜덤 액세스 기반 Link-16에서 정밀 시간 동기에서의 동기 성공 확률 등의 계산식을 closed-form으로 유도한다. 유도된 확률식을 모의실험을 통해 검증하고 JU의 수와 여러 파라미터에 대하여 정밀 시간 동기 시스템의 안정성과 효율성을 최적화할 수 있는 정밀 시간 동기 성공 확률 분석 방법을 제시한다. 마지막으로 4장에서는 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

### 2.1 Link-16 정밀 시간 동기 방식

Link-16은 TDMA를 기반으로 운용되며, 각 시간은 프레임과 타임 슬롯으로 표현된다. 이 때, 각 프레임은 12초 길이며, 7.8125msec 길이를 갖는 타임 슬롯 1536개로 구성된다. 각 프레임에서 타임 슬롯들은  $A-0, B-0, C-0, A-1, B-1, C-1, \dots, A-511, B-511, C-511$ 로 표현된다. JU들은 타임 슬롯 단위로 메시지를 송수신하여 시간 동기를 맞추고 데이터를 송수신 한다.

Link-16은 TDMA를 기반으로 하므로, 네트워크에 가입된 JU의 시간 동기가 반드시 필요하다. 시간 동기를 위해 Link-16에서는 JU가 네트워크에 가입

할 때 두 단계의 시간 동기 절차를 따르게 된다. 첫 번째 단계는 초기 동기 과정으로 NTR이 매 프레임의 첫 번째 타임 슬롯에 IEM을 전송하면 이를 수신한 JU는 대략적인 동기를 획득할 수 있다. 두 번째 단계는 정밀 시간 동기 과정으로 JU는 사전에 시간 동기에 사용되기로 결정된 타임 슬롯 풀에서 임의로 하나의 타임 슬롯을 선택하고, 해당 타임 슬롯에서 NTR과 RTT 메시지를 송수신하여 정밀하게 동기 오차를 보정한다.

그림 1에서, 정밀 시간 동기를 위해 JU는 NTR에게 RTT-I 메시지를 송신하고, NTR로부터 4.275msec에 송신된 RTT-R 메시지를 수신한다. RTT-R 메시지는 NTR이 RTT-I 메시지를 수신한 시각인  $TOA_i$ 가 있기 때문에, JU는 RTT-R 메시지를 송신한 시각인  $TOA_r$ 과  $TOA_i$ 를 이용하여 클럭 에러  $E$ 를 계산함으로써 시간 동기를 맞출 수 있다.

위 두 과정을 통해 정밀 시간 동기를 맞춘 JU는 이후 주기적으로 정밀 시간 동기 과정을 반복하면서 시간이 지나면서 지속적으로 발생하게 되는 동기 오차를 보정한다.

### 2.2 Link-16 시간 동기 충돌 조건

Link-16에서는 정밀 시간 동기를 위해 각 JU가 랜덤 액세스 기반으로 RTT 타임 슬롯 풀에서 랜덤하게 타임 슬롯을 결정한다. 이때 동일한 타임 슬롯을 선택한 JU들 간에 충돌이 발생한다.

