

MWP 기반 초광대역 스펙트럼 기술의 국방 활용성과 미래 무기체계 발전 전망

김소연*, 김성훈**

*국방과학연구소, **해군 미래혁신연구단

e-mail: comet613net@daum.net, sunghu.k99@gmail.com

Military Applications and Future Development Prospects of MWP-Based Ultra-Wideband Spectrum Technologies

Soyeon Kim*, Sunghun Kim**

*Agency for Defense Development, **Naval Future Innovation Research Group

MWP(Microwave Photonics)는 마이크로파 처리기술과 광학 기술을 융합하여 기존 RF 기반 신호처리 시스템이 가지는 물리적 및 구조적 한계를 극복할 수 있는 차세대 핵심 기술로 주목받고 있다. 본 논문에서는 MWP 기술의 원리와 핵심 강점을 분석하고, 미국·유럽·호주·중국을 중심으로 한 글로벌 기술개발 동향 및 국내 연구 현황을 기술하였다. 다음으로, SIGINT/ELINT 체계 고도화, 무인체계(UxV) 적용, 차세대 전자전(EW) 체계 개발, 해군 함정 운용 환경 적용 등 국방 분야 주요 영역에서의 기술 적용 기대효과를 도출하였다. 마지막으로, 미래 전장 환경에서 MWP 기술이 갖는 전략적 의미를 고찰하고, 국내 기술 자립 및 무기체계 전력화를 위한 정책적·기술적 발전 방향을 제언하였다.

1. 서론

현대 전장은 플랫폼 중심에서 정보 중심 전쟁으로 전환되며 전자 스펙트럼의 중요성이 크게 증가하고 있다. 특히 네트워크 중심작전, 다영역 작전, 킬체인 고도화는 전장 환경을 초연결 구조로 변화시키고 있으며, 이에 따라 레이더, 통신, 데이터링크, 무인체계 신호가 동일 주파수 공간에서 운용되어 스펙트럼 혼잡과 전자기 간섭 문제가 심화되고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 기술로 마이크로파 광자공학(MWP)이 주목받고 있으며, RF 신호를 광 신호로 변환해 광 도메인에서 처리함으로써 초광대역 및 병렬 신호처리를 가능하게 한다[1-3]. 그러나 국내 연구는 주로 5G/6G 통신 중심에 머물러 있어 국방 적용과 해군 운용개념에 대한 체계적 분석은 부족하다. 이에 본 논문은 MWP 기술의 국방 적용 효과를 분석하고 해군 작전 환경을 반영한 운용개념(CONOPs)을 제시한다.

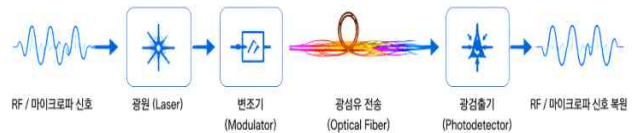
2. MWP 기술 원리 및 강점

2.1 MWP의 기술 개념

MWP 핵심 개념은 “신호를 전자 영역이 아닌 광 영역에서 처리한다”는 것이다. 특히 마이크로파는 정보 전달, 원격 탐지, 장거리 통신에 강점을 지니며, 광학 처리기술은 초광대역폭, 저손실, EMI 내성을 갖는 특성을 지니므로, MWP기반 시스템은 두 기술의 장점을 동시에 적용하여 시너지 효과를 낼수 있다[2, 3].

2.2 MWP의 핵심구성 요소

MWP 시스템의 핵심구성 요소와 신호흐름은 아래 그림과 같이 동작은 크게 네 단계로 구성된다(그림 1).



[그림 1] MWP 핵심구성 요소

첫째, 광원에서 Coherent 단색광을 생성하여 RF 신호를 전달할 광 반송파(Optical Carrier)를 형성하며, 낮은 위상잡음 특성을 확보한다(LD 등 사용), 둘째, 전광(E/O) 변환 단계로, 광변조기(MZM 등)를 통해 RF 신호의 크기·위상·주파수 정보를 광 신호에 정밀하게 반영한다.셋째, 광섬유 기반 전송 단계로, 낮은 손실 특성으로 장거리에서도 신호 품질을 유지한다. 넷째, 광전(O/E) 변환 단계로, 광검출기(PIN PD, APD)를 이용해 광 신호를 RF 신호로 복원하며, GHz급 고속 응답이 가능하다.

