

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.5.31>
JIIBC 2024-5-5

초고해상 영상 획득을 위한 초광대역 영상레이다 송수신기 설계 및 제작

Design and fabrication of Ultra-Wide-Bandwidth SAR Transceiver to obtain Ultra-High Resolution Image

김동식*, 이주영*, 김현철*, 유경덕*

Dongsik Kim*, Ju-Young Lee*, Hyunchul Kim*, Kyungdeok Yoo*

요약 본 논문에서는 HRWS (High Resolution Wide Swath) 구현을 위한 초광대역 X-대역 SAR송수신기를 설계 및 제작하였다. 제작된 송수신기는 1500MHz 대역폭을 운용할수 있도록 설계되었으며, 이는 67도 입사각에서 약 26cm의 거리해상도 성능을 갖게 된다. 광대역 칩 신호의 편형도와 IRF 성능 개선을 위하여 진폭에 대한 비선형 왜곡에 대한 전치 왜곡을 수행하였으며, PSLR값은 -13.13dB, ISLR 값은 -9.47 dB의 결과를 얻었다. 광대역 수신기의 성능 확인을 위하여 수신기의 입력과 국부신호에 광대역 칩 신호를 인가하여 de-chirp 신호를 확인하였으며, 그 결과 -13.5dB의 PSLR 값을 직접 확인 할 수 있었다. 제작된 초 광대역 SAR 송수신기 기술을 통해 수십 cm 급의 거리 해상도 구현이 가능하며, 광대역 칩 신호의 직접 수신뿐만 아니라 de-chirp을 통한 수신도 가능성을 확인하였다.

Abstract In this paper, we designed and manufactured an ultra-wide band X-band SAR transceiver to implement HRWS. The manufactured transceiver is designed to operate at a bandwidth of 1500MHz, which results in a distance resolution performance of approximately 26cm at 67degrees incidence angle. To improve IRF performance, which is a performance indicator of wideband SAR signals, pre-distortion was performed for nonlinear distortion. Through predistortion, the PSLR value could be improved -13.13dB and -9.47 ISLR. To verify the de-chirp performance, a wide chirp signal was applied to the receiver's input and local signal. As a results, the -13.5dB PSLR value was confirmed through direct mixing of the chirp signal at the receiver. Through the developed ultra-wideband SAR transceiver technology, it is possible to achieve distance resolution of several tens of centimeters, and it is confirmed that not only direct receiving of wideband chirp signal but also de-chirp signal receiving by mixing wide chirp signal.

Key Words : SAR, HRWS, IRF, PSLR

*정회원, LIG넥스원(주), 위성체계연구소
접수일자 2024년 7월 25일, 수정완료 2024년 9월 5일
게재확정일자 2024년 10월 4일

Received: 25 July, 2024 / Revised: 5 September, 2024 /

Accepted: 4 October, 2024

*Corresponding Author: dongsik.kim@lignex1.com

Dept. Satellite System R&D Lab. LIGNex1 Co. Ltd, Korea

I. 서 론

최근 우주개발에 대한 관심과 연구가 활발해 지면서 수없이 많은 위성체들이 우주로 발사되고 있다. 특히, 복잡한 국제 정세로 인해 감시정찰 자산에 대한 수요가 급격히 높아지고 있으며, 날씨와 시간에 상관없이 고해상도 영상에 대한 욕구가 점점 더 커지고 있다. 이러한 요구에 따라 선진국에서는 기존 SAR 기술에서 한 걸음 더 나아가 광대역 고해상도 영상 획득을 위한 HRWS(High Resolution Wide Swath)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. HRWS 기술을 구현하기 위해 우선시 되어야 하는 것은 초광대역 SAR 신호를 운용할 수 있는 송수신기가 필수적이다. 이는 SAR시스템의 거리해상도는 운용 대역폭에 의해 결정되어 지기 때문이다. 이미 독일에서는 HRWS에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 25cm 이하급의 해상도를 얻기 위한 연구가 진행되고 있다.^[1] 또한, X 대역에서 3.6 GHz대역폭의 SAR 신호를 이용하여 지상의 자전거도 구분할 수 있을 정도의 4cm 이내의 초고해상도 영상도 획득하고 있다.^[2]

뉴스페이스 시장이 활성화 됨에 따라 해외 민간 위성 업체등에서는 초소형 SAR 위성개발을 통해 고해상도 영상 획득에 노력하고 있으며, 특히 움브라(UMBRA) 같은 경우에는 최근 16cm 급의 해상도를 갖는 영상을 공개하기도 하였다.^[3]

