

Design of Airborne Terminal System for Joint Tactical Data Link System Complete Data-link

Hyo-Ki Choi[†], Chang-Bae Yoon, Seok-Jun Hong

Satellite.Datalink Team, Hanwha Systems, Gyeonggi-do 17121, Korea

ABSTRACT

In this paper, design measure were proposed for the construction of terminal systems for airborne platforms, which are key element in the Joint Tactical Data Link System (JTDLs) complete system. The Korean perfect tactical data link (JTDLs) is a communication system to establish an independent tactical data link network and needs to develop a MIDS-LVT (Link-16) communication terminal for datalink. Once a Ground/Navy JTDLs terminal system is established around airborne platform, it will be possible to break away from reliance on NATO-based tactical data link joint operations and establish independent Korean surveillance reconnaissance real-time data sharing and tactical data link operations concepts. in this paper, the essential development elements of airborne platform mounting and operable JTDLs terminals are presented, and the concept of system design is proposed to embody them. Further, improved system performance was analyzed by applying the concepts of complex relative navigation system and Advanced TDMA protocol for the deployment of airborne tactical datalink networks.

Keywords: JTDLs, tactical, data-link, terminal, TDL, Link-K

1. 서론

전장 정보 및 지식은 적시에 필요로 하는 다양한 계층의 전장지휘관에게 신속하게 전파되고 공유되어야만 실질적인 가치를 발휘할 수 있으며, 이러한 데이터 공유 환경이 유지될 때 우월한 전장 지식의 확보 및 운용 유지가 가능하게 된다. 다행히 대한민국 군에서도 수년 전부터 이와 같은 변화를 수용하여 미래의 군사력 건설 방향 및 운용 개념 정립을 위해 다양한 방향을 제시하고 있다. 특히 전술 제대의 지휘관 및 참모를 지원하는 자동화된 지휘통제체계로써 Command Control Communication and Computer Intelligence (C4I) 육군전술 체계를 중심으로 해군, 공군 전술 C4I 체계 개발에 박차를 가하고 있으며, 전략 C4I 체계는 지휘소자동화체계의 성능을 개선하여 향후 전술 C4I 체계와 유기적인 결합이 가능하도록 개발 추진 중에 있다. 즉, 전술정보 작전 수행의 핵심인 지휘통제 분야의 정보화가 이루어짐에 따라 전

력 구축의 정보화가 본격적으로 가속화될 것임을 상징하고 있는 것이다.

지휘통제 분야의 정보화는 전장정보 및 지식체계 (C4I+ISR)와 정밀유도무기체계 (PGMs)를 결합하여 전장운영체계를 유기적인 결합전장체계로 구축함으로써 전장 공간의 시간 및 지리적 제한점을 극복할 수 있다. 또한 전투요소들 간에 전장 정보를 공유하여, 자기 동기화 및 전장상황인식을 확대하고, 궁극적으로는 전장공간에서 정보우위 확보와 전력의 상대적 신속우위 구조화를 추구할 수 있는 것이다. 이러한 개념은 다양한 수준의 제대들이 보유하고 있는 제반 전력요소들을 상호 유기적이며 효과적으로 연결할 수 있는 능력을 전제하는 것이므로, 이를 실현하기 위해 높은 수준의 정보통신 기반구조 구축이 선행되어야 한다. 특히 기술발전에 의해 확대된 전장공간에서 정보수집 능력의 향상과 효율적인 지휘통제를 위해 요구되는 전장 가시화를 구현하기 위하여 실시간 및 근 실시간으로 전술정보교환이 가능한 전술데이터링크(TDL) 체계의 구축은 반드시 필요하다. 그러나 현재 군사과학기술과 무기체계 획득 및 도입은 선진국에 의존적이며 소요군의 요구와 필요성에 따라 계획수립 및 추진되는 상황이다.

지식기반사회에서 전쟁의 승패는 전장정보 및 지식과 시간의 효율적인 활용 여부에 따라 결정될 것이며, 전장 정보 및 지식의 실시간 및 근 실시간 교환을 가능하게 하는 TDL 체계 구축 및 독자개발 능력은 대한민국 자주국방을 위해 필수적으로 고려

Received Mar 31, 2020 Revised Apr 23, 2020 Accepted Apr 27, 2020

[†]Corresponding Author

E-mail: hyogi.choi@hanwha.com

Tel: +82-031-8091-7444 Fax: +82-031-8091-7196

Hyo-Ki Choi <http://orcid.org/0000-0001-5891-9405>

Chang-Bae Yoon <http://orcid.org/0000-0003-3953-3341>

Seok-Jun Hong <http://orcid.org/0000-0002-7143-3474>

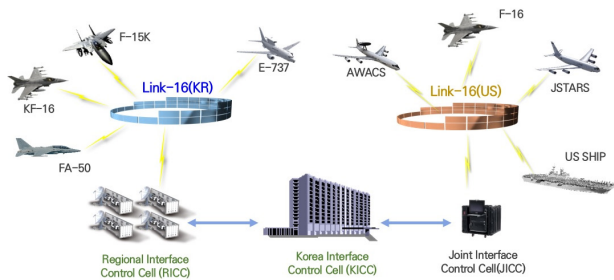


Fig. 1. Joint operation concept of Korea.

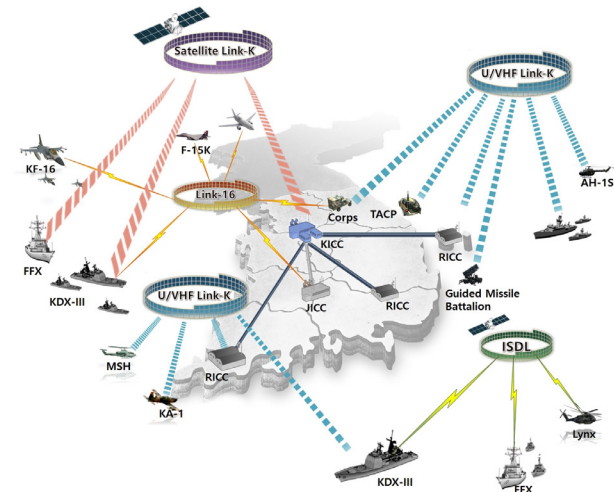


Fig. 2. Operation concept of JTIDS basic system.