2.3 MWP 기술의 강점

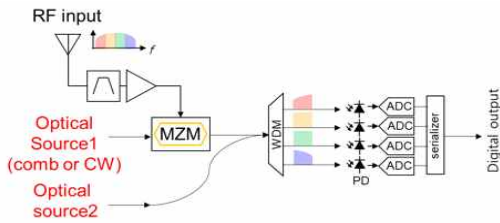
2.3.1 초광대역 신호수신

RF 기반 시스템은 전자 소자의 물리적 한계(스위칭 속도, 회로 내 기생분 등)로 인해 동작 주파수가 수 GHz 수준에서 포화되어 초광대역 환경에서 탐지 성능이 저하된다. 반면 MWP는 RF

신호를 광 신호로 변환해 광 도메인에서 처리함으로써 이러한 한계를 극복하고, 수십~수백 GHz 대역 신호의 동시 수신·탐지가 가능하다.

2.3.2 고밀도/다중 신호처리

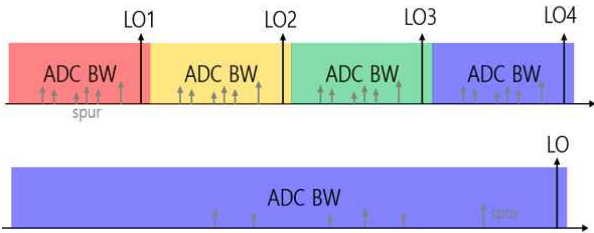
MWP는 광 도메인 병렬처리 구조를 통해 광대역 환경에서 다중 신호를 동시에 분석할 수 있으며, 파장 분할 다중화(WDM)를 적용할 경우 하나의 광섬유에서 수십 개 채널을 독립적으로 처리할 수 있다[3]. 이에 따라 고밀도 전자기 환경에서도 다중 위협 신호의 동시 처리가 가능하다(그림 2)



[그림 2] MWP의 파장 분할 다중화(WDM) 기술

2.3.3 높은 SNR 및 분석해상도

MWP는 광학 기반 신호처리를 통해 기존 RF 시스템 대비 신호대잡음비(SNR)를 향상시킬 수 있으며, 이는 광 반송파의 낮은 위상잡음과 열잡음 감소, 초광대역 처리에 따른 불요신호 감소 특성에 기인한다. 또한 수 kHz 이하의 주파수 분해능 확보가 가능해 미세 신호 분석에 유리하며, 이는 적 신호의 식별 및 분석 정확도 향상에 기여할 수 있다(그림 3)[4].



[그림 3] 기존 RF 소자 기반 잡음(상) vs. MWP의 잡음(하)

2.3.4 전자기 간섭(EMI) 내성

광섬유는 전기적 비전도성 매질로 전류가 흐르지 않아 외부 전자기파와의 상호작용이 제한적이며, 신호가 광자 형태로 전달되므로 EMI의 영향을 거의 받지 않는다. 또한 전송 경로 자체가 차폐 효과를 제공하여 외부 전자기 간섭에 대해 높은 내성을 갖는 시스템 구성이 가능하다.

3. 국내외 기술개발 동향

3.1 국외동향

3.1.1 미국

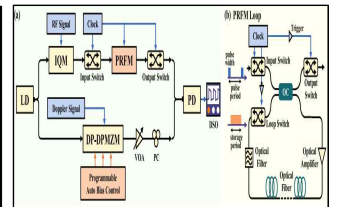
미국은 DARPA를 중심으로 MWP 기술을 집중 개발하고 있으며, GRYPHON 프로그램을 통한 온칩 신호원 개발과 실리콘 포토닉스 기반 집적 광자 수신기, TROPHY-PIPES로 대표되는 PRFM(Photonic RF Memory) 기술이 주요 사례이다[5]. PRFM은 광섬유 기반 지연 구조로 기존 DRFM(Digital RF Memory) 재머의 병목을 해소하여 초고속 차세대 재머로 주목받고 있다. 또한 2025년 Navy STTR에서는 1~40GHz 대역의 MWP 기반 다기능 EW·SIGINT 기술이 제안되었으며[6], AI 기반 실시간 신호분석과의 융합도 추진되고 있다.