국내에서는 최근 초소형 SAR 위성 개발에 많은 관심을 가지고 있으며, 고해상도 영상을 얻기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.^[4] 최근 국내에서 서브 미터급 해상도를 획득하기 위하여 1200MHz의 광대역폭의 칩 신호를 이용한 송수신기 연구가 진행되고 있으며, 최근 발사된 초소형 SAR 위성을 통해 획득한 1m SAR 영상을 공개되기도 하였다.^{[5][6]}

디지털 기술이 발전함에 따라 ADC와 DAC가 집적화되어있고, 한번에 광대역 신호를 생성할 수 있는 RFSoc가 개발되었다. 소형 경량화에 이점을 가지고 있는 RFSoc는 저궤도 초소형 위성등에 쉽게 적용될 수 있으며, 광대역 신호를 체배구조가 아닌 직접 합성방식으로 X 대역으로 상향변환이 가능하게 되었다. 광대역 칩신호의 직접 상향변환 방식은 진폭과 위상의 왜곡이 체배방식에 비해 상대적으로 적어 SAR 성능의 지표인 IRF 성능 개선을 위한 이점이 있으며, 최근 국내에서도 광대역 칩신호 분석 및 이를 이용한 송수신기 연구가 활발히 진행되고 있다.^{[7][8]}

본 연구는 서브미터급의 영상해상도를 얻기 위하여 X

대역에서 1500 MHz의 초광대역을 운용할 수 있는 SAR 송수신기를 제작하여 구현 가능성과 성능을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 초광대역 송수신기에 대한 설계와 제작에 대해 제시하였으며, III 장에서는 시험 결과를 기반으로 성능 분석을 수행하였으며, 마지막으로 IV에서는 결론을 맺는다.

II. 초광대역 SAR 송수신기 설계

본 연구에서는 초고해상도 영상 획득을 위하여 X 대역에서 1500MHz의 대역폭을 운용할 수 있는 송수신기를 개발하였다. 개발 목표는 아래 표 1과 같다. 설계된 송수신기는 X 대역에서 1500MHz의 대역폭 운용이 가능하며, 송신기에서 진폭과 위상 에러를 최소화할 수 있도록 직접 변환 방식을 적용하였다.

표 1. 초광대역 SAR 송수신기 개발 목표

Table 1. Ultra wide bandwidth SAR transceiver design requirements

항목	목표	비고
송수신주파수	9.95GHz	
송수신대역폭	1500 MHz	
PSLR	< -13.0 dB	전치왜곡미적용
ISLR	< -9.0 dB	전치왜곡미적용
송신평탄도	< 3.5 dB	전치왜곡미적용
송신불요파레벨	> 50 dBc	
수신채널수	2 채널	H/V 고려

설계된 송수신기는 X 대역에서 1500MHz의 대역폭 운용이 가능하며, 송신기에서 진폭과 위상 에러를 최소화할 수 있도록 직접 변환 방식을 적용하였다. 광대역 칩신호의 품질을 판단하기 위하여 IRF 성능을 정의하였으며, 전치 왜곡 미적용시 PSLR과 ISLR은 이상적인 값 대비 1dB의 오차 내에서 만족하도록 정의하였다. 광대역 칩신호의 -13dB 이하의 PSLR 값과 -9dB 이하의 ISLR 값을 만족하기 위해서 대역내 진폭 왜곡은 3.5dB 이내로 정의하였다. 수신기는 추후 수평, 수직 편파를 고려하여 두 개의 채널로 구성하였다.

실제 위성에서의 지구 곡률을 반영한 입사각의 정의는 그림 1과 같으며, 이를 고려하여 거리 해상도를 분석하면 그림 2와 같다.

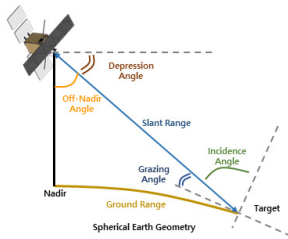


그림 1. 지구 곡률을 고려한 위성 입사각
 Fig. 1. Satellite grazing angle and spherical earth geometry

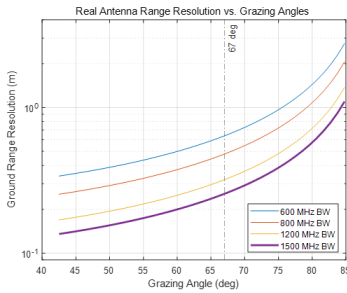


그림 2. 위성 565km 고도에서 대역폭에 따른 거리해상도
 Fig. 2. SAR range resolution versus BW at 565 km altitude

설계된 송수신기는 위성 탑재를 고려하여 565km 고도에서 입사각에 따른 거리 해상도를 분석하였다.