해야 하는 중요한 사항이다. 이러한 미래 전장의 네트워크 중심 전을 구현할 수 있는 데이터링크 체계 시스템은 선진 Link-16 체계 (Understanding Link-16 2014)를 예로 들 수 있다. Link-16 시스템은 Joint Tactical Information Distribution System (JTIDS)을 시작으로 발전되었으며, 재밍 환경에 대응하면서 고밀도의 유럽 전장에서 수많은 전투기와 미사일 포대를 지원할 수 있는 주요 방공 작전에 사용되었다 (Kim & Choi 2007). 하지만 JTIDS 통신 단말은 부피가 크고 비용면에서도 상당히 고가여서 전투기에 탑재 가능한 소형, 경량의 저가 터미널 개발이 요구되었다. 또한, NATO와 미국의 연합작전과 지휘 통제에 효과적인 수행을 위해 TDL의 상호 운용성도 절실히 요구되었고, 그 결과 NATO와 미국은 Link-16의 제 2세대 터미널인 Multifunctional Information Distribution System (MIDS)를 2000년에 공동으로 개발하였다 (Kim & Kim 2007). Link-16 시스템은 Fig. 1과 같이 공군 전력을 중심으로 운용되며 NATO 연합 작전 및 제한적인 한국군 단독 TDL 작전에도 운용된다.

제한적인 대한민국 단독 TDL 체계를 극복하기 위해 2013년 JTIDS 기본형 체계가 전력화 되었으며, Fig. 2와 같이 기본형 체계에서는 독자적인 Link-K 메시지 및 기존 Legacy 무전기를 통한 TDL 네트워크가 구축되었다. 하지만 Legacy 무전기의 음성 대역을 이용한 무선 통신은 전송량/항재밍(통신, GPS) 등 성능 측면에서 제한 사항이 존재하고 이를 해결하기 위한 성능 개량이 필요하다 (Kim 2013). Fig. 3은 Link-16 네트워크를 구축하기 위한

Type	Key Functions/Performance	Note
MIDS-LVT (Link-16)	- Frequency band : 962~1213MHz - Throughput : 115.2kbps - Network : TDMA - Anti-Jamming : 77,000 Hop/sec - Relative Navigation/ TSEC/ MSEC - Ground/Navy/Airborne Platform - Link-16 Message Processing	- NATO Tactical Data Link Joint operation - Frequency unavailable other than Joint operation
JTIDS basic system	- Frequency band : 125~399.9MHz - Throughput : 1~16kbps - Network : D/TDMA - Anti-Jamming(X), TSEC(X), Relative Navigation(X) - MSEC - Ground/Navy/Airborne Platform - Link-K Message Processing	- Use the voice BW of Legacy Radio - Requires repeated allocation of operational frequencies to V/UHF voice frequency band

Fig. 3. Comparison of link-16 and JTIDS basic system communication function/performance.

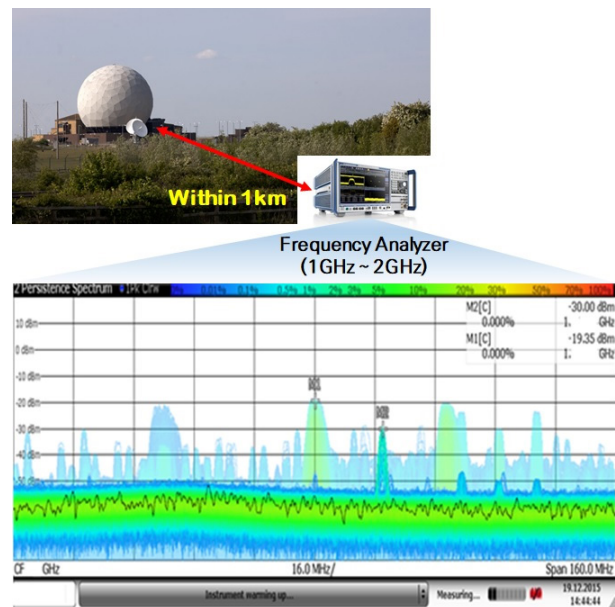


Fig. 4. Operation environment of L-band radar frequency.

MIDS의 통신 성능과 JTIDS 기본형 체계의 성능을 비교 분석한 것이며, JTIDS 기본형 체계의 제한 사항을 극복하고 보다 안정화된 대한민국 TDL 네트워크 구축을 위해서 JTIDS 완성형 체계 개발은 반드시 이루어져야 한다.

본 논문에서는 JTIDS 완성형 체계의 운용 환경, 주파수 공유 등을 고려한 공중 플랫폼 터미널의 핵심 개발 요소를 제시하고 설계 방안을 제안하였다. 또한 공중 플랫폼에 특화된 효과적인 D/TDMA 운용 개선방안 설계 결과와 GPS 재밍 환경 극복을 위한 상대방의 개선 방안을 제안하고 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

2. 본론

2.1 L대역 주파수 공유 시스템

완성형 체계 구축을 위한 공중 플랫폼 TDL 터미널은 전용 주파수 할당이 불가능한 상황이며, 공군에서 운용중인 레이더 시스템의 L대역 주파수를 공유하여 운용 가능하다. 따라서 TDL 터미널

Link-16 message structure

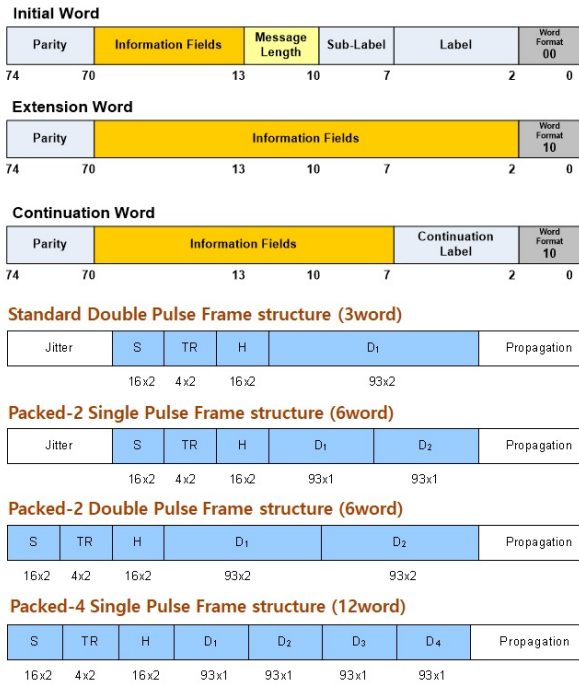


Fig. 5. Message formats and frame structure of communication.

은 레이더 시스템에 영향을 주지 않고, 또한 영향을 받지 않아야 하는 기본적인 주파수 공유 시스템 설계가 필요하다. Fig. 4는 레이더 시스템에서 운용중인 주파수 환경(상시 레이더 운용 환경)을 측정된 것이며 레이더는 12초 주기로 360도 지향성 회전을 하며 주기적이고 높은 펄스 출력을 확인할 수 있다.