3.1.2 유럽 및 NATO, 호주, 중국 등

유럽은 독일, 스위스 등을 중심으로 PIC(Photonic Integrated Circuit) 기술 기반의 소형화·고성능화를 동시에 추진하고 있으며, CMOS 공정과의 결합을 통해 대량 생산 가능성을 확보하려는 연구가 진행되고 있다[7]. 또한 이탈리아에서는 광자 수신기를 포함한 광자 레이더 기술을 개발하여 2014년 Nature에 관련 연구를 발표하였다(그림 4)[8]. NATO는 “Spectrum Dominance”를 핵심 작전개념으로 채택하여 초광대역 스펙트럼 기술 확보를 추진하고 있다[9]. 호주는 DSTO를 통해 PRFM 기술을 최초 제안하고 광섬유 기반 RF 메모리 기술을 발전시켰으며[10], 중국은 군·민융합 정책 하에 광자 레이더, 초광대역 수신기, AI 기반 신호처리 및 PRFM 기술을 빠르게 고도화하고 있다(그림 5)[11].



[그림 4] 이탈리아, 광자 레이더



[그림 5] 중국, PRFM 구현

3.2 국내동향

국내 MWP 기술은 ETRI와 주요 대학을 중심으로 원천·기초 연구 단계에서 진행되고 있다. ETRI는 광통신 및 광소자 기반 RoF(RF-over-Fiber)와 광신호 처리 기술을 개발하고 있으며, 주로 5G/6G 이동통신 적용에 초점을 두고 있다. 또한 POSTECH과 KAIST 등은 PIC 및 광자 신호처리 기초 연구를 통해 핵심 이론과 소자 기술 확보를 추진하고 있으며, 광자 기반 광대역 레이더 트랜시버 설계 연구도 수행된 바 있다[12].

국방 분야에서는 ADD를 중심으로 광 기반 PIC 기술과 광자 레이더 핵심기술이 일부 확보된 상태이다. 2025년에는 국방부와 해군으로부터 HF~Ka 대역 초고속 신호처리 및 고정밀 전파공격 기술 수요가 제시되었으며, 군·산학연·국과연 공동기획을 통해 “AI·광자(MWP) 기반 초광대역 스펙트럼전 기술”이 미래도전과

제로 선정되었다(그림 6)[1]. 국내 기술은 통신 분야 응용기술은 일정 수준 확보되었으나, 광소자 및 PIC 등 핵심 원천기술은 해외 의존도가 높고 전력화도 미흡한 수준이다. 따라서 핵심 소자 확보와 무기체계 적용을 위한 중장기적 투자와 전략적 접근이 요구된다.



[그림 6] AI-MWP 기반 초광대역 스펙트럼진 기술 개념도(25년)

4. 국방분야 적용 기대효과 및 발전전망

4.1 국방분야 적용 기대효과

MWP 기술은 전 세계적으로 전략 기술로 인식되며 군사적 활용을 중심으로 발전하고 있다. 특히 초광대역 신호의 실시간 처리와 다중 신호 동시 분석을 통해 전자기 스펙트럼 운용 능력을 향상시킬 수 있다. 또한 높은 SNR과 EMI 내성을 기반으로 복잡한 전장 환경에서도 안정적인 탐지와 정밀 분석이 가능하며, 소형·경량화 특성은 다양한 무기체계 적용을 용이하게 한다. 이러한 특성은 MWP가 스펙트럼 기반 무기체계의 패러다임 전환을 견인할 잠재력을 시사한다.

4.2 MWP기반 미래 무기체계 발전전망

4.2.1 신호정보(SIGINT)·전자정보(ELINT) 체계 고도화

MWP 기반 SIGINT·ELINT 체계는 수 GHz에서 수백 GHz에 이르는 광대역 신호를 실시간으로 동시 감청·기록함으로써 신호 분석 능력을 획기적으로 향상시킬 수 있다[6, 13]. 또한 AI와의 결합을 통해 신규 전자기 위협을 초고속으로 식별하고 경보할 수 있으며, 전장인식 환경을 실시간으로 구축·공유함으로써 상황 인식(SA, Situational Awareness) 능력을 극대화할 수 있다.

4.2.2 무인체계(UxV) 적용 및 대응

MWP 기술은 광섬유 및 PIC 기반 구조를 통해 소형·경량·저전력 특성을 구현함으로써 UxV의 SWaP(Size, Weight, and Power) 제약을 완화하고, 분산형 센서 네트워크 구축에 적합한 기반을 제공한다[14]. 또한 광통신 기반 장거리 저손실 연결과 높은 EMI 내성은 네트워크 중심작전(MDO) 환경에서 무인체계의 생존성과 운용 효율을 향상시킨다. 한편 적군 UxV 확산에 따른 스펙트럼 포화 환경에서 MWP는 초광대역·병렬처리를 통해 다중

RF 신호를 동시에 탐지·분석하고, 탐지·식별·대응 지연을 최소화하여 실시간 위협 대응 능력을 강화한다[3].