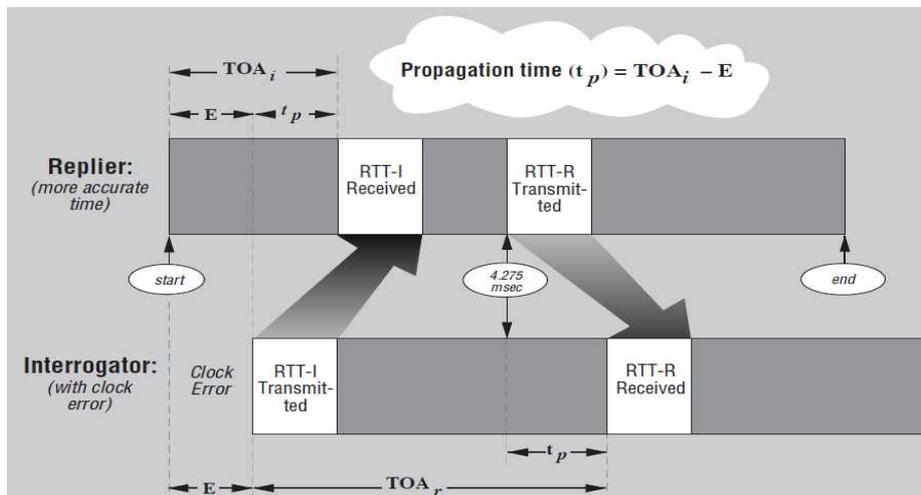


그림 1. 정밀 시간 동기 과정[5]  
Fig. 1. Fine synchronization process[5]

각 타임 슬롯에서 JU의 정밀 시간 동기 시도 확률이 낮으면 정밀 시간 동기 과정에서 충돌이 발생할 확률 또한 낮아지므로 정밀 시간 동기기에 사용되는 타임 슬롯의 수를 낮추고 데이터 송수신에 사용되는 타임 슬롯의 수를 높여 데이터 효율성을 증가시킬 수 있다. 반면에 정밀 시간 동기 오차를 수정하기 위해 수행해야 하는 정밀 시간 동기 시도 빈도가 줄어들게 되어 오차가 커짐으로써 시스템이 불안정해질 수 있다. 반대로 정밀 시간 동기 시도 확률이 높으면, 충돌이 발생할 확률이 높아지게 되어 정밀 시간 동기기에 사용되는 타임 슬롯의 수를 늘리고, 데이터 송수신에 사용될 타임 슬롯의 수를 줄여야 하므로 데이터 송수신에 사용되는 타임 슬롯의 수가 줄어들어 전체적인 시스템 효율성이 열화된다. 따라서, 전체 JU의 수  $N$ , 각 타임 슬롯에서 JU가 정밀 시간 동기를 시도할 확률  $\beta$ 에 따라 충돌 확률을 계산하고, 이에 기반하여 시스템 파라미터를 결정하는 것이 중요하다.

한편, Link-16에서 각 JU는 여러 차례 충돌이 발생하여 정밀 시간 동기를 연속으로 실패하더라도, 일정 시간동안은 정확한 시간 동기를 유지할 수 있다. 이러한 시간을  $C$ 라고 할 때, 이 시간동안 1회라도 정밀 시간 동기기에 성공한다면 동기 오차를 수정하여 틀어진 시간 동기를 다시 정확하게 맞출 수 있다. 따라서 모든 JU가 일정 시간  $C$ 동안 1회라도 정밀 시간 동기기에 성공할 확률이 충분히 높다면, 단일 타임 슬롯에서의 정밀 시간 동기 성공 확률이 낮다고 하더라도 시스템이 안정적으로 유지될 수 있다. 이를 수학적으로 고려하기 위해 우선,  $C$  동안의 정밀 시간 동기 시도 횟수  $s$ 를 설정하고, 이에 따라  $\beta = \frac{C}{s}$ 로서 각 타임 슬롯에서 JU가 정밀 시간 동기를 시도할 확률을 정의한다. 그리고  $N$ 기의 전체 JU가 각각  $s$ 회의 정밀 시간 동기 시도 안에 1회 이상 정밀 시간 동기기에 성공할 확률을 계산한다.

Link-16 정밀 시간 동기 시스템의 안정성 분석을 위한 충돌 조건을 정리하면 다음과 같다.