지구 곡률을 반영한 입사각 67도에서 1500MHz 대역폭은 그림 2와 같이 26cm 급의 거리 해상도를 갖게 된다.

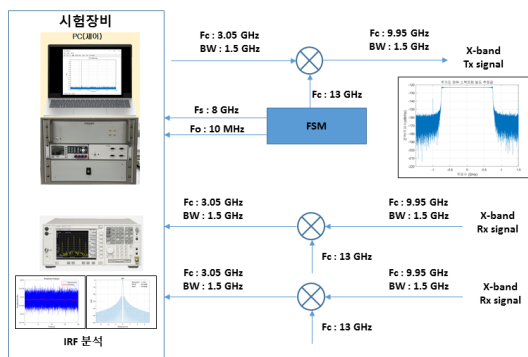


그림 3. 초광대역 SAR 송수신기 구성도
 Fig. 3. Ultra wide bandwidth SAR transceiver configuration

설계된 SAR 송수신기의 구성은 그림 3과 같다. 광대역 칩 신호를 생성하기 위해서 직접 변환 방식과 체배 방식을 주로 사용하고 있다. 최근 RFSoc 기술 발전으로

인해 C 밴드 대역에서 광대역 신호를 직접 생성할 수 있으며, 이를 활용하여 본 연구에서는 직접 변환 방식을 적용하였다. 직접 변환 방식은 파형생성모듈에서 낮은 주파수 대역에서 광대역 칩 신호를 직접 만들어야 하는 어려움이 있으나, 체배 방식에 비해 비선형 소자에 의한 왜곡을 최소화 할 수 있으며, 전지 왜곡 성능을 개선할 수 있는 장점을 가지고 있다.

최근 고성능 ADC 및 신호처리 기술의 발전으로 광대역 신호를 직수신이 가능하여 수신기는 송신기와 동일한 주파수 선정으로 구성을 단순화 하였다. 하나의 모듈내에 2개의 수신기를 설계하여 소형 경량화 하였다. 이 경우, 수신 채널간 간섭 및 격리에 대한 설계 고려가 필요하다.

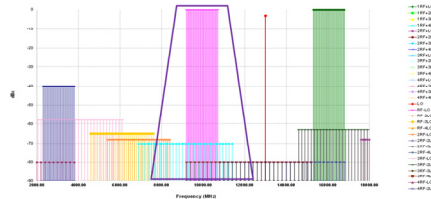


그림 4. 상향변환 상호변조 분석
 Fig. 4. Up converting inter-modulation analysis

상향변환 과정은 상호변조 최소화를 위하여 송신 주파수보다 높은 국부 신호를 혼합하여 X 대역 신호를 생성하게 된다. 이러한 주파수 선정을 통해 고차 하모닉의 상호변조신호가 대역내 존재하지 않게 설계 하였으며, 그림 4과 같이 불요파의 레벨을 -60dBc 이하로 설계 하였다.



그림 5. 초광대역 SAR 송수신기 제작 형상
 Fig. 5. SAR transceiver design results

제작된 초광대역 SAR 송수신기는 그림 5와 같이 4개의 모듈로 구성되며, 송신기, 주파수합성기, 수신기, 전원공급기로 구성된다. 전체 사이즈는 120 x 280 x 152 cm³ ± 1 mm (가로 x 세로 x 높이) 이며, 무게는 7 kg 이하, 소모전력은 35 W 이하이다.

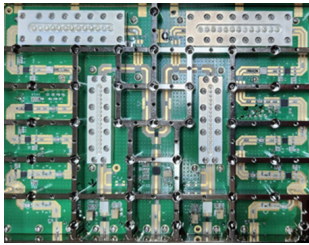


그림 6. 2채널 수신기 제작 형상
Fig. 6. receiver module design result

수신기는 그림 6과 같이 소형 경량화 설계를 위하여 하나의 모듈에 2개의 채널을 설계하였다. 최근 능동위상 배열레이다의 발전으로 인해 다중채널 수신기 개발이 필수적이며, 이로 인해 채널간 진폭 및 위상의 균일성이 중요시 되고 있다. 이를 구현하기 위해 수신채널 경로의 길이 뿐만 아니라 경로 형태도 동일하게 설계하는 것이 중요하다.

