

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.3.9>
JIIBC 2020-3-2

위성 레이다용 QM급 주파수합성기 설계 및 제작

Design and Implementation on Frequency Synthesizer Qualification Model Level for SAR payload

김동식*, 김현철, 허전, 김완식

Dongsik Kim*, Hyunchul Kim, John Heo, Wansik Kim

요약 본 논문에서는 SAR 탑재체에 적용할 수 있는 X-band 주파수합성기 인증모델(QM)을 설계 및 제작하고, 우주환경도의 시험을 통해 그 성능을 검증하였다. 제작된 주파수합성기는 상하향변환에 필요한 13.65GHz의 저잡음 국부신호를 생성하는 역할을 수행하며, 10Hz에서 1MHz까지 측정된 적분 위상잡음은 -37.91 dBc이다. 측정된 위상잡음을 통해 SAR 성능지표인 IRF 성능 영향분석을 수행하였으며, 0.2 ps의 지터로 PSLR과 ISLR에 영향 없이 SAR 시스템에 적용 가능함을 확인하였다. 또한, 열분석, 구조분석을 수행하여 안정성을 확인하였으며, 열진공, 열주기, 진동, 충격 시험을 통해 우주환경 내성을 확인하였다. 제작된 QM급 주파수합성기는 L-band, C-band, Ku-band 주파수를 출력하며, 6U 모듈 2개로 설계를 하였다. 본 연구를 통해 국내 위성용 RF 모듈의 국산화 기술 확보와 SAR 위성용 주파수합성기 기술 개발에 활용이 가능하다.

Abstract In this paper, Qualification Model of frequency synthesizer is designed for X-band SAR system and performed electrical and environment test. Designed frequency synthesizer generate 13.65 GHz with very low phase noise performance. The integrated phase noise from 10Hz to 1MHz is -37.91 dBc. IRF performances are analyzed according to phase noise and jitter. Also, thermal and structure analysis are achieved for stable operation in space environment. