

Development of MF R-Mode Transmitting System for Maritime Resilient PNT in the Republic of Korea

Younghoon Han, Pyo-Woong Son, Kiyeol Seo, Tae Hyun Fang[†]

Maritime Safety and Environmental Research Division, Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

ABSTRACT

R-Mode is terrestrial based Global Navigation Satellite System (GNSS) backup radio navigation technology which used existing maritime information service infrastructure. It has advantages on reduce the cost and reutilize the frequency resource. In this paper, we propose a method to develop a medium-frequency (MF) band R-Mode transmitting station by utilizing the currently operating Differential GNSS (DGNSS) reference station infrastructure. To this end, the considerations for co-operating the DGNSS reference station and the MF R-Mode transmitting station are analyzed. In this process, we also analyze what is necessary to configure the communication system as a navigation system for range measurement. Based on the analysis result, MF R-Mode transmitting station system is designed and architecture is proposed. The developed system is installed in the field, and the performance evaluation results is presented.

Keywords: ITS, GPS, BDS, precise positioning, urban

1. 서론

4차 산업혁명 사회에서 위치 정보의 중요성은 더욱 커지고 있다. 해양분야에서도 주목받고 있는 기술인 자율운항선박, 스마트 항만, 스마트 항로표지 등도 위치 정보가 기반이 된다. 대부분의 위치 정보는 Global Positioning System (GPS)로 대표되는 위성항법시스템 (GNSS)으로부터 어디서나 무료로 쉽고 빠르고 정확하게 얻을 수 있다. 하지만 GNSS는 우주에 위치한 위성으로부터 신호를 수신하고 신호 정보가 공개되어 있어 간섭에 취약하다. 최근 우크라이나와 러시아 전쟁 뉴스에서도 종종 GNSS 간섭 관련 소식을 접할 수 있다 (RNTF 2022). 더욱이 해양분야의 경우 GNSS에 대한 위치정보의 의존도가 높다 (London Economics 2017). 따라서 GNSS 불능 상황에서 위험에 노출될 가능성이 높으며 이에 대한 대안이 필요하다.

지상파 기반의 항법기술은 해양분야에서의 GNSS 백업기술로 자주 논의되고 있다. 특히 최근 주목받고 있는 Ranging Mode (R-Mode)는 기존의 해상통신인프라를 활용하여 위치정보를 추가적으로 제공할 수 있는 기술이다. 따라서 인프라 구축 비용을 절감할 수 있고, 주파수 활용 측면에서도 이점이 있다. R-Mode 기술은 2017년 유럽연합에서 수행한 ACCEAS 사업을 통해 타당성을 분석하였으며, 발틱 R-Mode 사업을 통해 실험역 실증이 처음 시도되었다 (Johnson & Swaszek 2014b, Dziewicki et al. 2019). 미국과 영국, 캐나다, 중국에서도 관련 연구를 수행 중에 있다 (Han et al. 2019). R-Mode 기술을 위한 신호원으로는 주로 중파 대역의 DGNSS와 초단파 대역의 VDES 신호를 활용한다.

본 논문에서는 현재 운영 중인 Differential GNSS (DGNSS) 기준국 인프라를 활용하여 중파 R-Mode 송신국을 개발하기 위한 방안을 제안한다. 정보전달을 목적으로 하는 통신시스템을 거리 측정이 가능한 측위·항법시스템으로 고도화하기 위한 고려사항에 대해 분석한다. 분석결과를 토대로 중파 R-Mode 송신국 시스템을 설계하고 구성안을 제안한다. 그리고 개발한 시스템을 현장에 설치하여 성능을 평가하고 그 결과를 제시한다. 마지막으로 논문에 대한 요약 및 기대효과, 향후 계획에 대해 설명하며 결론을 맺는다.

Received Aug 09, 2022 Revised Aug 23, 2022 Accepted Aug 25, 2022

[†]Corresponding Author

E-mail: thfang@kriso.re.kr

Tel: +82-42-866-3625 Fax: +82-42-866-3609

Younghoon Han <https://orcid.org/0000-0002-0054-3094>

Pyo-Woong Son <https://orcid.org/0000-0002-6834-9247>

Kiyeol Seo <https://orcid.org/0000-0002-1462-6720>

Tae Hyun Fang <https://orcid.org/0000-0001-7680-9875>

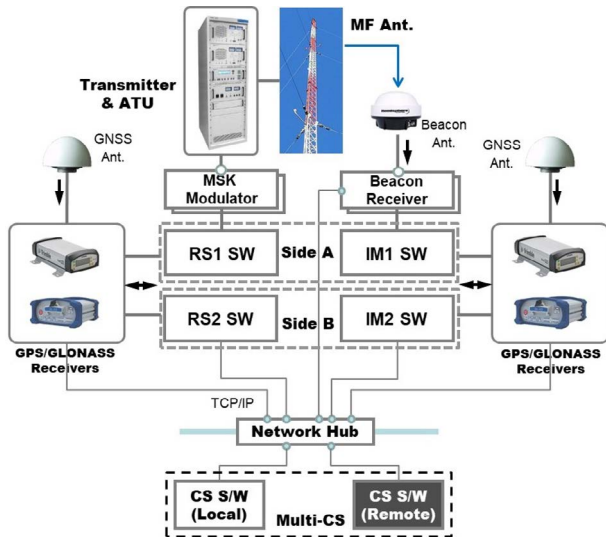


Fig. 1. DGNSS system architecture.

2. 중파 R-MODE 송신국 시스템 설계 및 구성

2.1 DGNSS 기준국 시스템 구성

DGNSS는 GNSS 사용자의 정확도 향상을 위한 기술로 기준국의 고정된 위치정보를 바탕으로 생성한 GNSS신호의 오차 보정정보와 무결성 정보를 주변 사용자에게 전송하는 기술이다. 우리나라에서는 국립해양측위정보원에서 내륙기준국 6개소와 해양기준국 11개소를 통해 전국망 DGNSS 서비스를 제공 중이다 (NMPNT 2022). DGNSS는 기준국마다 할당된 고유 송신 주파수에 Minimum Shift Keying (MSK) 변조를 이용하여 정보를 전송한다 (IALA 2021). ITU 표준에 따라 283.5~315 kHz의 중파 대역 신호를 이용하며, 대역폭은 500 Hz, 데이터 전송률은 200 bps이다 (ITU 2006).

DGNSS 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. GNSS 수신 안테나와 수신기를 이용하여 GNSS 신호를 수신하고, 원시측정치를 생성한다. Reference Station (RS)와 Integrity Monitor (IM)은 원시측정치로부터 오차 보정정보 및 무결성 정보를 생성하고, Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) 표준에 맞게 규격화된 메시지를 MSK 변조기로 전송한다. MSK 변조된 메시지는 송신기에서 증폭되어 Antenna Tuning Unit (ATU)와 안테나를 거쳐 사용자에게 방송되며, 해양 기준국은 300 W, 내륙 기준국은 500 W로 출력된다. 서비스의 안정성 확보를 위해 시스템은 이중화로 구성된다 (RTCM 2010).

2.2 중파 R-Mode 송신국 시스템 설계 고려사항

DGNSS 시스템은 중파 신호를 이용하여 측위 서비스를 제공하는 것이 아닌, GNSS 신호 사용자들의 정확도 향상을 위한 정보를 전송하는 단방향 통신 서비스이다. 따라서 DGNSS 시스템의 중파 신호를 이용하여 거리를 측정하기 위해서는 다음 사항들

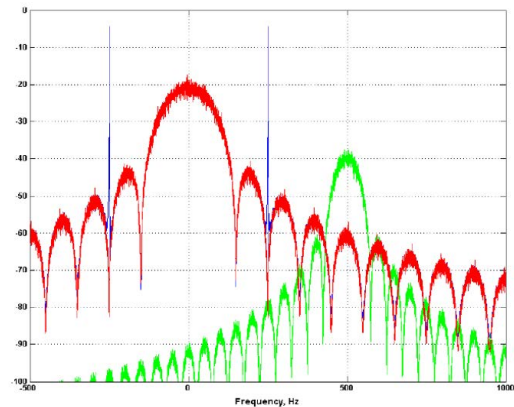


Fig. 2. R-Mode signal spectrum (red: 200 bps MSK, green: 100 bps MSK, blue: CWs) (Johnson & Swaszek 2014a).

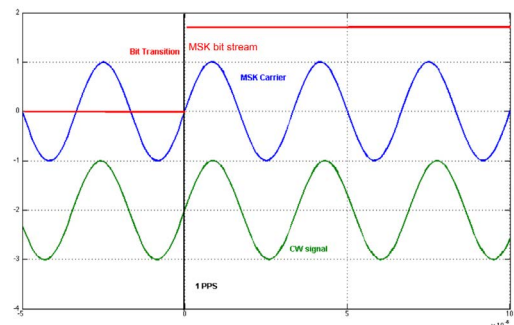


Fig. 3. Example of R-Mode signal synchronization with 1 PPS (Hoppe & Gewies 2019).

에 대한 고려가 필요하다. 첫번째 고려사항은 송신국 간의 시각 동기이다. 사용자 수신기는 송신국에서 신호를 송신한 시각과 수신기에서 신호를 수신한 시각 간의 차를 이용하여 거리를 측정한다. 따라서 신호를 방송하는 송신국들이 같은 타이밍에 신호를 송신하는 것이 중요하다. 두번째로는 항법 신호 구조 설계가 필요하다. ACCSEAS 사업에서는 중파 R-Mode 신호의 구조에 대한 연구를 수행하였으며, 이를 통해 Fig. 2와 같이 중심 주파수 기준 양쪽에 정현파 신호를 추가하는 방안이 제안되었다 (Johnson & Swaszek 2014a). 이때, 수신기가 Continuous Wave (CW) 신호를 원활히 획득하기 위해서는 신호 스펙트럼 상 Null 구간에 CW 신호 삽입이 요구된다. 국내에서 서비스 중인 200 bps 전송률의 MSK 신호와의 구분을 위한 적정 CW 주파수는 중심 주파수 기준 ± 250 Hz 이상 이격이 필요하다. 필드에서 측정 시 DGNSS 대역폭 규격인 500 Hz를 초과하므로 보다 넓은 대역폭이 요구된다. 세번째는 제안된 중파 R-Mode 신호 전송을 위해 MSK 신호와 두 CW 신호가 Fig. 3과 같이 송신국의 1 PPS에 동기 되어야 한다 (Hoppe & Gewies 2019). 네번째로 송신기를 거쳐 증폭된 중파 R-Mode 신호의 상호 변조 왜곡 성능이 중요하다. CW 신호 추가에 따라 기존 기준국에 설치된 Class-D 증폭기 사용 시 대역 내 스파이크 신호가 발생하여 수신기에서 신호 획득 시 잘못된 신호를 추정함으로써 오차를 유발할 수 있다. 따라서 선형증폭 방식의 Class-A 증폭기 또는 이를 고려한 Class-D 증폭 기술이 필

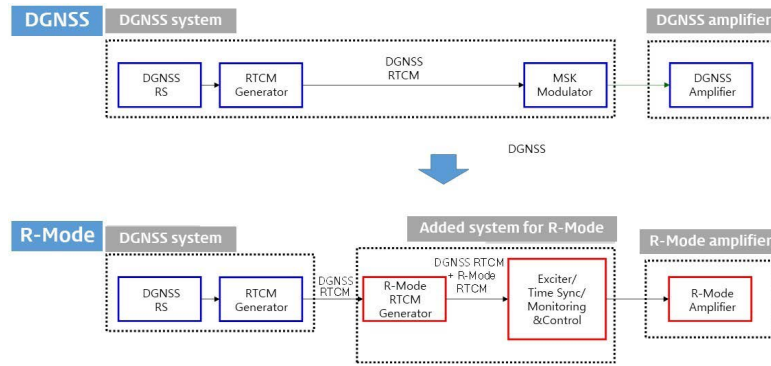


Fig. 4. DGNSS (top) and MF R-Mode (bottom) transmitting system architecture.



Fig. 5. MF R-Mode transmitting system installation of Chungju.

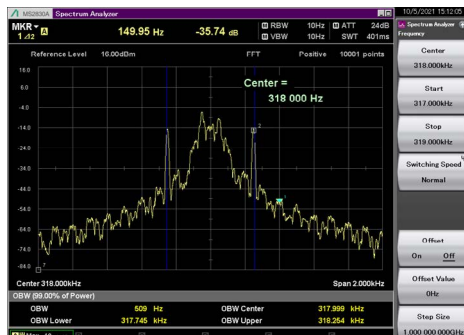


Fig. 6. R-Mode signal spectrum of Transmitting Station of Chungju.

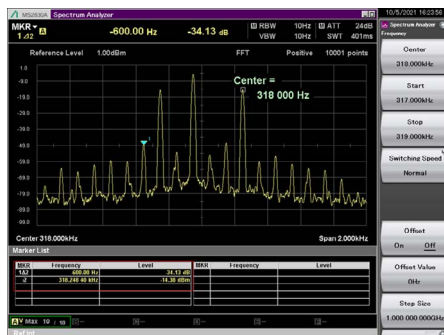


Fig. 7. Intermodulation Distortion (IMD) performance of R-Mode transmitter of Chungju.

요하다. 다섯째로 중파 R-Mode 항법정보 전송을 위한 메시지 전송 방안이 고려되어야 한다. 마지막으로 중파 R-Mode 신호 전송으로 인한 기존 DGNSS 서비스에 영향이 없어야 한다.

2.3 중파 R-Mode 송신국 시스템 구성

앞서 2.2절에서 분석한 결과를 고려하여 기존 DGNSS 시스템을 중파 R-Mode 송신국으로 공동활용하기 위해 설계한 시스템 구성은 Fig. 4와 같다. 기존 DGNSS 시스템 구성을 최대한 유지하면서 변경 또는 추가된 사항은 빨간 박스와 같다. 중파 R-Mode 송신국이 같은 시각에 신호를 송출할 수 있도록 시각동기시스템을 추가하였으며, R-Mode 기준시각에 동기한다. R-Mode RTCM 생성기는 DGNSS 기준국의 RS로부터 DGNSS RTCM 정보를 수신하며 R-Mode 항법메시지를 추가하여 전송하기 위한 스케줄링을 담당한다. R-Mode 신호생성기 (Exciter)는 기존 MSK 변조 신호에 두개의 CW 신호를 추가하여 중파 R-Mode 신호를 생성한다. 또한, ATU에서 피드백 받은 신호를 감시하고, 송신국 1PPS에 MSK와 CW 신호가 동기되도록 제어한다. 송신기는 상호 변조 왜곡을 최소화하기 위해 선형증폭이 가능한 Class-A 증폭기로 변경하였으며, 기존 ATU와 안테나를 사용한다.

3. 중파 R-MODE 송신국 시스템 시험 결과

본 논문에서 제안한 중파 R-Mode 송신국 시스템을 현재 운영 중인 DGNSS 기준국에 구현하여 성능을 시험하였다. Fig. 5는 충주 기준국을 R-Mode 송신국 시스템으로 공동 구성한 결과이다. 중파 R-Mode 신호 송신으로 소모전력이 증가함에 따라 UPS용량을 증설하였으며, 중파 R-Mode 송신국 시각동기 및 신호생성, 감시 및 제어를 위한 시스템을 추가 구성하였다.

제안한 송신국 시스템의 성능 시험은 R-Mode 신호의 규격, 동기정확도, 상호 변조 왜곡, DGNSS 서비스 영향성에 대해 수행하였다. Fig. 6은 충주 송신국에서 측정한 R-Mode 신호의 스펙트럼 결과이다. 충주 MSK 신호의 중심 주파수인 318 kHz를 기준으로 좌우로 250 Hz 이격된 위치에 CW 신호가 위치하며, 점유 대역폭은 509 Hz이다. Fig. 7은 송신기 출력 신호의 상호 변조 왜곡을 측정한 것으로 약 34 dB 수준이며, 해당 값은 클수록 유리하다.

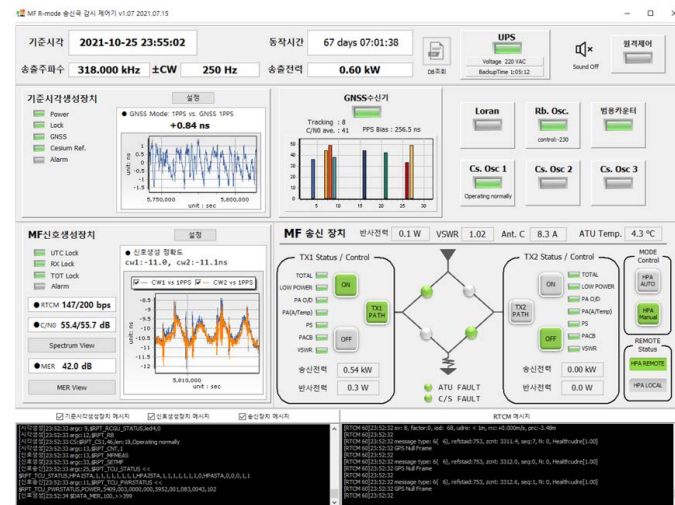


Fig. 8. Performance and Status monitoring results of MF R-Mode transmitting station of Chungju.

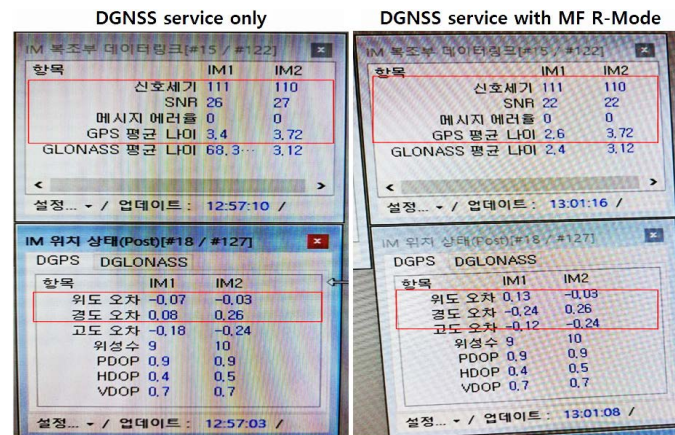


Fig. 9. The evaluation results of MF R-Mode effects on DGNSS service.

Fig. 8은 충주 중파 R-Mode 송신국의 감시제어기 화면으로 현재 운영 중인 시스템의 상태 및 성능을 확인할 수 있다. 송출 주파수와 CW 주파수 설정 값 및 현재 송출 전력 확인이 가능하다. 기준시각생성장치 화면에서는 R-Mode 기준시각 1 PPS 신호의 동기정확도를 확인할 수 있고, 중파 신호생성장치 화면에서는 1 PPS 기준 신호 대비 CW 신호의 동기정확도를 확인할 수 있다. CW1과 CW2 각각 약 -11 ns 수준의 정확도를 보이며, 5 ns 수준의 최대최소값을 유지한다. 현재 추이 분석을 위해 정확도가 0이 되도록 제어하지 않고 있다. 자동제어 시 1 PPS 대비 정확도의 바이어스 성분은 제거 가능하며, 보다 중요한 부분은 CW1과 CW2 간의 상대적인 동기 정확도 값이다. CW1과 CW2 두 신호를 모두 이용하여 항법 시 그 차이 값은 측정치 성능에 영향을 미친다. 본 성능 시험에서 충주 송신국의 경우 CW1과 CW2간 동기 정확도가 1 ns 이내로 유지됨을 확인하였다. 중파 송신 장치 화면에서는 송신기 관련 현재 상태정보를 확인할 수 있다.

마지막으로 Fig. 9는 R-Mode 시스템의 DGNSS 서비스에 미치는 영향을 확인한 결과이다. 감시국에서 R-Mode 신호를 인가

하기 전과 후의 DGNSS 서비스 성능 지표를 확인하였다. 메시지 에러율과 GPS 평균 나이, DGPS 위치 오차가 R-Mode 신호 인가 후에도 유지됨을 확인할 수 있다. 다만 SNR의 경우 4~5 dB 정도 낮게 측정되었다. 이는 CW 신호가 추가되면서 기존 MSK 신호 전력을 유지하기 위해서는 더 높은 출력이 요구되나, 본 시험에서는 CW 신호와 MSK 신호의 총 합이 기존 DGNSS MSK 신호의 전력과 같게 설정하였다. 따라서 MSK 신호 관점에서 상대적으로 낮은 신호가 수신된 결과이며, R-Mode 송신 신호 전력을 높임으로 해결 가능하다.

4. 결론

본 논문에서는 GNSS 취약성에 대비하여 해양분야에서의 백업 항법시스템으로 주목받고 있는 R-Mode 기술을 국내 적용하기 위한 방안을 제안하였다. 특히 중파 R-Mode 기술 중 송신국 기술에 주목하였으며, 국내에서 서비스 중인 DGNSS 기준국을