III. 시험 결과 및 성능 분석

SAR 송수신기의 성능을 판단하는 중요한 지표는 IRF (Impulse Response Function) 이며, 이는 대역내 진폭과 위상의 왜곡 정도에 의해 결정된다. 기존 연구에 따르면 [5] 광대역 칩 신호의 대역내 진폭 왜곡이 3.5dB 이내이면 PSLR 과 ISLR값이 각각 13dB, 9.0 dB 이내의 값을 보유했을 수 있다. 제작된 송신기는 1.5 GHz 대역폭 내 진폭 왜곡은 3dB 이내로 아주 우수한 성능을 보유하고 있으며, 이에 대한 IRF 성능은 그림 7과 같다.

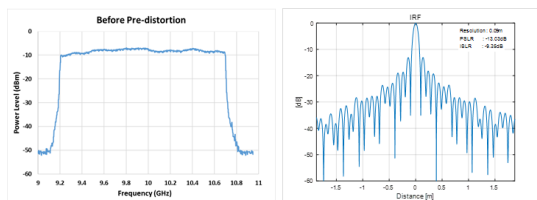


그림 7. 전치 왜곡 전 송신 파형 및 IRF 성능
Fig. 7. Tx waveform and IRF performance before PD

위 그림 7은 전치 왜곡을 수행하지 않은 상태의 송신 파형이다. 위성의 입사각을 고려하지 않은 상태에서 거리 해상도는 약 10cm 이며, PSLR은 -13.03dB, ISLR은 -9.35 dB 이다.

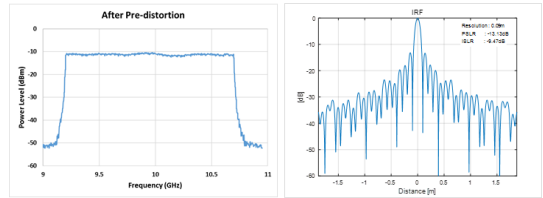


그림 8. 전치 왜곡 적용 후 송신 파형 및 IRF 성능
Fig. 8. Tx waveform and IRF performance after PD

그림 8은 송신 파형에 대해 전치 왜곡을 적용하였으며, 진폭 왜곡을 1dB 이내로 개선하였다. 그 결과 PSLR은 -13.13dB, ISLR은 -9.47dB 로 일부 개선되었으나, 그 정도는 미비한 수준이다. 이는 전치 왜곡전 진폭 왜곡 성능이 1.5GHz 대역내에서 3dB 이내로 우수한 성능을 보유하고 있기 때문이다. 전치 왜곡 전과 후 모두 IRF 값은 이상적인 값에 비해 모두 0.5dB 이내로 우수한 성능을 보이고 있다.

SAR 시스템은 그림 9과 같이 광대역 칩신호를 송신하고, 지상에 의해 반사되어 온 신호를 수신하여 동일한 광대역 칩 신호를 혼합하여 옵션 주파수를 확인하게 된다. 시간 지연 만큼 주파수 차이가 나게 되며, 이를 통해 거리를 확인할 수 있다. 이 과정을 de-chirp 이라고 하며, 출력 신호는 CW-Pulse 형태로 발생하게 되며, Sync 함수의 스펙트럼을 갖게 된다.

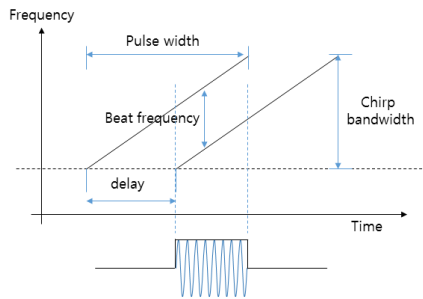


그림 9. SAR 시스템의 de-chirp 과정
Fig. 9. de-chirp process for SAR system

SAR 수신기에서 광대역 칩 신호를 수신하는 방법은 de-chirp 방식과 직접 수신 방식이 주로 적용되고 있다. de-chirp을 적용하게 되면, ADC 및 신호처리 과정에서 데이터양을 상당히 많이 줄일 수 있다는 장점이 있지만, 수신기 하드웨어가 복잡해 지는 단점을 가지고 있다. 반면에 직접 수신기는 하드웨어가 단순하지만 광대역 신호를 처리해야하기 때문에 신호처리 과정에서 많은 부담을 갖게 된다. 하지만 최근 고성능 ADC 및 RFSoc개발로

인해 직접 수신 방식이 많이 적용되고 있다.