4.2.3 차세대 EW 체계개발

MWP는 초광대역·병렬 신호처리 능력을 기반으로 전자기 스펙트럼 지배력 확보를 위한 차세대 전자전(EW) 체계 구현을 가능하게 한다. 능동 전자 교란(EA) 측면에서는 적 레이더 및 통신 신호를 초고속으로 분석해 최적의 재밍 파형을 생성(PRFM)함으로써 기존 DRFM 대비 대응 속도와 정밀도를 향상시킬 수 있다[5, 11]. 또한 재구성 가능 안테나(AESA 등)와의 결합은 능동 스텔스/저피탐 구현을 통해 적 신호의 탐지 및 추적을 교란할 수 있으며, 전자기파 공격방호(EP) 측면에서는 높은 EMI 내성을 바탕으로 아군 시스템의 생존성과 운용 안정성을 강화한다.

4.2.4 우주기반 전자기전 및 통신체계

MWP 기술은 전자기 스펙트럼 운용 영역을 우주로 확장시키며, 차세대 우주기반 전자기전 및 통신체계 구현을 가능하게 한다. 소형 위성, 특히 큐브셋 급 플랫폼에의 적용은 PIC 소형화와 방사선 내성 기술 발전에 따라 실현 가능성이 높으며, 경량·분산형 우주체계 구축에 유리하다. 또한 우주 기반 SIGINT를 통해 지구 전역 전자기 신호 감시가 가능하고, THz 대역 위성 간 통신은 초고속 위성망 구축을 지원한다. 더불어 우주 전자전에서는 적 위성 재밍과 아군 위성 보호를 동시에 수행함으로써 전장 우위 확보에 기여할 수 있다[6, 11].

4.3 해군 운용개념(CONOPs) 관점의 MWP 적용 방향

MWP 기술이 제공하는 초광대역 신호처리 능력과 광섬유 기반 전자기 간섭내성/적합성(EMI/EMC)은 해군 작전 환경의 고유한 요구사항에 특히 부합한다.

4.3.1 EMCON 환경에서의 전략적 우위

전자파 방사 통제(EMCON)는 함정이 전자기 방사를 최소화하여 적 탐지를 회피하는 핵심 전술 조건이다. MWP 기반 수신 체계는 광섬유 전송 특성상 전자기 방사를 발생시키지 않아 EMCON 상태를 유지한 채 HF~밀리미터파 대역 신호를 실시간으로 수집·분석하고 신속 대응이 가능하다. 이는 수중 위협 탐지, 대함순항미사일(ASCM) 조기 경보, 피아식별(IFF) 정확도 향상 등 함대 생존성 제고에 기여하며, 호주 DSTO의 PRFM 개발 사례[10]가 이를 뒷받침한다.

4.3.2 수상함 탐재 및 복합 전자기전

이지스함(KDX-III), 구축함(KDX-II), 호위함(FFX) 등 수상전 투함은 레이더, 전자전지원(ESM), 통신, 데이터링크 등 다양한 전자 체계가 제한된 공간에 집약되어 있어 함내 전자기 간섭

(EMI) 관리가 필수적이다. RF 기반 구조에서는 체계 간 상호 간섭과 주파수 혼잡이 전투 효율을 저하시키는 요인으로 작용한다. 반면 MWP 기반 수신 및 신호처리는 EMI 문제를 완화하고, HF~Ka 대역의 초광대역 신호를 단일 체계로 통합 처리할 수 있을 것으로 기대된다.

4.3.3 무인수상정·무인잠수정 탑재 및 분산형 센서 네트워크
소형 무인수상정(USV)과 무인잠수정(UUV)은 SWaP 요구가 매우 엄격한 플랫폼이다. PIC 기반 MWP는 칩 수준 소형화와 저전력 동작을 통해 기존 RF 모듈 대비 탑재 부담을 줄일 수 있다 [13]. 또한 다수의 USV·UUV를 광섬유로 연결한 분산형 해양 센서 네트워크에서 MWP 병렬처리는 광범위 해역의 전자기 정보를 동시에 수집·처리하는 데 유리하다. 이에 따라 기뢰 탐색, 대잠전 환경 정보 수집, 연안 감시 등 해군 임무에 효과적으로 활용될 수 있다[14].