- 전체 JU의 수  $N$
- 정밀 시간 동기 시도 확률  $\beta$

- 정밀 시간 동기 시도 횟수  $s$
- 정밀 시간 동기 유지 시간  $C$

### III. Link-16 정밀 시간 동기 충돌 확률 유도 및 성능 분석

#### 3.1 Link-16 충돌 확률 계산

3장에서는 정밀 시간 동기 관련 동기 성공 확률을 계산한다. 특정 JU가 정밀 시간 동기기에 성공하는 경우는 정밀 시간 동기를 시도하는 타임 슬롯에서 다른 JU들과 충돌하지 않거나, 충돌하더라도 동기기에 성공하는 경우이다. 전자의 경우 확률 1로 정밀 동기를 성공하고, 후자의 경우, NTR은 언제나 하나의 JU에게만 응답 가능하므로, 충돌하는 JU의 수가  $i$ 인 경우  $\frac{1}{i+1}$ 의 확률로 정밀 동기를 성공한다. 따라서 모든 가능한  $i$ 에 대하여 충돌하는 JU의 수가  $i$ 가 될 확률과  $\frac{1}{i+1}$ 의 곱을 모두 더하면 동기 성공 확률을 계산할 수 있다. 이를 정리하면, 각 JU가 정밀 시간 동기를 시도하여, 정밀 시간 동기기에 성공할 확률  $PR_1$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 PR_1 &= \sum_{i=0}^{N-1} \left[ {}_{N-1}C_i \beta^i (1-\beta)^{N-1-i} \frac{1}{i+1} \right] \quad (1) \\
 &= \sum_{i=0}^{N-1} \left[ {}_{N-1}C_i \left( \frac{\beta}{1-\beta} \right)^i \frac{1}{i+1} \right] \cdot (1-\beta)^{N-1} \\
 &= \frac{\left( \frac{\beta}{1-\beta} + 1 \right)^N - 1}{\left( \frac{\beta}{1-\beta} \right)^N} \cdot (1-\beta)^{N-1} \\
 &= \frac{1 - (1-\beta)^N}{\beta N}
 \end{aligned}$$

JU들이 정밀 시간동기를 수행하는 것은 시간 동기를 맞추기 위함이고, 이러한 시간 동기는 시간이 흘러감에 따라 조금씩 오차가 발생하고 누적된다. 하지만, 단기간 안에는 누적되는 오차가 적기 때문에, 일정 횟수 이하로 정밀 시간 동기기에 실패하더라도 일정 수준 내의 시간 동기 정확도를 유지할 수 있다. 즉, JU가  $s$ 번 연속으로 정밀 시간 동기를 실패하지 않는 이상, 해당 JU는 일정 수준 미만의 시

간 동기 오차를 유지할 수 있으므로, 이를 고려하여 정밀 시간 동기를  $s$  번 수행했을 때, 1번 이상 정밀 시간 동기에 성공할 확률  $PR_2$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} PR_2 &= \sum_{j=1}^s (1-PR_1)^{j-1} PR_1 \\ &= PR_1 \frac{1-(1-PR_1)^s}{1-(1-PR_1)} \\ &= 1-(1-PR_1)^s \end{aligned} \quad (2)$$

Link-16 시스템에서 안정적인 시간 동기를 달성하기 위해서는 전체 JU가 모두 안정적으로 시간 동기에 성공할 수 있어야 한다. 이를 고려하여  $N$ 기의 모든 JU가 각각  $s$  번 이내에 정밀 시간 동기를 성공할 확률  $PR_3$ 을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} PR_3 &= (PR_2)^N \\ &= (1-(1-PR_1)^s)^N \\ &= \left(1-\left(1-\frac{1-(1-\beta)^N}{\beta N}\right)^s\right)^N \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여, 주어진  $N$ ,  $\beta$ ,  $s$ 에 대하여  $PR_3$ 를 계산하여, Link-16의 시간 동기 시스템의 안정성을 파악할 수 있다.

$PR_3$ 는  $N$ ,  $\beta$ ,  $s$ 에 관하여 정의된 식이다. 여기서,  $s$ 는  $C$ 의 시간동안 JU가 정밀 시간 동기를 최대 시도할 수 있는 횟수,  $\beta$ 는 JU가 각 타임 슬롯에서 정밀 시간 동기를 시도할 확률이므로  $C = \frac{s}{\beta}$ 가 성립하기 때문에 고정된  $C$ 에 대하여  $s$ 와  $\beta$ 는 비례한다. 따라서, 고정된  $C$ 에 대하여 최적화된  $\beta$ 를 찾으면  $s$ 는 자동으로 결정된다.