본 설계에서는 직접 수신 방식을 고려하여 IF신호로 직접 하향변환하는 구조를 가지고 있다. 하지만, 송신신호를 분기하여 수신입력과 국부신호입력에 광대역 첩 신호를 인가하게 되면 de-chirp 에 대한 IRF 성능을 직접 확인 할 수 있다.

수신입력은 첩 신호의 비트주파수 확인을 위하여 10m 이상의 케이블을 이용하여 지연을 주었다.

사용된 첩신호는 그림10 과 같이 펄스폭은 20usec 이며, 첩 대역폭은 1500MHz 로 첩비율은 75 MHz/usec 이다.



그림 10. 20usec 송신 첩 펄스 파형
 Fig. 10. 20 usec transmitter chirp pulse waveform

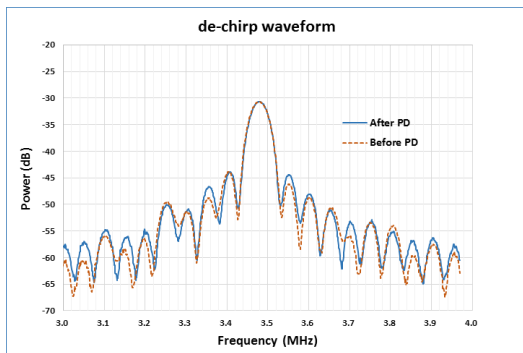


그림 11. SAR 수신기의 de-chirp 성능
 Fig. 11. De-chirp performance of SAR receiver

시험결과 de-chirp 신호의 중심주파수는 두 첩 신호 간의 시간지연에 의해 결정되며, 그림 11과 같이 약 3.45 MHz 이며, 시간 지연은 약 46nsec 이다. 3dB 대역폭은 약 50KHz 이며, 펄스폭 20 usec 에 해당한다. 두 신호의 혼합을 통한 측정된 신호의 PSLR값은 -13.5 dB 이다. 전치 왜곡에 의한 성능 개선 여부를 확인하기 위하여 동일한 과정을 수행하였다.

전치왜곡 적용 신호를 입력하였을 경우, PSLR 값은 유사하나 진폭 왜곡 개선으로 좌우 대칭성이 좋아지는

것을 확인 할 수 있다.

송신기 뿐만 아니라 다채널 수신기 개발 또한 중요한 부분이다. 다채널 수신기 개발을 고려하여 하나의 모듈에 2개의 수신 채널을 제작하였으며, 동일한 모듈을 추가할 경우 수신 채널수를 유연하게 확장할 수 있다. 2개의 수신채널의 출력 스펙트럼은 그림 12, 13과 같다. 다채널 수신기에서는 채널간 진폭과 위상의 균형이 중요하며, 설계된 수신기의 채널간 진폭 편차는 유사한 형태로 3dB 이내의 편차값을 갖도록 설계하였다.

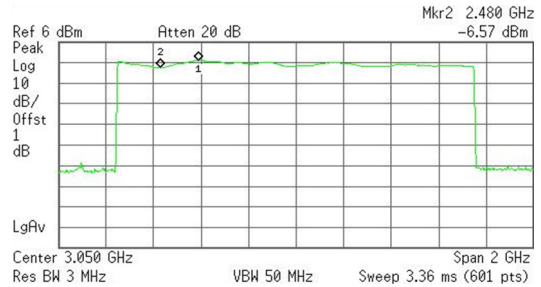


그림 12. 수신 채널 1의 IF 출력 레벨
 Fig. 12. IF out spectrum of the receiver 1

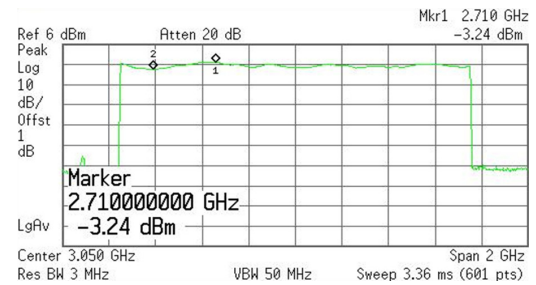


그림 13. 수신 채널 2의 IF 출력 레벨
 Fig. 13. IF out spectrum of the receiver 2

수신채널간의 균형과 오차 최소화를 통해 수신신호의 신호처리시 동일한 기준신호와 de-chirp 적용시 앞서 분석한 결과와 같이 유사한 성능의 IRF 성능을 얻을 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 서브 미터급의 거리 해상도를 확보하기 위한 SAR 송수신기를 설계 및 제작하였다. IRF성능을 확보하기 위하여 송신기의 진폭 왜곡을 1500MHz 대역 내에서 3dB 이내로 설계하여 전치왜곡을 적용하지 않고

