



Received: 2026/08/03
Revised: 2026/08/16
Accepted: 2026/08/29
Published: 2026/09/30

*Corresponding Author:

Jae Sung Yu

333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel: +82-31-5179-7284
E-mail: jaesung.yu@ligdna.com

Abstract

본 논문에서는 기존 가시선(LOS) 레이더 기반 유도무기 중기유도 통신의 한계를 극복하기 위해 저궤도(LEO) 군집 위성망, 자유공간 광통신(FSO), 양자 암호·항법, 비행 애드혹 네트워크(FANET)를 융합한 다층적 통신 아키텍처를 제안한다. 특히 극초음속 기동 시 발생하는 플라즈마 블랙아웃, 거대한 도플러 편이, 공력 가열 등의 물리적 난제를 해결하기 위한 능형 보상 알고리즘 및 등각 배열 안테나(conformal AESA) 적용 방안을 제시하여, 미래 통합전 환경에서 유도무기의 생존성과 타격 정밀도를 극대화하는 방향을 고찰한다.

This study proposes a multilayered communication architecture that converges low Earth orbit satellite constellations, free-space optical communication, quantum cryptography and navigation, and flying ad hoc networks to overcome the limitations of conventional line-of-sight radar-based mid-course guidance for guided weapons. In particular, we present intelligent compensation algorithms and conformal array antenna application methods to resolve physical challenges such as plasma blackout, massive Doppler shifts, and aerodynamic heating during hypersonic maneuvers, thereby exploring directions to maximize the survivability and strike precision of guided weapons in future multidomain warfare environments.

Keywords

유도무기 중기유도(Mid-Course Guidance), 저궤도 군집 위성망(LEO Constellation), 자유공간 광통신(FSO Communication), 양자 항법 및 암호(Quantum Navigation and Cryptography), 등각 능형위상배열 안테나 (Conformal AESA)

미래 전장 환경에서의 유도무기 중기유도 통신 아키텍처 혁신: 저궤도 위성 및 양자·광통신 융합 기술을 중심으로

Innovation of Mid-Course Guidance Communication Architecture for Guided Weapons in Future Battlefield Environments: Focusing on Low Earth Orbit Satellites and Quantum-Optical Communication Convergence Technologies

유재성^{1*}, 이상욱², 이성균², 고진용², 장재덕²

¹LIG 디펜스&에어로스페이스 M&S팀 선임연구원

²LIG 디펜스&에어로스페이스 M&S팀 수석연구원

Jae Sung Yu^{1*}, Sangwook Lee², Sungkyun Lee², Jinyong Go², Jaedeok Jang²

¹Research engineer, M&S Team, LIG Defense&Aerospace

²Chief research engineer, M&S Team, LIG Defense&Aerospace

1. 서론

현대의 공중 및 해상 교전은 가시선 밖(BVR, beyond visual range)의 원거리 적대 세력을 정밀하게 타격하는 능력이 전쟁의 승패를 좌우하는 핵심 요소로 자리 잡고 있다. 유도무기의 비행 궤적은 크게 초기 발사(boost), 중기유도(mid-course), 그리고 종말 유도(terminal) 단계로 구분된다. 이 중 가장 긴 비행시간과 거리를 차지하는 중기유도 단계에서는 표적의 이동 경로 변화를 실시간으로 업데이트받아 미사일의 관성항법장치(INS) 오차를 보정하고 최적의 종말유도 개시점(PIP, predicted intercept point)으로 비행체를 유도하는 무장 데이터링크(WDL, weapon data link) 기술이 필수적이다[1,2].

과거의 BVR 미사일 교전은 단순한 시계외 타격을 의미했으나, 현재에 이르기까지 센서 융합과 전자전(EW) 저항 능력, 그리고 이중 펄스 로켓 및 램제트 추진을 통한 운동에너지 보존 기술이 결합되면서 그 복잡성이 극대화되었다[3]. 전통적인 중기유도 통신은

주로 이지스(Aegis) 함정의 S-band 및 X-band 위성 배열 레이더나 공중조기경보통제기(AEW&C)의 가시선(LOS) 기반 무선 주파수(RF) 통신에 절대적으로 의존해 왔다[1].

그러나 장거리 지대공 미사일(LRSAM) 및 변칙적인 기동을 하는 극초음속 미사일 위협이 등장함에 따라 전 지구적이고 즉각적인 감시 및 통신 릴레이 능력이 강력히 요구되고 있다[4].

본 연구는 기존 함정 및 항공기 기반의 가시선(LOS) 중기유도 통신의 한계를 극복하기 위해, 초연결 저궤도(LEO) 군집 위성망, 자유공간 광통신(FSO), 양자 암호 및 항법, 그리고 비행 애드혹 네트워크(FANET) 등 미래 혁신 통신 기술을 유도무기 데이터링크에 적용하는 방안을 심층적으로 분석한다.

2. 기존 중기유도 통신 체계의 기술적 한계와 위험 분석

전통적인 대공 및 대함 유도무기의 중기유도는 발사 플랫폼에서 계산된 가속도 명령이나 목표물의 갱신된 위치 정보를 미사일에 전송하는 지령 유도(command guidance) 또는 관성 항법 기반의 갱신 방식을 취한다[1,2]. 이러한 전통적 방식에서 나타나는 주요 한계점은 다차원적으로 얽혀 있다.

2.1 가시선(LOS) 제약과 레이더 지평선의 물리적 한계

지상 또는 해상의 레이더 시스템이 제공할 수 있는 통신 및 탐지 거리는 지구의 곡률에 의한 레이더 지평선(radar horizon)에 의해 물리적으로 제한된다. 미사일이 능동 레이더 탐색기를 켜기 전까지 발사 플랫폼은 적의 사정거리 내에 오랜 시간 머물며 유도해야

하므로 플랫폼 자체의 생존성이 위협받는다[2].

2.2 적대적 전자전(EW) 및 방공망에 의한 생존성 저하

현대의 고도화된 전자전 환경에서는 적의 강력한 잡음 재밍(noise jamming)이나 기만 재밍(deception jamming)에 의해 통신 링크가 단절될 위험이 크다. 고출력 마이크로파(HPM)나 전자기 펄스(EMP) 무기가 유도무기의 수신부를 통해 침투할 경우 비행 제어 상실을 초래할 수 있다[3].

2.3 우주 기반 조기경보 및 추적의 한계

전통적인 정지궤도(GEO) 기반 적외선 탐지 체계는 포물선 궤도를 그리는 탄도미사일의 방출 에너지를 탐지하는 데 최적화되어 있다. 그러나 대기권 내에서 기동하는 극초음속 활공체(HGV)는 적외선 신호가 약해 기존 체계로는 탐지 및 중기 궤적 추적이 거의 불가능하다[4].

3. 우주 기반 저궤도(LEO) 군집 위성 아키텍처 도입

3.1 국방우주아키텍처(NDSA)와 pLEO 기반 추적 및 전송

고도 1,000 km 내외의 저궤도에 수백에서 수천 개의 소형 위성을 배치하는 pLEO 개념은 크게 두 가지 핵심 레이어로 구성된다[5,6].

◎ 추적 층(tracking layer): 광시야각(WFOV) 오버헤드 지속 적외선(OPIR) 센서를 탑재하여 극초음

Table 1. Comparison of conventional GEO/ground radar systems and LEO constellation-based datalinks (NDSA)

Characteristics / Parameters	Conventional GEO Satellites & Ground Radar Networks	LEO Constellation-based Datalink (NDSA)
Operating Altitude & Coverage	~35,786 km (GEO) / Within Radar Horizon (Ground Radar)	300 ~ 1,000 km / Global Coverage
Communication Latency	250 ~ 600 ms (GEO)	Under 20 ~ 50 ms
ASAT Survivability	Critical system failure upon single high-value satellite destruction	Enhanced resilience via multi-node and multi-layered architecture
Missile Guidance Communication Application	Limited to static/low-speed target updates	Real-time mid-course guidance updates for high-maneuver/hypersonic missiles

속 미사일의 비행 내내 지속적인 궤적 데이터를 생성한다[6].

◎ 전송 층(transport layer): 추적 층에서 획득한 데이터를 초저지연으로 전투 플랫폼과 유도무기에 전달한다. 레이저를 이용한 광학 위성 간 링크(OISL)로 연결되어 뛰어난 회복 탄력성을 자랑한다[7].

4. 혁신적 통신 대체 수단: 광통신, 양자 통신 및 FANET 융합

4.1 자유공간 광통신(FSO) 및 레이저 기반 초고속 데이터링크

RF 스펙트럼의 포화와 적의 감청/재밍 위협을 차단하기 위한 대안으로 자유공간 광통신(FSO)이 대두되고 있다. 대역폭이 넓으며 감청이 물리적으로 불가능에 가깝다[7,8]. 대기 난류에 의한 수신 강도의 분산(σ_I^2)을 수신 개구부 크기(D)로 조절하는 ‘조리개 평균화’ 기법은 아래의 수식으로 설명된다.

$$F = 1 + 1.07 \left(\frac{kD^2}{4L} \right)^{7/6} - 1 \quad (1)$$

또한, 압전(piezoelectric) MEMS 기반의 고속 조향거울(FSM)을 적용하여 기계적 진동이 발생하는 미사일 환경에서도 정밀한 광학 추적을 유지할 수 있다[8].

4.2 양자 암호 통신(QKD) 및 양자 관성 항법(QINS)

데이터링크의 무결성을 위해 양자 얽힘 현상을 이용한 양자 키 분배(QKD) 기술을 적용하면, 제3자의 감청 시 양자 상태가 붕괴하여 즉시 해킹 시도를 인지할 수 있다[9]. 또한 GPS 교란 환경에서 미사일의 자율성을 보장하는 양자 관성 항법 시스템(QINS)은 기존 기계식 센서가 시간당 10^{-2} 에서 10^{-3} 의 오차를 보이는 것과 달리 시간당 단 10^{-6} 의 극미한 드리프트만을 나타내어 외부 업데이트 없이도 정밀 유도를 보장한다[10].

4.3 비행 애드혹 네트워크(FANET) 기반 동적 무인기 릴레이

LEO 위성 및 레이저 통신이 물리적으로 제한될 경

우, 다수의 소형 무인기 스웘이 메쉬 네트워크를 구축하여 유도무기와 통제소 간 통신을 중계하는 FANET이 유연한 대안망을 제공한다. 자율 라우팅 프로토콜이 즉각적으로 우회 경로를 형성하여 단절을 방지한다[11].

5. 고속 비행체 데이터링크 적용을 위한 극한 환경 극복 기술

미래 통신 방법을 마하 4 이상의 고속 기체나 극초음속 비행체에 통합하기 위해서는 가혹한 물리적 환경을 극복해야 한다.

5.1 극초음속 비행 환경에서의 플라즈마 차폐 극복

마하 5 이상으로 기동 시 기체 표면에는 공기 분자가 전리된 플라즈마 차폐(plasma sheath)가 형성된다. 통신 주파수가 플라즈마의 고유 진동수(ω_p)보다 낮을 경우 전자기파가 강력히 반사되는 블랙아웃(blackout)을 초래한다[12]. 또한 나비에-스토크스 방정식과 $k-\epsilon$ 난류 모델로 해석되는 난류성 층은 심볼 간 간섭(ISI)을 일으킨다. 이를 극복하기 위해 플라즈마를 투과하는 1550 nm 파장의 FSO 레이저 적용이나 메타물질 코팅이 연구되고 있다[8,12].

5.2 초고도 동적 환경에 따른 도플러 편이 보상 알고리즘

위성과 미사일의 극단적인 상대 속도는 S-band 기준 약 50 kHz, Ka-band 기준 최대 340 kHz의 거대한 도플러 편이(Doppler shift)를 유발하여 직교성을 파괴한다[13]. 이에 유도무기 단말 측에서 능동적인 사전 보상(pre-compensation) 및 ‘슬라이딩 윈도우 가중 업데이트’ 기법을 활용한 하이브리드 추적 알고리즘을 적용해야 한다 [13].

5.3 공력 가열 저감 및 능동위상배열 등각 안테나 설계

돌출형 안테나는 초음속 비행 시 기계적 피로와 비정상적 열 손상을 유발하므로 기체 곡률에 밀착되는 등각 배열 안테나(conformal array antenna)가 필수적이다[14]. 소자 간 상호 결합(mutual coupling) 왜곡 현상은 합성곱 신경망(CNN) 대리 모델을 활용

Table 2. Extreme flight environment factors and engineering mitigation strategies for high-speed vehicles

Extreme Environment Factor	Causes and Technical Issues	Engineering Mitigation and Compensation Methods
Plasma Sheath	Communication disruption caused by air ionization during Mach 5+ maneuvers	1550 nm optical communication laser transmission, metamaterial application
Doppler Shift	Degradation of OFDMA orthogonality due to extreme relative velocity	Orbit data-based frequency offset prediction and hybrid compensation
Aerodynamic Drag & Heating	Aerodynamic structure damage and high heat generation when using protruding antennas	Multi-band conformal active electronically scanned array (Conformal AESA) antenna based on CNN optimization

한 디커플링 토폴로지 최적화를 통해 20~25 dB 향상시킬 수 있다[15].