한편,  $\beta$ 가 작을수록 JU의 RTT 메시지 송수신 빈도와 함께 시스템의 부하가 줄게 되므로, 시스템 안정성을 만족하는 한  $\beta$ 는 작을수록 좋다. 이에 따라 이 논문에서는 주어진 전체 JU의 수  $N$ 과  $C$ 가 주어졌을 때  $PR_3$ 이 유의수준  $\alpha$ 에 대해  $1-\alpha$ 보다 크거나 같게 되도록 하는 가장 작은  $\beta$ 를 찾음으로써, 안정성은 보장하면서 부하가 최소화되도록 Link-16 시간 동기 시스템을 효율화하고 최적화한다.

$PR_3 \geq 1-\alpha$ 을 만족하는  $\beta$  중 가장 작은 값을

찾기 위해, 모든 가능한  $\beta$  값에 대하여  $\beta$ 를 점진적으로 증가시켜가며 전수조사를 할 수 있다. 하지만 이 방법은 계산복잡도가 높으므로, 이 논문에서는 계산복잡도를 줄이기 위해  $N$ 과  $\beta$ 에 관한 표를 만들어  $\beta$ 를 고속으로 탐색하는 방법을 제시한다.

식 (3)에서  $s$ 와  $PR_3$ 에 각각  $\beta C$ 와  $1-\alpha$ 를 대입하고 변환하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\left(1-(1-\alpha)^{\frac{1}{N}}\right)^{\frac{1}{C}} = \left(1-\frac{1-(1-\beta)^N}{\beta N}\right)^{\beta} \quad (4)$$

식 (4)의 좌변은 주어진 파라미터인  $N$ ,  $C$ ,  $\alpha$ 로만 구성되어 있으므로 쉽게 직접 계산이 가능하다. 반면에 우변은  $N$ 과  $\beta$ 로 구성되어 있어 여러 가능한  $\beta$  값을 고려해야 하기 때문에 여러 차례 계산해야 한다. 이 때, 여러 차례 계산하는 대신,  $N$ 을 행으로,  $\beta$ 를 열로 갖고, 이에 대응하는 (4)의 우변의 값을 원소로 갖는 2차원 행렬 형태의 참조표를 미리 만들어 두고, 참조표에서 대응하는 값을 찾음으로써 계산을 고속화 할 수 있다.

참조표를 이용하여 원하는 유의수준  $\alpha$ 와 파라미터  $C$ ,  $N$ 에 관하여 최적화된  $\beta$ 를 찾는 방법은 다음과 같다.

1. 유의수준  $\alpha$ 와 파라미터  $C$ , 그리고 전체 JU의 수  $N$ 에 대하여 좌변을 계산.
2. 참조표를 통해 주어진  $N$  행에 대하여 해당 좌변보다 작거나 같은 값 중 가장 큰 값에 대응하는 열의  $\beta$  결정.

식 (4)의 우변이 작을수록  $PR_3$ 는 커지므로, (4)의 우변의 값이  $1-\alpha$ 보다 작거나 같은 값 중에서 가장 큰 값에 대응하는  $\beta$ 를 찾아야 한다.

(4)의 우변을  $N$ 을 행,  $\beta$ 는 열이 되는 표로 정리할 때,  $\beta$ 는 0.01 이내의 간격이면 충분하므로, Link-16에서 Link로 연결될 전체 JU의 최대 수를  $N_{\max}$ 라 한다면,  $N_{\max} \times 100$  크기의 표를 아래와 같이 생성할 수 있다.