TDL 터미널은 이러한 레이더 주파수 운용 환경을 극복(공유)하며 Link-K 메시지를 송수신할 수 있는 네트워크를 구성해야 한다. 주파수 환경 극복을 위해서는 레이더 펄스의 송신 주기와 수신 시간의 분석 및 결과를 반영한 운용 주파수 대역의 실시간 주파수 인지 기능 설계가 요구되며, 데이터 손실을 극복하기 위한 반복 전송 기법의 Time Diversity 방식을 적용해야 한다. 또한 항재밍을 위한 수만홉 이상의 고속 주파수 도약 기능도 레이더 펄스 신호가 존재하는 주파수 환경에서 송수신 데이터의 전송률을 보장하기 위해 반드시 설계에 반영되어야 한다.

Link-K 메시지는 Link-16 시스템 메시지 구조와 프레임 구조 (Baek et al. 2010)를 기반으로 개발되었다 (Kim 2012). 따라서 Time Diversity와 고속 주파수 도약 등을 반영한 TDL 모델의 프레임 구조는 Link-16 네트워크 구조를 반영한 기본 설계가 요구되며 (Park & Lim 2009), Fig. 5는 Link-16의 메시지 및 프레임 구조에 대한 설명을 나타낸 것이다 (Park et al. 2009, Akers et al. 2013). 메시지는 Initial Word와 하나 이상의 Extension word, Continuation word로 구성되고 Link-16 전송 정보 교환 시 사용되며 Parity Bit는 워드에 4bit가 할당되며 에러 추적 및 정정 부호화 비트는 RS 인코딩 시 적용된다. Fig. 6은 Fig. 5의 Link-16 프레임 설계 개념을 기반으로 운용 주파수를 공유하는 환경에서 000개 이상의 노드로 구축되는 네트워크, 멀티넷, 상대방법, 000 kbps 이상의 전송률 등을 보장하고 저속/고속 모델 프레임

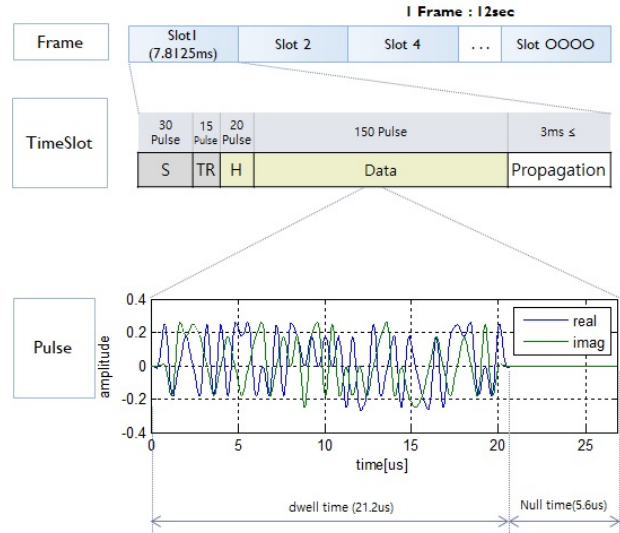


Fig. 6. Modem frame structure of TDL terminal.

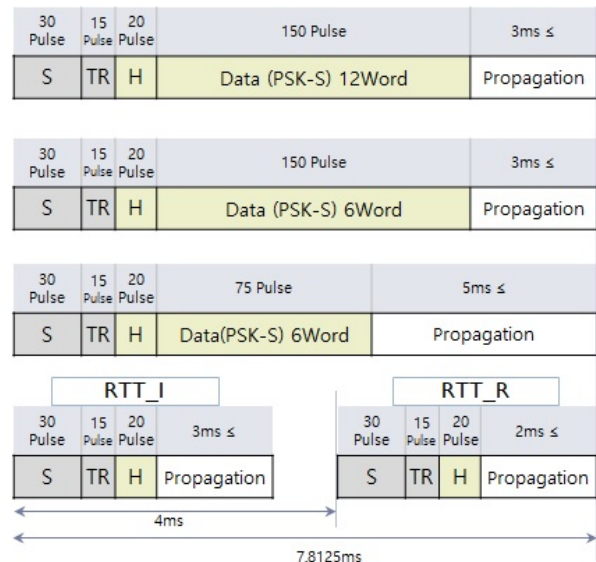


Fig. 7. Frame structure by transmission rate and RTT frame structure.

임 설계 적용 가능한 TDL 터미널 모델의 기본 프레임 구조를 나타낸 것이다 (Park & Lim 2009). 12초 주기의 TDMA 슬롯 구조로 구성되며 펄스 신호 송수신을 위한 1타입 슬롯은 Propagation Delay를 반영한 Sync, TR, Header, 데이터 블록으로 설계될 수 있다. 또한 Fig. 6과 같이 종류가 다른 웨이브폼을 적용하여 주파수 환경에 적합한 고속/저속 프레임 구조 설계도 필요하며, Fig. 7과 같은 TDMA 망동기를 위한 RTT 프레임 구조와 Master/Slave 기반의 동기 획득을 위한 프레임 구조가 필요하다 (ITU-T Rec 1999, Choi & Lee 2002, Lim 2004).

위의 설계 내용은 주파수 공유 환경에서의 JTDLS 완성형 체계 네트워크 구축을 위한 무선 통신 시스템의 기본 설계 요소이며, 레이더를 운용하는 주파수 환경을 고려하여 TDL개발 완료 후 운용 시험 평가를 위해 주파수 분석 데이터 및 간섭 영향도 분석 결과 기반의 합리적인 시험평가 기준 수립이 반드시 필요하다.

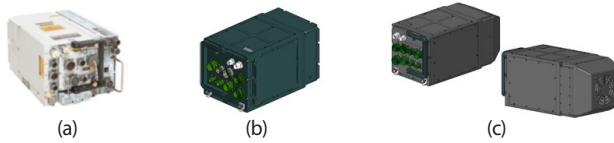


Fig. 8. TDL Terminal reflecting MIDS-LVT hardware interface design. (a) MIDS-LVT, (b) High speed anti-jamming TDL terminal (fixed wing), (c) High speed anti-jamming TDL terminal (rotary wing)

Table 1. ICD identification for hardware external interface interworking.

Connector	Signal feature
J1	28 Vdc or 12 Vdc input
J5	28 Vdc or 12 Vdc input
J12	230/350 Vdc
J10/11	Antenna A,B
J9	HPA interface
J7	HOST Interface & status, control
J6	HIA/HPA control
J8	HOST interface time port
J14/15	3910 data bus
J3	HOST interface 1553B
J2	HOST interface or 2 channel voice
J4	Security injection & erasure

Table 2. System design items depending on whether or not MIDS-LVT is applied on the air platform.