중파 R-Mode 송신국으로 공동 활용하기 위한 고려사항을 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 중파 R-Mode 송신국 시스템을 설계하고 시스템 구성을 제시하였다, 그리고 개발한 시스템을 충주 DGNSS 기준국에 설치하여 성능을 시험하였다. 시스템 설치 과정에서 R-Mode 신호 송출을 위해 추가 요구되는 전력에 따라 UPS 용량을 증설하였으며, ATU의 조정 및 피드백 신호 감시를 위한 케이블을 추가 매설하였다. 성능 시험을 통해 R-Mode 신호 규격 및 신호의 동기성능, 상호 변조 왜곡 성능을 확인하였다. 또한, R-Mode 신호 방송으로 인해 기존 DGNSS 서비스에 품질이 저하되지 않음을 확인하였다. 본 논문의 결과는 국내 최초로 중파 R-Mode 시스템을 구성하고 현장에 설치하여 그 성능을 분석한 것으로 향후 수신기 기술 개발 및 송신국 기술 고도화에 참고가 될 것으로 기대한다. 현재 어청도와 팔미도, 소청도에도 중파 R-Mode 송신국 시스템이 설치되어 시험 중에 있으며 대산항 인근에서 중파 R-Mode 신호 수신이 가능하다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 해양수산부 재원으로 국가연구개발사업인 “지상파 통합 항법시스템 (R-Mode) 기술개발”에 의해 수행되었습니다 (1525012261).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, Y. Han and T. H. Fang; methodology, Y. Han, P.-W. Son, K. Seo; writing-original draft preparation, Y. Han; visualization, Y. Han and K. Seo; writing-review and editing, T. H. Fang, P.-W. Son, K. Seo; project administration, T. H. Fang.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Dziewicki, M., Hoppe, M., & Gewies, S. 2019, R-Mode Baltic - Baseline and Priorities, [Internet], cited 2021 Sep 17, available from: <https://www.r-mode-baltic.eu/wp-content/uploads/2020/06/R-Mode-Baltic-Baseline-and-Priorities.pdf>
- Han, Y.-H., Lee, S.-H., Park, S.-G., Fang, T.-H., & Park, S.-H. 2019, A Study on Backup PNT Service for Korean Maritime Using NDNSS, *J. Navig. Port Res*, 43, 42-48. <https://doi.org/10.5394/KINPR.2019.43.1.42>
- Hoppe, M. & Gewies, S. 2019, MF R-Mode Modulator Specification, [Internet], cited 2021 Sep 17, available from: <https://www.umgdy.gov.pl/wp-content/uploads/2020/06/MF-R-Mode-Modulator-Specification.pdf>
- International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse. 2021, Table of DGNSS Stations, Edition 1.8
- International Telecommunication Union. 2006, Technical characteristics of differential transmissions for global navigation satellite systems from maritime radio beacons in the frequency band 283.5-315 kHz in Region 1 and 285-325 kHz in Regions 2 and 3, Recommendation M.823-3
- Johnson, G. & Swaszek, P. 2014a, Feasibility Study of R-Mode using MF DGPS Transmissions, German Federal Waterways and Shipping Administration, Final Report
- Johnson, G. & Swaszek, P. 2014b, Feasibility Study of R-Mode combining MF DGNSS, AIS, and eLoran Transmissions, German Federal Waterways and Shipping Administration, Final Report
- London Economics 2017, Economic impact to the UK of a disruption to GNSS
- National Maritime PNT Office [Internet], cited 2022 Jul 28, available from: <https://www.nmpnt.go.kr/home/sub.do?menukey=4130>
- Radio Technical Commission for Maritime Services 2010, RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, Version 2.3.
- Resilient Navigation and Timing Foundation, GPS Jamming in Ukraine - Space News & Breaking Defense [Internet], cited 2022 Mar 5, available from: <https://rntfnd.org/2022/03/05/gps-jamming-in-ukraine-space-news-breaking-defense/>



Younghoon Han received his B.S. and M.S. degrees in Electronics Engineering from Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea, in 2010 and 2012, respectively. He is currently a senior research engineer with the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Daejeon, South Korea. His research interests include backup PNT navigation technologies for maritime application especially as an eLoran and an R-Mode.



Pyo-Woong Son received his B.S. degree in electrical and electronic engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2012, and his Ph.D. in integrated technology at Yonsei University, Incheon, South Korea. He is currently a senior researcher with the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO) and an assistant professor with University of Science and Technology (UST), Daejeon, South Korea. His research interests include complementary positioning, navigation, and timing systems, including eLoran. Dr. Son was a recipient of the Graduate Fellowship from the Information and Communications Technology (ICT) Consilience Creative Program supported by the Ministry of Science and ICT, South Korea.



Kiyeol Seo is currently a principal researcher with the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). He received his Ph.D. degree in maritime information measurement engineering from the Mokpo National Maritime University, Republic of Korea, in 2003. He has been involved in the development of integrated R-Mode navigation system. His research interests include resilient PNT system and integrity monitoring, GNSS reflectometry (GNSS-R), and precise positioning technology for maritime applications.



Tae Hyun Fang received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University, Busan, Korea, in 1994, 1998, and 2003, respectively. From 2004 to 2005, he was a visiting scholar at the Intelligent Transportation Research Center, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United States. Since 2005, he has been with Maritime Safety and Environmental Research Division, Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Daejeon, Korea. His research interests include sensor fusion systems, PNT technology, and target tracking filter.