표 1에서는 공간을 고려하여 전체 표의 일부( $N$ 은 15부터 25,  $\beta$ 는 0.01부터 0.07)만 표현하였다. 참조표를 이용하는 방법은 다음과 같다. 예를 들어, 유의수준  $\alpha = 0.01$ ,  $N = 20$ ,  $C = 150$ 이라면, 식 (4)

의 좌변을 통해 계산되는  $\left(1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{N}}\right)^{\frac{1}{C}}$ 의 값은 약 0.9506이 된다. 표 1에서  $N=20$ 에 해당하는 행에서 0.9506보다 작거나 같으면서 가장 큰 값은 0.9500이며 이에 대응하는  $\beta$ 는 0.05이다. 따라서  $\beta=0.05$ 일 때,  $1 - \alpha = 0.99$  이상의 확률을 갖는  $PR_3$ 를 갖게 된다. 실제로  $\beta=0.04$ 에서  $PR_3$ 는 0.9848이 되며,  $\beta=0.05$ 일 때,  $PR_3$ 는 0.9909가 되어  $1 - \alpha$  이상의 값을 갖는다.

표 1.  $N$  과  $\beta$ 에 따른 참조표  
Table 1. Reference table for  $N$  and  $\beta$

$N \setminus \beta$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
15	0.9733	0.9598	0.9506	0.944	0.9391	0.9353	0.9325
16	0.9740	0.9610	0.9523	0.9462	0.9416	0.9382	0.9357
17	0.9746	0.9621	0.9539	0.9481	0.9439	0.9409	0.9386
18	0.9751	0.9632	0.9554	0.9500	0.9461	0.9433	0.9413
19	0.9757	0.9641	0.9568	0.9517	0.9481	0.9456	0.9438
20	0.9762	0.9651	0.958	0.9533	0.9500	0.9477	0.9461
21	0.9766	0.9659	0.9593	0.9548	0.9518	0.9497	0.9482
22	0.9771	0.9668	0.9604	0.9562	0.9534	0.9515	0.9502
23	0.9775	0.9675	0.9615	0.9576	0.9549	0.9532	0.9521
24	0.9779	0.9683	0.9625	0.9588	0.9564	0.9548	0.9538
25	0.9783	0.969	0.9635	0.9600	0.9578	0.9563	0.9555

최적의 타임 슬롯 할당을 위한 모든 과정을 요약하여 블록도로 나타내면 그림 2와 같다.

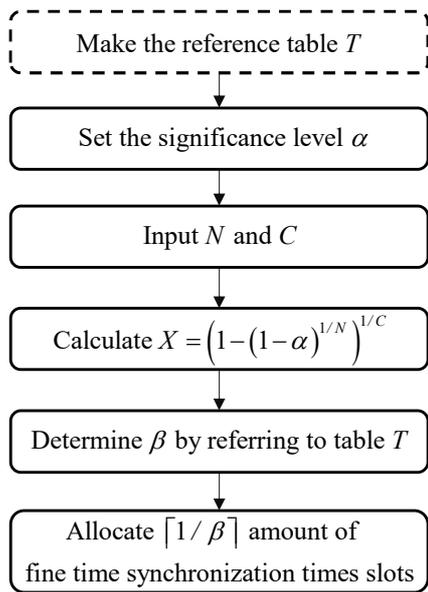


그림 2. 타임 슬롯 할당 블록도  
Fig. 2. Block diagram of time slot allocation

그림 2의 참조표  $T$ 는  $N$ 을 행,  $\beta$ 를 열로 가지며 식 (4)의 우변의 값을 원소로 갖는 표를 의미한다. 미리 계산하여 저장한 참조표  $T$ 가 있을 때,  $\alpha$ 를 설정하고  $N, C$ 를 입력한 뒤에 식 (4)의 좌변  $X$ 를 계산한다. 참조표  $T$ 의  $N$  행에서  $X$ 보다 작거나 같은 원소 중에 가장 큰 원소의 열에 대응하는  $\beta$ 를 찾는다. 정밀 시간 동기 시스템에서 프레임 당  $\lceil \frac{1}{\beta} \rceil$  만큼의 정밀 시간 동기 타임 슬롯을 할당하면 식 (4)에 따라  $1 - \alpha$  이상의 안정성을 보장하면서 최적화된 데이터 송수신 효율성을 달성할 수 있다.