6. 제안하는 다층적 중기유도 통신 융합 모델

본 연구에서 제안하는 아키텍처는 개별 기술의 단순한 나열이 아닌, 전장 상황과 비행 환경(고도, 기상, 적 EW 위협 등)에 따라 적절한 통신 수단을 실시간으로 선택 및 융합하는 ‘인지형 다층 데이터링크(cognitive multi-layer datalink)’ 개념을 기반으로 한다. 이는 단일 실패점(SPOF)의 발생 가능성을 최소화하며 다음과 같은 3단계 레이어 구조와 작전 시나리오로 구성된다.

6.1 아키텍처 핵심 구성 요소 및 동적 전환 메커니즘

1. 우주 백본 레이어(space backbone layer): NDSA 등 pLEO 군집 위성망을 주축으로 하며, OPIR 센서가 포착한 표적 데이터를 진공 우주 공간의 광통신(OISL) 릴레이망을 통해 유도무기 상공의 노드로 신속하게 전송한다. 단일 위성 장애 시에도 자율 라우팅 프로토콜이 우회 경로를 형성한다.

2. 하이브리드 데이터링크 레이어(hybrid datalink layer): 대기권 내 유도무기와 LEO 위성 간의 직접 통신(direct-to-cell)을 담당한다. 기본적으로 고도 30 km 이하 기상 악화 시에는 Ka-band RF를 사용하며 지능형 도플러 사전 보상 알고리즘을 가동한다. 극초음속 기동으로 플라즈마 차폐가 심화될 경우, 플라즈마 투과율이 높은 1550 nm FSO 모드로 자동 전환하여 블랙아웃을 회피한다. 기체 표면에는 공력 가열을 견디는 다중 대역 등각 위상배열(conformal AESA) 안테나가 밀착 적용된다.

3. 전술 릴레이 및 자율 생존 레이어(tactical relay & autonomous survival layer): 우주 인프라 통신이 원활하지 않은 환경에서는 교전 공역을 제공 중인 무인기 스웜(FANET)이 통신 릴레이를 수행한다. 통신 채널에 양자 키 분배(QKD) 기반 암호가 적용되어 보안을 강화하며, 모든 외부 링크가 물리적으로 단절되는 상황에서는 양자 관성 항법 장치(QINS)가 가동되어 고도의 자율 정밀 비행 모드로 전환된다.

6.2 통합 교전 시나리오(CONOPS: concept of operations)

Phase 1(발사 및 이탈): 아군 함정 및 전투기는 적 위협 구역 외곽에서 미사일을 발사한 직후 회피 기동을 수행한다(fire-and-forget 구현).

Phase 2(우주 기반 추적 및 라우팅): 미사일 비행 중 적 표적이 회피 기동을 할 경우, LEO 추적 층이 이를 감지하고 연산된 새로운 요격 궤적(IFTUs)을 OISL을 통해 미사일 인근 상공의 위성으로 고속 전송한다.

Phase 3(극초음속 비행 및 통신 블랙아웃 극복): 미사일이 목표를 향해 극초음속으로 강하하며 플라즈마 층을 형성한다. 이때 시스템은 통신 효율을 고려하여 1550 nm 레이저 기반 FSO 링크로 유연하게(seamless) 전환해 궤도 갱신 데이터를 수신한다.

Phase 4(통신 거부 환경 및 종말 유도 전환): 강력한 적 전자전(EW) 공격으로 재밍이 발생할 경우, 통신망 의존을 줄이고 QINS 자율 항법으로 전환한다. 이후 정밀하게 계산된 최적의 교전 개시점(PIP) 반경 10~20 km 내에 진입하여 자체 능동 탐색기(active seeker)를 가동하고 타격을 완수한다.

7. 결론

본 논문은 유도무기 중기유도를 기존 가시선 (LOS) 레이더 의존 구조에서 탈피하여, 저궤도 (LEO) 군집 위성망, FSO, 양자 기술, FANET이 융합된 통신 아키텍처로 진화시키는 방안을 고찰하였다. LEO 위성망과 등각 배열 안테나의 연동은 유도무기 운용의 지리적 한계를 전 지구 단위로 확장시키는 의미 있는 전환점이 될 가능성을 제시한다. 플라스마 블랙아웃 및 거대한 도플러 편이라는 공학적 난제가 존재하나, 지능형 보상 알고리즘 및 1550 nm 광통신, 양자 항법 기술의 발전은 이러한 물리적 장벽을 완화할 잠재적 돌파구를 제공할 수 있다.