Division	None MIDS-LVT	Use MIDS-LVT
MC-linked software	none	Link-K control software
Heat-resisting structure	FAN cooling	Air cooling
TACAN	none	TACAN
Main HW interface	Ethernet/video signal	Ethernet/1553B
Power	28 Vdc	28 Vdc or 115 Vac

2.2 공중 플랫폼 장착을 위한 시스템 설계

TDL 터미널은 FA-50, KA-1, LAH 등 공중 플랫폼 중심으로 운용 가능하며, 플랫폼 설치 및 운용 개념 설계를 고려해야 한다 (Hwang 2018, Lee et al. 2018). Link-16 전술데이터링크 연합작전을 위해 대부분의 공중 플랫폼에는 MIDS-LVT가 장착되어 있으며, TDL 터미널을 추가적으로 장착할 수 있는 공간 제약 사항과 플랫폼 개조 설계 측면에서 많은 제한 사항이 발생할 수 있다. TDL 터미널이 기존 설치 운용 되고 있는 MIDS-LVT와 1:1 교체 및 Host SW 연동 (MIL-STD-188-220D 2005)이 가능한다면 장착 및 운용 측면에서 많은 효과를 기대할 수 있을 것이다.

Fig. 8은 MIDS-LVT와 동일한 인터페이스를 반영하여 설계된 TDL 터미널을 형상화한 것이며 2017년 국내개발 완료된 MIDS급 고속 항재밍 TDL 공중단말 자료를 활용하였다. 터미널의 형상은 외부 냉각 공급이 가능한(MIDS-LVT 형상과 동일) 고정익 플랫폼의 형상과 터미널 자체적으로 방열 가능한 회전익 플랫폼의 형상으로 구분된다. MIDS-LVT와 1:1 교체를 위해서는 MIDS-LVT의 외부 인터페이스 기능을 식별하여 TDL 터미널에 설계 반영하는 것이 중요하며 Table 1은 MIDS-LVT 외부 인터페이스에 대한 일반적인 내용이며, TDL 터미널 설계 시 적용 가능하다.

공중 플랫폼에 따른 TDL 터미널 설치 개념 및 개발 방안은 MIDS-LVT의 운용 유무에 따라 결정된다. MIDS-LVT가 운용되고 있는 공중 플랫폼은 Mission Computer와 1553B/이더넷 연동

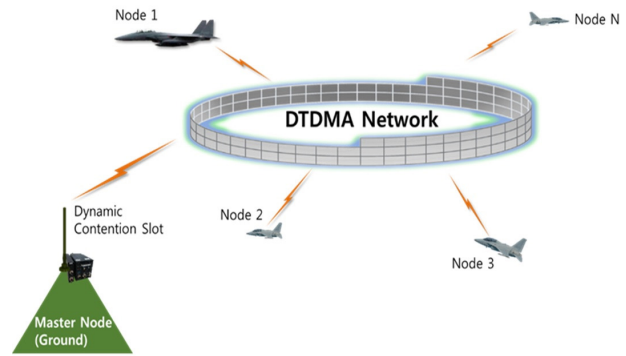


Fig. 9. Dynamic TDMA operation concept.

방안과 Air Cooling 방식의 터미널 냉각 구조 등을 반영해야 하며, MIDS-LVT가 운용되지 않는 공중 플랫폼에는 Cockpit 또는 전시기와 연동 가능한 그래픽 인터페이스 및 자체 방열을 위한 기구 구조 설계가 반영되어야 한다. 또한 MIDS-LVT에 선택적인 기능으로 제공되는 TACAN (Interrogator) 제공을 위한 내장형 TACAN 모듈도 추가적으로 개발 및 장착되어야 할 것이다.

Table 2는 MIDS-LVT 사용 유무에 따른 TDL 터미널 시스템 설계 항목을 정의한 것이며, 설계 반영 유무에 따라 MIDS-LVT 1:1 대체 또는 신규 TDL 터미널 설치가 가능하다.

2.3 효과적인 D/TDMA 운용 개선방안

Dynamic TDMA (DTDMA)는 시분할 프로토콜 방식인 TDMA의 동적 슬롯 할당이 가능한 시스템이며, Fig. 9는 DTDMA 운용 개념도를 나타낸 것이다. TDMA 기반의 Link-16 시스템은 동적 자원 할당이 불가능 하지만, TDL 터미널 시스템은 공중 플랫폼 중심의 효과적인 자원 할당을 위해 DTDMA 프로토콜 시스템을 적용해야 한다 (Park et al. 2009). DTDMA는 JTDLs 기본형 체계 사업에서 개발 완료되었으나, 동적 할당에 있어 운용방법(자원 할당 시간, 제어 등) 측면에서 제한사항이 존재한다. 이에 본 논문에서는 효과적인 DTDMA 운용 방법을 위한 시스템 설계 구조를 제안하였다. 운용 전 정의된 송수신 슬롯(시분할)에 따라 통신이 이루어지는 방식은 무선 채널 환경 및 네트워크 참여 노드 수 등을 사전에 모두 정의해야 하는 제약 사항이 발생하며, 이를 개선하기 위해서 DTDMA가 발전되었다. DTDMA는 슬롯 설정이 사전에 정의되지 않으며 지상 Master Node의 설정에 따라 다양하게 동적 슬롯을 설정하여 TDMA 프로토콜 네트워크를 구축할 수 있다.

현재 DTDMA 프로토콜 기반의 통신 방식은 합동 전술데이터링크(Link-K) 통신 시스템에 운용되고 있으며, 지상 Master Node의 설정에 따라 DTDMA 네트워크가 구축된다. 작전 수행 전 정의된(Initial Status slot) 슬롯 정보 주입으로 초기 네트워크 구축 시간은 빠르지만, 가입 노드 및 무선통신 채널 환경 등에 따른 네트워크 재설정 시간은 불필요한 요소가 많다. 가입 노드의 재설정을 위해 Contention slot 정보를 송신하고, 응답에 따른 Master Node 설정, Master Node의 slave Node Relay, Contention Slot 및 Master Node 재설정, 최종 재슬롯 설정 등 반복되는 Node 간 정보교환을 거쳐 네트워크 재설정이 진행된다. 또한 이러한 네트워크 슬롯 재설정은 실시간 변화되는 공중

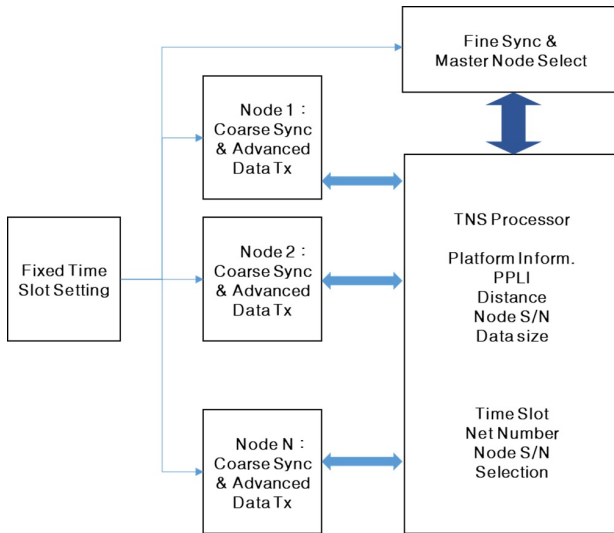


Fig. 10. Improved D/TDMA protocol-based network reset system architecture.