### 3.2 모의실험 및 성능분석

앞에서 유도한 확률 계산 결과를 확인하기 위하여, 식 (1), (2), 그리고 (3)을 통해 계산 가능한 확률의 이론치와 컴퓨터 모의실험을 통해 얻어진 확률의 실험치를 비교하였다. 동기 성공 확률 실험치는 모의실험을 통해  $N$ 기의 전체 JU가 각 타임 슬롯에서  $\beta$ 의 확률로 랜덤하게 정밀 시간 동기를 시도하는 경우에 발생하는 동기 성공 횟수를 내부 반복 횟수로 나누어 구하였다. 정확도를 위해 다양한  $N, s, C$ 에 대하여 내부 반복 횟수 100,000회로 실험한 결과, 모든 경우에서 확률이 일치하는 것을 확인하였다.

그림 3에서는 전체 JU의 수  $N$ 이 증가할 때,  $PR_1, PR_2$  그리고  $PR_3$ 의 변화를 살펴보았다.  $N=20, s=5, \beta=0.05$ 인 경우, 모든 JU가 각각 5번 이내에 정밀 시간 동기를 성공할 확률이 약 0.9 이상이 되는 것을 알 수 있다.

그림 4에서는  $s$ 가 변할 때,  $PR_1, PR_2, PR_3$ 의 변화를 살펴보았다.  $C$ 가 고정되어 있고,  $s$ 가 증가함에 따라  $\beta = \frac{s}{C}$ 로 비례하여 증가하기 때문에, 1회 안에 정밀 시간 동기에 성공할 확률인  $PR_1$ 은 감소하지만,  $s$ 회 안에 정밀 시간 동기에 성공할 확률인  $PR_2$ 는 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5에서는  $C$ 가 증가할 때,  $PR_1, PR_2$  그리고  $PR_3$ 의 변화를 살펴보았다.  $C$ 가 커질수록 동일한  $\beta$ 에서 더 큰  $s$ 를 갖게 되어, 정밀 시간 동기 시도 횟수가 증가하기 때문에, 1회 안에 정밀 시간 동기에 성공할 확률인  $PR_1$ 은 변화가 없고,  $s$ 회 안

에 정밀 시간 동기 성공 확률인  $PR_2$ 와  $PR_3$ 가 증가하는 것을 확인하였다.

#### IV. 결 론

이 논문에서는 전술 데이터 링크 표준인 Link-16의 정밀 시간 동기 과정에서 발생하는 JU들 간의 충돌 확률을 분석하고 안정적인 통신을 위해 JU가 각 타임 슬롯에서 정밀 시간 동기를 시도할 확률과 전체 JU의 수에 따른 정밀 시간 동기 성공 확률을 계산하였다.

정밀 시간 동기 유지 시간  $C$ 가 주어졌을 때, JU가 정밀 시간 동기 성공 확률, 연속적으로 정밀 시간 동기를 시도하였을 때 한 번 이상 성공 확률, 그리고 모든 JU가 일정 시간 이내에 1회 이상 정밀 시간 동기를 성공할 확률의 식들을 closed form으로 각각 유도하고, 유의수준  $\alpha$ 에서 모든 JU가 정밀 시간 동기를 1회 이상 성공할 확률이  $1-\alpha$  이상이 되기 위해 필요한 파라미터 조건을 계산하였다. 컴퓨터 모의실험을 통해 다양한  $N, \beta, C, s$ 에 대하여 이론적으로 얻어진 확률과 시뮬레이션 결과를 비교하여 유효성을 검증하고 최적화하였다. 또한, 최적화된 파라미터를 찾기 위해 필요한 계산 복잡도를 줄이기 위하여,  $N$ 과  $\beta$ 에 대하여 정리하고, 이를 활용하여 주어진  $C, N, \alpha$ 에 대하여  $\beta$ 를 빠르게 찾을 수 있는 방법도 제시하였다.