도 -13dB 이상의 값을 확보할 수 있었다. 수신기의 de-chirp 성능을 확인하기 위하여 송신신호를 분기하여 수신입력과 국부신호에 입력하여 그 성능을 확인하였으며, 송신 칩 신호의 PSLR 분석과 동일한 -13dB 이상의 값을 확인하였다. 특히, 수신기는 H 채널과 V 채널을 고려하여 수신경로를 동일하게 설계하여 대역내 진폭과 위상 편차를 최소화 할 수 있게 적용하였다. 본 연구를 통해 추후 HRWS SAR 개발에 기여 할 수 있을 것으로 판단되며, 추후 체배 구조에 대한 광대역 침신호 생성 및 그 성능을 분석할 예정이다.

References

- [1] S.Bartusch, A.Quiroz, S.Stettner, A.Moreira, M.Zink, "German X-band spaceborne SAR Heritage and the future HRWS mission", IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp.804-807, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553095>
- [2] A.R. Brenner, "Ultra-high resolution airborne SAR imaging of vegetation and man-made objects based on 40% relative bandwidth in X-band", IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp.7397-7400, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351920>
- [3] Umbra SAR Open Data // URL: <https://registry.opendata.aws/umbra-open-data>.
- [4] H.C. Lee, H.I. Lee, S.Y. Kim, J.B. Sung, "A Fault Tolerance State Transition Design of SAR Payload", Journal of KIIT. Vol. 21, No. 9, pp. 65-74, Sep. 30, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.9.65>
- [5] T.Y. Park, B.G. Chae, H.R. Him, K.R. Koo, S.C. Song, "New Thermal Design Strategy to Achieve an 80-kg-Class Lightweight X-Band Active SAR Small Satellite S-STEP", Aerospace 2021, Vol.8, No.278. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace8100278>
- [6] J.M. Park, D.S. Kim, W.S. Kim, J.P. Kim, "Operation Mode Design and Performance Analysis for Small Satellite SAR Payload", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol 19, No.5, pp.169-173, Oct. 2019. DOI: <http://doi.org/10.7236/jiibc.2019.19.5.169>
- [7] J.Y. Lee, H.C. Kim, J.P. Kim, K.D. Yu, D.S. Kim, "The design and development of Control/Storage and TRX Module for Small Satellite Synthetic Aperture Radar Application", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol 22, No.6, pp.31-36, Oct. 2022. DOI: <http://doi.org/10.7236/jiibc.2022.22.6.31>
- [8] D.S. Kim, J.P. Kim, J.H. Lee, "IRF performance prediction by analyzing of amplitude and phase errors

for the wideband Chirp signal", Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol 44, No.2, pp.131-138. Feb.2016.

DOI: <http://doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.2.131>

저 자 소 개

김 동 식(정회원)



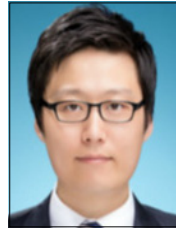
- 2000년 : 광운대학교 전자공학과 (공학사)
- 2003년 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2007년 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 수석 연구원
- 관심분야 : 위성시스템, 영상레이더, 레이더시스템, 주파수합성기

이 주 영(정회원)



- 2005년 : 광운대학교 전자공학과 (공학사)
- 2007년 : 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2007년 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 수석연구원
- 관심분야 : 레이더, 위성

김 현 철(정회원)



- 2011년 : 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터공학과(공학사)
- 2014년 : 고려대학교 전기전자전파 공학과 (공학석사)
- 2014년 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 선임연구원
- 관심분야 : SAR위성, 영상레이더

유 경 덕(정회원)



- 2011년 : 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터공학과(공학사)
- 2014년 : 고려대학교 전기전자전파 공학과 (공학석사)
- 2014년 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 선임연구원
- 관심분야 : SAR위성, 영상레이더