Table 3. Improved result of time slot reset time analysis.

Identification	TDMA (ms)	D/TDMA	Improved D/TDMA	Status
Power on	400	400	400	Power on
Time slot download	300	0	300	Timeslot information input
Coarse sync	12000	12000	12000	Acquisition coarse synchronization
PPLI & node S/N & request (PNSR)	0	0	3000	Request of position inform. node number
fine sync	6000	6000	6000	Acquisition fine synchronization
Contention slot	0	3000		Share of timeslot set information
Master slot (MS)	0	6000		Master node setting
MS relay	0	6000		Transferring information to slave node via master node
Re-contention	0	3000		Share of Timeslot set information for network resetting
Re-master slot (RMS)	0	6000		Master node setting for network resetting
RMS relay	0	6000		Transferring information to slave node via reset master node
PNSR & Re slot	0	0	6000	Reset of position inform. node number
Slot set maximum time	18700	33400	21700	Maximum slot setting time of network subscribed
Re-Slot set maximum time	0	15000	6000	Maximum slot re-setting time of Network subscribed

Node의 공유 정보량, 무선채널환경, 가입자 수 등에 대해 실시간 변경이 불가한 상황이며 이러한 단점을 보완하기 위한 자동적인 Master Node 설정 및 실시간 네트워크 관리 등에 개선된 DTDMA 프로토콜 시스템 설계 구조를 제안하였다. 제안된 재설정 시스템 구조는 공통 플랫폼 중심의 전송데이터링크 시스템 통신 방식을 개선할 수 있고, 다수의 Node간 실시간 네트워크 구축/해제가 필요한 Weapon data link 등의 통신 시스템에도 적용

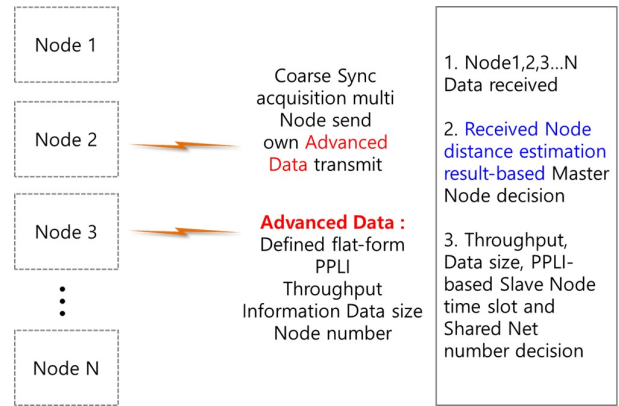


Fig. 11. Architecture of improved master setting and network timeslot reset.

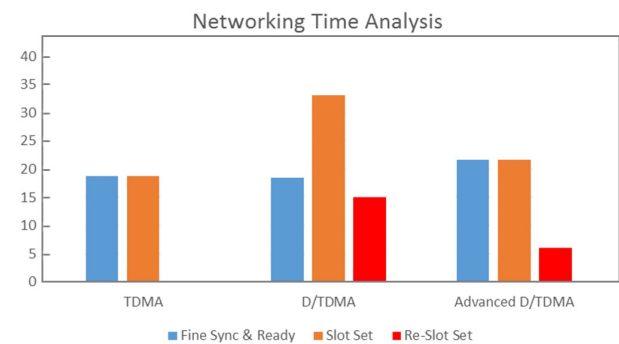


Fig. 12. Setting time analysis of improved D/TDMA networking.

가능하다.

Fig. 10은 개선된 DTDMA 프로토콜 기반의 네트워크 재설정 시스템 구성도를 나타낸 것이며, 초기 운용 슬롯에 설정된 다수의 노드와 지상 신호에 대한 Coarse Sync 획득 후 송신하는 데이터에 의해 우선 설정되는 Master Node, Master Node에서 타노드 수신 데이터를 종합하여 Slave Time slot, Net number, Node S/N 결정하는 Time slot Network Selection (TNS) 처리부로 구성된다. 이와 같은 구조를 DTDMA 프로토콜에 적용할 경우 Net Number 결정에 따라, 공유하고자 하는 정보 전송량 및 무선채널 환경에 적합한 멀티넷 구축 성능이 향상되며 각 Node 플랫폼의 가변적인 전송량, 네트워크 가입 Node 수, 무선채널 환경에 보다 능동적인 네트워크 재설정 및 운용의 효과를 도출할 수 있다.

Table 3은 개선된 DTDMA 프로토콜의 네트워크 구축을 위한 Time slot 설정 소요시간을 예를 들어 분석한 것이다. 초기 네트워크 설정 시간은 21.7초로 TDMA와 유사하며, 재설정 시간은 6초로 DTDMA 구조보다 빠른 시간에 네트워크 구축이 가능함을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 개선된 Master 설정 및 네트워크 타임슬롯 재설정 구조를 설계한 것이며, TNS 처리는 마스터 설정 후 슬레이브 노드의 공유 데이터량 및 현재 전송률을 고려하여 타임슬롯을 할당한다. 슬레이브 노드 중 이격거리(거리가 먼 노드 분리) 및 전송데이터 사이즈를 반영하고(데이터 사이즈가 큰 노드 분리), 멀티넷으로 분리하여 효과적인 멀티 네트워크 구축이 가능하도록 처리한다.