이 본문에서의 결과를 활용하면 Link-16이 적용되는 상황의 파라미터들에 관하여 최적화된  $\beta$ 를 적용하여 Link-16 데이터 송수신 효율을 극대화하고 시간 동기 안정성을 높일 수 있을 것이다.

본 연구에서는 모든 JU가 아무런 사전 정보 없이 랜덤하게 타임 슬롯을 선택하는 경우의 동기 충돌 확률을 유도하고 이를 바탕으로 동기 성능을 분석하였다. 이를 바탕으로 통신 과정에서의 충돌 또는 동기 성공을 통해 얻는 부가 정보들을 이용하여 정밀 동기 시스템의 안정성과 효율성을 보다 향상시키는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### References

[1] J. Fleming, "The head of GCHQ says Vladimir Putin is losing the information war in Ukraine", Economist, Aug. 2022.

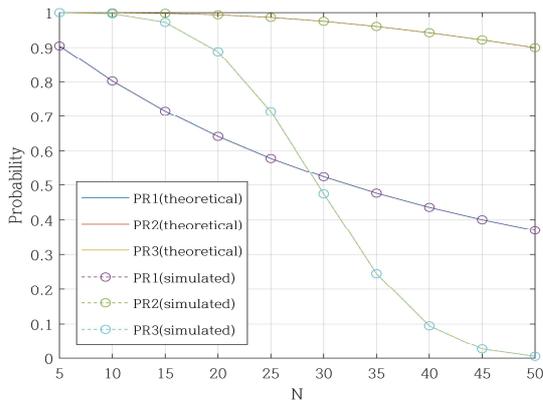


그림 3.  $N$ 에 따른 확률 비교 ( $C=100, s=5, \beta=0.05$ )  
Fig. 3. Comparison of probabilities versus  $N$   
( $C=100, s=5, \beta=0.05$ )

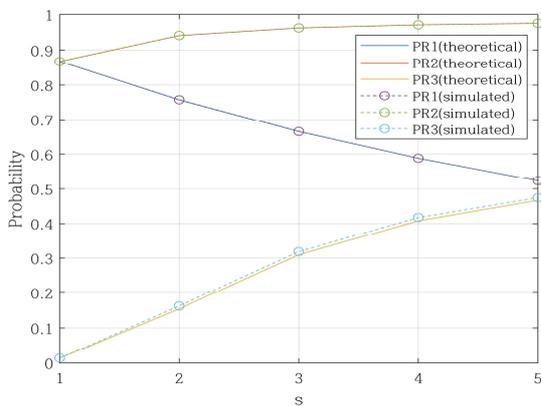


그림 4.  $s$ 에 따른 확률 비교 ( $N=30, C=100$ )  
Fig. 4. Comparison of probabilities versus  $s$   
( $N=30, C=100$ )

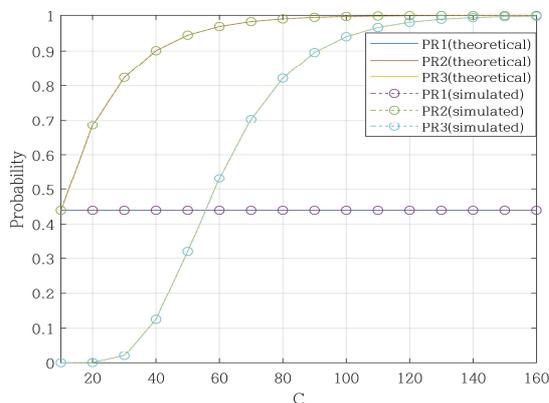


그림 5.  $C$ 에 따른 확률 비교 ( $N=20, \beta=0.1$ )  
Fig. 5. Comparison of probabilities versus  $C$   
( $N=20, \beta=0.1$ )

[2] Y. Jung, Y. Cho, and D. Yoon, "Republic of Korea Air Force Electromagnetic Spectrum Operations Strategy for Air and Space Dominances", Korean Journal of Military Art and Science, Vol. 78, No. 2, pp. 447-470, Jun. 2022. <https://doi.org/10.31066/kjmas.2022.78.2.016>.