5. 결 론

MWP 기술은 국방에서 전략적 가치와 군사적 활용성을 동시에 강화할 수 있는 차세대 스펙트럼 기반 무기체계 확보를 위한 핵심 도약 기술이다. 따라서 해당 기술의 지속적인 발전과 고도화를 위해서는 MWP 원천기술을 국가 전략기술로 지정하고, 중장기적 관점에서 집중적인 투자를 추진할 필요가 있다. 또한 선도국 연구기관과의 공동연구 및 기술 교류 등 국제협력을 강화하여 PIC 와 같은 핵심 원천기술을 확보해야 한다. 아울러 MWP 기술에 대한 민·관·군 협력체계를 고도화하여, 군의 미래 무기체계 소요가 원천기술(학계), 응용기술(연구소), 전력화(국과연 및 방산업체)로 유기적으로 연계될 수 있도록 지속적인 연구개발과 전략적 투자가 요구된다.

참고문헌

- [1] S. Kim, M. Hyun, S. Kim, S. Lee, S. Kim, Y. Jang, Y. Kim, and S. Lee, "AI and Photonics (MWP)-Based Ultra-Wideband Spectrum Warfare Technologies," Future Challenge Defense Technology R&D Program Planning Research Report, Agency for Defense Development (ADD), Daejeon, South Korea, Nov. 2025.
- [2] J. Yao, "Microwave photonics," *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 1-4, pp. 314-335, Jan. 2009.
- [3] W. Han, Z. Liu, Y. Xu, M. Tan, C. Huang, and J. Wu, "Photonic RF channelization applications of microcombs," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 30, no. 5, Art. no. 7600417, Sept.-Oct. 2024.
- [4] E. A. Kittlaus, D. Eliyahu, S. Ganji, S. Williams, A. B. Matsko, K. B. Cooper, and S. Forouhar, "A low-noise photonic heterodyne synthesizer and its application to millimeter-wave radar," *Nature Commun.*, vol. 12, no. 1, Art. no. 4397, Jul. 2021.
- [5] R. W. Ridgway, C. L. Dohrman, and J. A. Conway, "Microwave photonics programs at DARPA," *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 20, pp. 3428-3439, Oct. 2014.
- [6] Office of Naval Research (ONR), "Topic N25B-T030: Multi-Functional Microwave Photonic Sensor for Modern Electronic Warfare and Signals Intelligence," Navy Small Business Technology Transfer (STTR) Program 2025 Phase I BAA, 2025.
- [7] D. Marpaung, J. Yao, and J. Capmany, "Integrated microwave photonics," *Nature Photon.*, vol. 13, no. 2, pp. 80-90, Feb. 2019.
- [8] P. Ghelfi, F. Laghezza, F. Scotti, G. Serafino, A. Capria, S. Pinna, D. Onori, C. Porzi, M. Scaffardi, A. Malacarne, V. Vercesi, E. Lazzeri, F. Berizzi, and A. Bogoni, "A fully photonics-based coherent radar system," *Nature*, vol. 507, pp. 341-345, Mar. 2014.
- [9] NATO Standardization Office (NSO), Allied Joint Doctrine for Electronic Warfare, AJP-3.6(B), NATO, Brussels, Belgium, 2022.
- [10] L. V. T. Nguyen, "Photonic radio frequency memory — Design issues and possible solutions," Defence Science and Technology Organisation (DSTO), Edinburgh, Australia, Tech. Rep., 2014.
- [11] K. Xu, X. Li, Z. Zhang, M. Cheng, Q. Yang, and M. Tang, "A programmable photonic RF memory supporting functionally-integrated radar jamming," *J. Lightwave Technol.*, vol. 43, no. 13, pp. 6267-6277, Jul. 2025.
- [12] Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), "Optical Communication and Photonics Research Division," Daejeon, South Korea, Accessed: Apr. 2025.
- [13] R. A. Minasian, "Ultra-wideband and adaptive photonic signal processing of microwave signals," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 52, no. 1, Art. no. 0600813, Jan. 2016.
- [14] H. Wu et al., "Survey on the developments of unmanned marine vehicles: Intelligence and cooperation," *Sensors*, vol. 23, no. 10, Art. no. 4643, May 2023.