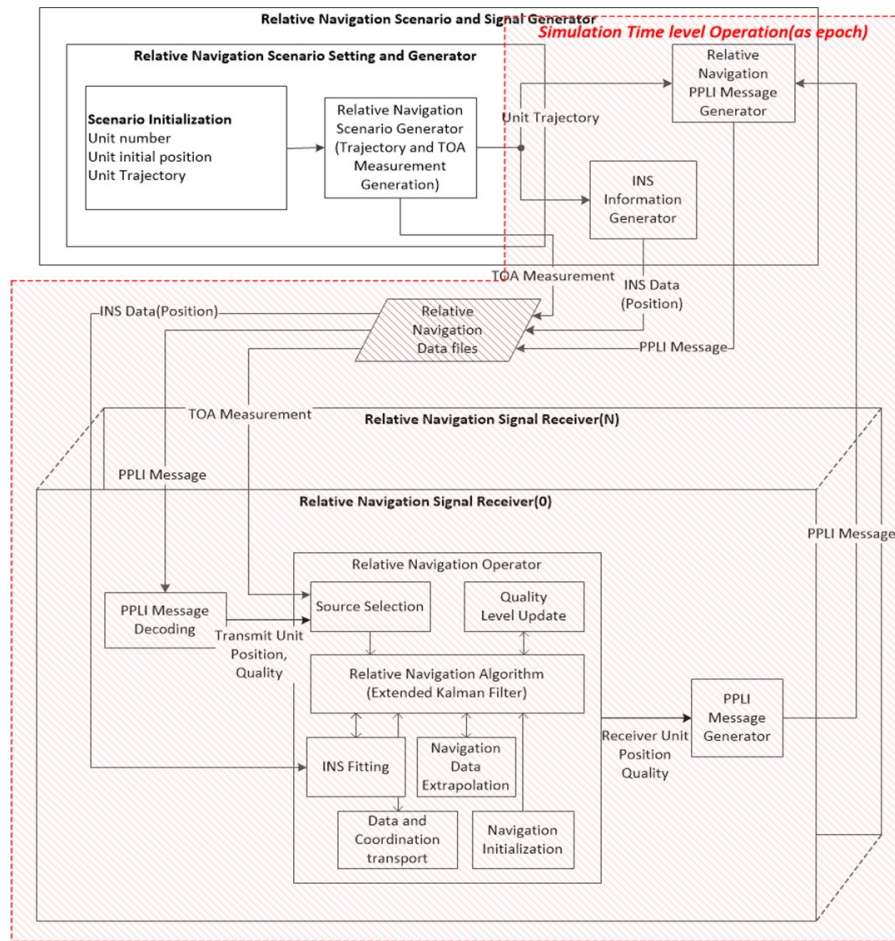


Fig. 13. Link-K based relative navigation simulation platform structure.

Fig. 12는 개선된 DTDMA 네트워크 설정 시간을 분석한 결과이며, 제안된 DTDMA 구조 적용 시 소요되는 시간적인 측면에서 효과가 있으며, 향후 Link-K 노드 수가 증가하는 시스템에 적용 가능함을 확인할 수 있다

2.4 상대항법 추정 알고리즘 개선방안

상대항법은 GPS 재밍 시 또는 고장 시 타노드의 수신 데이터를 활용하여 자신의 위치정보를 생성하는 기법이다 (Fried 1978). 또한 GPS/INS 정보가 정상 수신될 때의 데이터를 활용하여 상대항법의 성능을 높일 수 있는 복합 상대항법 기능도 정부 주도로 개발 완료된 고속 항재밍 TDL 단말 시스템에서 검증되었다 (Lee & Lee 2016).

상대항법은 무선 통신 네트워크에 연결된 타노드 송신 신호 (PPLI 및 TOA)를 수신하여 자신의 위치를 추정(칼만필터)할 수 있으며(Anderson & Moore 1979), TDMA 기반의 상대항법은 네트워크 동기 획득 후 수신된 신호를 이용하여 칼만필터를 구동시키고 초기 슈퍼프레임(예: 6초, 12초 등) 시간만큼의 지연 시간이 존재하게 된다 (Kayton & Fried 1997).

현재 미국 및 대한민국 전술데이터링크 군용 항법 시스템으로 개발된 상대항법 기능은 TDMA 기반 무선통신 네트워크 구축으

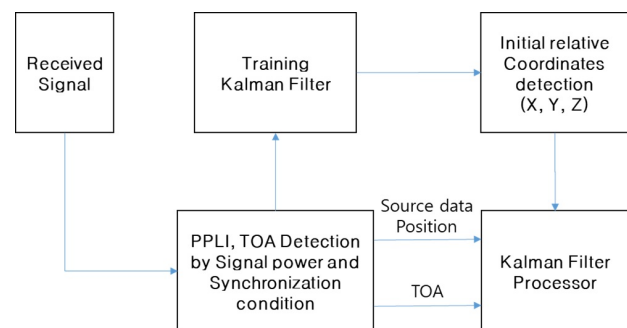
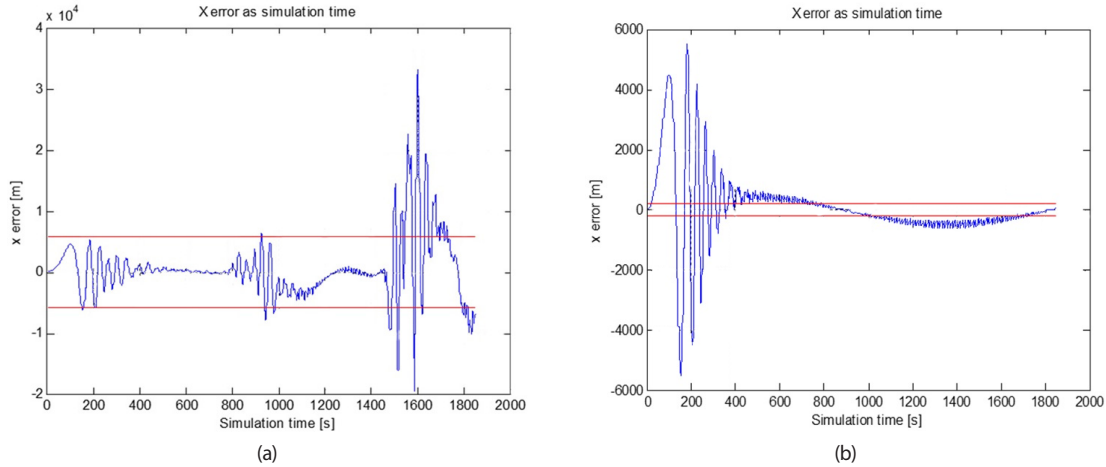


Fig. 14. Algorithm architecture for initial location estimation.

로 운용되며, 초기 위치 입력 및 TDMA 슈퍼 프레임 시간만큼 초기 위치 추정 시간이 필요하고, 추정이 되더라도 초기값의 불안정한 입력값에 따라 전체적인 칼만필터 성능이 저하되는 단점이 있다. 이러한 문제점은 공중 플랫폼 이륙 시 또는 GPS 재밍 환경에서 위치 식별이 불가능한 상황을 초래할 수 있다. 또한 상대항법 성능은 TDMA 네트워크 동기 획득에 필요한 슈퍼프레임 동기 획득 후 3개 이상의 타노드 PPLI 신호를 수신하는 지연 시간 및 성능저하 된 타노드 위치 추정 성능을 고려해야 한다 (Koromilas et al. 2010).

Table 4. Simulation environment of relative navigation.