다만, 제안된 ‘다층적 중기유도 통신 융합 모델’은 우주-사이버-전자파 통합전(JADO) 시대에 유도무기 체계의 작전 효율성을 높이기 위한 개념적 기초 단계에 머물러 있다. 실제 가혹한 전장 환경에서의 다계층 플랫폼 간 상호운용성, 안테나 및 양자 시스템의 소형화 한계, 그리고 극단적인 기만·교란 환경에 따른 시스템 안정성 등 현실적으로 극복해야 할 과제들이 여전히 남아 있다. 따라서 본 연구에서 제시된 아키텍처가 실제 무기 체계로 온전히 구현되기 위해서는, 고정밀 체계 통합 시뮬레이션 및 각 요소 기술에 대한 심도 있는 추가 연구와 실험적 검증이 지속적으로 수반되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] S. J. Marzolf, A. W. Bivins, & D. L. Blevins, ‘Standard Missile-2 Block IIIC,’ Johns Hopkins APL Technical Digest, VOL. 28, NO. 4, 2008, pp. 325–338.
- [2] Sang Hyo Woo, Inhye Baek, Ki-Jeong Kwon, & Ki Bum Kim, ‘Research of Considerations for Effective Operation of Weapons Data Link,’ Journal of the KIMST, VOL. 21, NO. 6, 2018, pp. 886–893.
- [3] E. F. Kamen & G. W. Russell, ‘Target Tracking and Guidance for Beyond-Visual-Range Missiles,’ IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, VOL. 27, NO. 2, 1991, pp. 297–306.
- [4] M. Kumar et al., ‘Hypersonic Missile Technology: A Comprehensive Analysis,’ ResearchGate Technical Report, 2024.
- [5] D. Wright, L. Grego, & L. Gronlund, ‘Space-Based Missile Defense,’ Science & Global Security, VOL. 10, NO. 1, 2002, pp. 1–15.
- [6] Joseph Trevithick, ‘Work Begins on Starlink-Like Constellation of Small Hypersonic Missile Tracking Satellites,’ The War Zone, 2020.
- [7] S. Kumar & P. Sharma, ‘Free Space Optical Communication for Inter-Satellite Link,’ in proceedings of IEEE International Conference on Advanced Communication Technologies (ICACT), pp. 1–6, 2024.
- [8] Qing Zang, Xiangxing Bai, Ping Ma, Jie Huang, Jing Ma, Siyuan Yu, Hongyan Shi, Xiudong Sun, Yang Liu, & Yueguang Lu, ‘Laboratory Simulation of Laser Propagation Through Plasma Sheaths Containing Ablation Particles of ZrB₂-SiC-C During Hypersonic Flight,’ Optics Letters, VOL. 42, NO. 4, 2017, pp. 687–690.
- [9] Eleni Diamanti, Hoi-Kwong Lo, Bing Qi, & Zhiliang Yuan, ‘Practical Challenges in Quantum Key Distribution,’ npj Quantum Information, VOL. 2, NO. 1, 2016, Article 16025.
- [10] C. L. Degen, F. Reinhard, & P. Cappellaro, ‘Quantum Sensing,’ Reviews of Modern Physics, VOL. 89, NO. 3, 2017, pp. 035002–1 – 035002–39.
- [11] İlker Bekmezci, Ozgur Koray Sahingoz, & Şamil Temel, ‘Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey,’ Ad Hoc Networks, VOL. 11, NO. 3, 2013, pp. 1254–1270.
- [12] Ryan Starkey, ‘Electromagnetic Wave/Magnetoactive Plasma Sheath Interaction for Hypersonic Vehicle Telemetry Blackout Analysis,’ in proceedings of 34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Orlando, FL, June 2003, Article AIAA-2003-4167.
- [13] Y. Wang, P. Wang, & Z. Yang, ‘Doppler Shift Estimation and Compensation for LEO Satellite Communications,’ IEEE Wireless Communications Letters, VOL. 9, NO. 11, 2020, pp. 1819–1823.
- [14] P. Persson & L. Josefsson, ‘Calculating the Mutual Coupling Between Apertures on a Convex Cylinder Using a Hybrid UTD-MoM Method,’ IEEE Transactions on Antennas and Propagation, VOL. 49, NO. 4, 2001, pp. 672–677.
- [15] D. W. Boeringer & D. H. Werner, ‘Particle Swarm Optimization Versus Genetic Algorithms for Phased Array Synthesis,’ IEEE Transactions on Antennas and Propagation, VOL. 52, NO. 3, 2004, pp. 771–779.