[3] Y. Jung and D. Yoon, "Electromagnetic spectrum operations and signal intelligence strategy", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 33, No. 9, pp. 685-694, Sep. 2022. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2022.33.9.685>.

[4] N. Park, J. Oh, D. Yoon, Y. Song, J. Kim, and K. Shin, "Performance Analysis of Link-16 Based on L-Band Radio Wave Measurement Data", Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 61-67, Apr. 2016. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2016.14.4.61>.

[5] N. Gruman, Understanding Link-16: a guidebook for new users, 2nd ed., Logicon, Incorporated, 1998.

[6] S. Jung and H. Shin, "Analysis on technology development of NCW and tactical data link", The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 7, No. 5, pp. 991-998, Sep. 2012. <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2012.7.5.991>.

[7] J. L. Massey, "Collision-resolution algorithms and random-access communications", in Multi-User Communication Systems(CISM Course and Lecture Notes), New York, USA: Springer-Vienna, Vol. 265, pp. 73-137, 1981. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2900-5>.

[8] N. Wu, H. Wang, and J. Kuang, "Performance analysis and simulation of JTIDS network time synchronization", in Proc. IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, Vancouver, Canada, pp. 836-839, Aug. 2005. <https://doi.org/10.1109/FREQ.2005.1574042>.

[9] M. Cheon, H. Baek, and J. Lim, "Dynamic relay

node selection scheme for multi-hop time synchronization in Link-16", in Proc. IEEE Military Communications Conference, Tampa, USA, pp. 1329-1334, Oct. 2015. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2015.7357629>.

[10] S. Ko, H. Baek, and J. Lim, "Fast time synchronization strategy for mitigating collision of initial entry message over link-16", in Proc. IEEE Military Communications Conference, Baltimore, USA, pp. 731-736, Oct. 2014. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2014.127>.

### 저자소개

김 동 영 (Dongyeong Kim)



2013년 2월 : 한양대학교  
수학과(이학사)  
2020년 2월 : 한양대학교  
수학과(이학박사)  
2020년 2월 ~ 현재 : 한양대학교  
융합전자공학부 BK연구조교수  
관심분야 : 블록암호 분석, 통신

공학

김 기 석 (KI SEOK KIM)



2015년 2월 : 동국대학교  
전자전기공학부(공학사)  
2022년 6월 ~ 현재 :  
국방과학연구소 기술원  
관심분야 : 항재밍 GPS 기법 및  
JSR 시험구성, RF무선통신

김 진 기 (JIN KI KIM)



2013년 2월 : 아주대학교  
전자공학과(공학사)  
2021년 8월 : 아주대학교  
전자공학과(공학박사)  
2022년 12월 ~ 현재 :  
국방과학연구소 선임연구원  
관심분야 : 무선 MAC 프로토콜,  
IEEE 802.11, Full duplex

최 주 영 (Joo-Young Choi)



2014년 2월 : 한국교통대학교  
정보통신공학과(공학사)  
2016년 2월 : 한국교통대학교  
정보기술융합학과(공학석사)  
2021년 8월 : 연세대학교  
전기전자공학부(공학박사)  
2021년 11월 ~ 현재 :

한화시스템(주) 전문연구원  
관심분야 : 데이터링크, 무선통신, 강화학습

송 영 환 (Young-Hwan Song)



2007년 2월 : 숭실대학교  
정보통신전자공학과(공학사)  
2009년 2월 : 숭실대학교 대학원  
전자공학과(공학석사)  
2009년 3월 ~ 현재 :  
한화시스템(주) 전문연구원  
관심분야 : 데이터링크, 무선통신

윤 동 원 (Dongweon Yoon)



1989년 2월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학사)  
1992년 2월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학석사)  
1995년 8월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학박사)  
2022년 4월 ~ 현재 : 한양대학교

융합전자공학부 교수  
관심분야 : 무선통신, 위성 및 우주통신, 신호정보