Type	Parameter	Setting
* Simulation environment of relative navigation		
EKF navigation algorithm setting	R_M	500 m ²
	Q	$\sigma_{\alpha}^2 = 1.8 \times 10^{-3}$
		$\sigma_{\alpha\beta}^2 = 1.0 \times 10^{-7}$
Measurement setting	RTT time sync error	25 ns
	TOA measurement error	10 m
* Simulation environment of relative navigation as PPLI message period in dynamic unit		
Unit arrangement	Unit 1 (PR 1)	x= 0.0, y= 0.0, z= 0.0 km
	Unit 1 (PR 2)	x= -58.0, y= -83.2, z= 0.6 km
	Unit 1 (PR 3)	x= -26.0, y= -244.0, z= 0.7 km
	Unit 1 (PR 4)	x= 164.0, y= 0.0, z= 1.5 km
	Unit 5 (starting position)	(Circular: center position) x= -80.0, y= -20.0, z= 8.0 km Trajectory: circular (50 km radius) velocity: 34 m/s (0.1 Mach)
Time slot setting	Unit number	5
	Unit transmit period	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 2.0 s
	Total 1 cycle period	0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.0, 10.0 s
EKF setting	Navigation update period T	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 2.0 s

**Fig. 15.** Simulation result of initial location estimation (RMSE). (a) EKF Relative navigation estimation result (b) Initial location estimation algorithm application result

본 논문에서는 안정적인 초기 위치 추정 방안을 제시하고 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 상대항법 알고리즘은 Extended Kalman Filter 기반의 알고리즘을 사용하였으며 Link-K 기반 상대항법 시스템 성능 분석을 위하여 Fig. 13과 같이 소프트웨어 기반의 Link-K 시뮬레이션 플랫폼을 활용하였다 (Lee & Lee 2016). 공중 플랫폼 이륙 시 Broadcast하게 수신되는 타노드 단말의 신호 세기를 측정하여 우선적인 TOA를 추정하면 동기 획득 이전 초기 위치 추정이 가능해지며, 동기 획득 후 칼만필터의 성능을 개선할 수 있다.

Fig. 14는 TDMA 프로토콜에 적용 가능한 Training Extended Kalman (TEK) filter가 포함 된 상대항법의 초기 위치 추정 알고리즘 구성도를 나타낸 것이다. 수신 신호 세기 및 네트워크 동기 획득의 가부 상태에 따라 PPLI 및 TOA가 검출되고(타노드 수신 신호 기반의 동기상태/TOA/PPLI메시지 처리), 검출된 데이터를 기반으로 초기 위치 추정을 위한 TEK filter가 동작한다. 이를 기반으로 Initial 상대 좌표 검출부에서는 초기 안정된 데이터를 생

성할 수 있으며, Kalman filter 처리부는 정상적인 위치 추정값을 산출할 수 있다. 따라서 초기 위치 추정 알고리즘은 불안정한 초기 위치값 및 무선통신 네트워크 동기획득 여부와 상관없이 초기 위치 추정값의 신뢰도를 향상시켜 상대항법 성능을 향상시킬 수 있으며, 상대항법 칼만필터의 수렴 시간을 단축할 수 있다.

시뮬레이션은 시뮬레이션 플랫폼을 활용하여 상대항법 오차 요소에 대한 성능분석을 진행하였으며, 시뮬레이션 대상으로 시스템 운용 배치, PPLI 확보주기, 시각 슬롯 불규칙성 및 동적 특성을 선정하여 테스트를 수행하였다. 본 논문에서는 시뮬레이션 수행을 위해 TOA 측정치 오차의 경우 1σ 10 m, 시각동기 오차 1σ 25 ns로 가정하였다 (Kayton & Fried 1997). 또한 설계 파라미터인 확장칼만필터 파라미터 R_M 및 Q와 동적 환경에서 PPLI 메시지 확보 주기에 따른 시뮬레이션 환경은 Table 4와 같이 설정하였다 (Lee & Lee 2016).

Fig. 15는 초기 노드 수렴 시간에 따른 평면 위치추정 결과 Root Mean Square Error의 시뮬레이션 결과이다. TEK Filter를

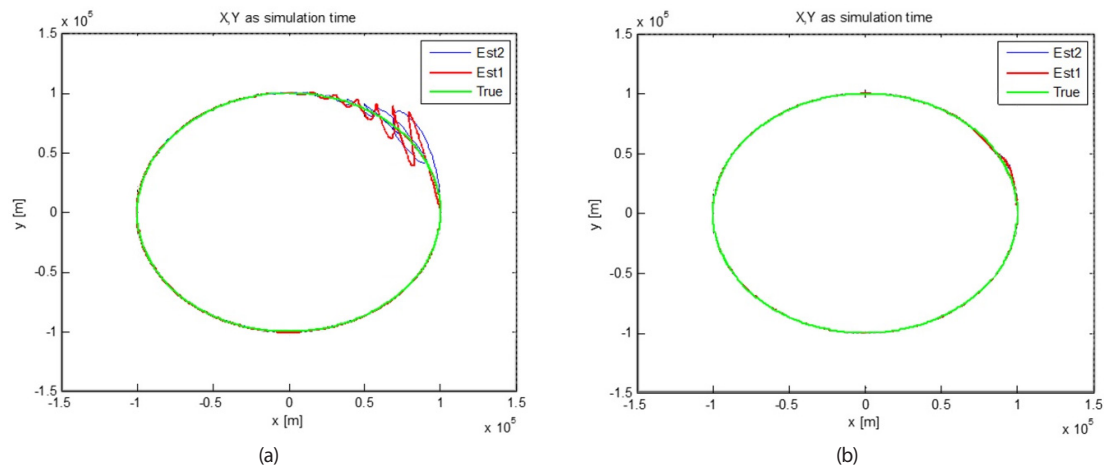


Fig. 16. Trace tracking simulation result of initial location estimation. (a) EKF Relative navigation estimation result (b) Initial location estimation algorithm application result

적용했을 경우 초기 수렴속도가 빠르며, 지속적으로 안정된 상태의 위치추정 결과를 예측할 수 있다. Fig. 16은 초기 위치추정 알고리즘을 적용한 시스템에서의 상대항법 궤적추적 시뮬레이션 결과이며 일반적인 상대항법 추정(Extended Kalman filter)은 초기 수렴 상태에서도 일정 시간 경과 시 Kalman Filter의 발산 현상이 발생하지만, 초기 TEK Kalman Filter의 결과를 사용했을 경우에는 지속적인 궤적 추적 결과를 확보할 수 있다.

3. 결론

지금까지 주요한 4가지 범위의 JTDLS 완성형 체계 필수 설계/개발 요소에 대해 제안 및 분석 결과를 제시하였다. 전용 주파수 할당 불가능한 체계 시스템에서 운용 주파수 공유 시스템의 설계 및 성능 검증은 무엇보다 중요하다. L대역의 운용 및 주파수 특성에 대한 분석과 이를 반영한 TDL 터미널의 웨이브폼, 주파수 인지, 고속 주파수 호핑 등의 시스템 설계가 반영되어야 할 것이며, 운용성 검증 측면에서 신뢰도 보장과 조기 전력화를 위한 성능 평가의 기준 및 합리적이고 논리적인 검증방안 제시가 반드시 필요하다.

한국형 TDL 터미널은 공중 플랫폼 장착 및 운용 측면에서 하드웨어 시스템이 설계되어야 하며 Link-16 연동 작전을 수행하는 공중 플랫폼에는 MIDS-LVT와 1:1 대체 운용 가능한 터미널 시스템이 설계되어야 하고 TACAN 기능 반영 및 설치 플랫폼에 따른 방열 해석 구조 설계도 진행되어야 한다. 또한 주파수 공유 환경에서 통달거리 000 km 이상의 링크 버짓을 설계/반영하여 한반도 전역의 전술데이터링크 작전 수행이 가능해야 한다. DTDMA 시스템은 근실시간 데이터 공유 시스템이고 실시간 데이터 획득을 위해서는 효과적인 타임 슬롯 할당/분배가 필요하며, 네트워크 노드 기반 무선 통신 환경에서의 교환 자료 활용을 극대화하여 보다 능동적인 시스템을 구축해야 한다. 또한 고속 주파수 호핑으로 획득 가능한 항재밍 성능과 함께 GPS 재밍에 대한 준비도 필요하다.

상대항법은 GPS 재밍 환경을 극복할 수 있는 설계 요소이고 공중 플랫폼의 자기 위치 생성에 중요한 기술이며, Training/Extend Kalman Filter 기반의 효과적인 상대항법 시스템이 개발되어야 할 것이다. 이 외에도 공중플랫폼의 TDL 터미널 전력화를 위한 환경규격, 소프트웨어 개발 등의 중요한 요소는 지속적인 대안 식별 및 설계를 준비하여 대한민국 완성형 전술데이터링크 체계 개발을 성공적으로 수행하여야 할 것이다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H.K. Choi and C.B. Yoon and S.J. Hong; methodology, H.K. Choi and C.B. Yoon; software, H.K. Choi; Formal analysis H.K. Choi; investigation H.K. Choi; review and editing H.K. Choi and C.B. Yoon and S.J. Hong.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Akers, D., Casey, J., Ruiz, M., Sivertson, C., Solorzano, D., et al. 2013, Understanding voice and data link networking, Northrop Grumman, 9326 Spectrum Center Boulevard San Diego, Dec. 2013.
- Anderson, B. & Moore, J. B. 1979, Optimal filtering (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc.), pp.90-127
- Baek, S. M., Park, S. W., & Chung, Y. U. 2010, Performance evaluation of non-coherent detection based cyclic code shift keying, Journal of the Institute of Electronics

- Engineers of Korea TC, 47, 42-48.
- Choi, Z. Y. & Lee, Y. H. 2002, Frame Synchronization in the Presence of Frequency Offset, IEEE Trans. Commun., 50, 1062-1065. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2002.800815>
- Fried, W. R. 1978, Principles and simulation of JTIDS relative navigation, IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, AES-14, 76-84. <https://doi.org/10.1109/TAES.1978.308581>
- Hwang, S. W. 2018, A study on the development of Joint Tactical Datalink system, Periodicals, KIDA, 1706
- ITU-T Rec., G.704(10/98) Synchronous Frame Structures used at 1544, 6312, 2048, 8448 and 44 736kbit/s Hierarchical Levels, p.36, 1999.
- Kayton, M. & Fried, W. R. 1997, Avionics Navigation Systems, 2nd ed. (New York: Wiley-Interscience), pp.283-312
- Kim, H. D. & Choi, T. B. 2007, Tactical Data Link Technology Standardization Trends, Journal of Korea Information and Communications, 24, 7-14.
- Kim, E. S. 2013, Opinions on the direction Korean Joint Tactical Datalink system in Korea, KIDA, 1477
- Kim, J. S. & Kim, S. J. 2007, Introduction to Tactical Data Link Technology and Development Trends, Information Science and Technology, 25.
- Kim, Y. B. 2012, A study on the estimation of required communication capacity for Link-16 based tactical networks, The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems, 11, 105-111. <https://doi.org/10.12815/kits.2012.11.1.105>
- Koromilas, I., Robertson, C., & Kragh, F. 2010, Performance analysis of the LINK-16/JTIDS waveform with concatenated coding in both AWGN and pulsed-noise Interference, in The 2010 Military Communications Conference, Oct. 2010, San Jose, CA, pp.2074-2081.
- Lee, J. H. & Lee, J. H. 2016, Simulator Design and Performance Analysis of Link-K Based Relative Navigation System, Journal of Advanced Navigation Technology, 20, 151-156.
- Lee, Y. H., Kim, M. S., Lee, J. H., Youn, Y. J., & Ko, T. I. 2018, A study of Weapon Test Bench Development for LAH Armament System, The Society for Aerospace System Engineering 2018 Fall Conference, Oct 31 - Nov 2 2018, HICO, Gyeongju, Korea. http://sase.or.kr/publication/fileopen2.asp?f_v=2137
- Lim, D. 2004, A Modified Gardner Detector for Symbol Timing Recovery of M-PSK Signals, IEEE Trans. Commun., 52, 1643-1647. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2004.836450>
- MIL-STD-188-220D 2005, Interoperability Standard for Digital Message Device Transfer Sub System, [Internet], cited 29 Sep 2005, available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/MIL-STD-188>
- Park, H. W. & Lim, J. S. 2009, Link-16 PHY/MAC Technical Analysis for Korea JTDLS Implementation, Journal of Korea Information and Communications, 26, 60-68.
- Park, H. W., No, H. J., & Lim, J. S. 2009, Link-16 PHY/MAC technology analysis for the construction of Joint Tactical Datalink system, Information and Communications Magazine 26, 60-68. <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200909651053095.view>
- Understanding Link-16: Understanding Voice and Data Link Networking, Northrop, Grumman Corporation, SanDiego, CA, [Internet], cited 29 Dec 2014, available from: http://www.navybmr.com/study%20material/Understanding_Voice+Data_Link_Networking.pdf



Hyo-Ki Choi received the B.S. degree in the School of Electronics Engineering at Soongsil University and M.S. degree in the Department of Communication and Signal Processing of Soongsil University, Seoul, South Korea, and he is currently at Hanwha-system as a Chief Engineer, Satellite•Datalink Division. His research interests are Military Communication system and Tactical datalink system (JTDLS Perfect system).



Chang-Bae Yoon received the B.S. degree in the School of Electronics Communication Engineering at Korea Maritime University, and M.S. degree in the Department of Electronics Engineering of Sungkyunkwan University, Seoul, South Korea, and he is currently at Hanwha-system as a Chief Engineer, Satellite•Datalink Division. His research interests are Military Communication system and Tactical/Common datalink systems.



Seok-Jun Hong received the B.S. degree in the School of Electronics Engineering at KwangWoon University and M.S. degree in the Department of Communication and Convergence Technology of Yonsei University, Seoul, South Korea, and he is currently at Hanwha-system as a R&D Center leader, C2Comm R&D Center. His research interests are Command, Control, Communication, Computer system, and Network system (Datalink system).

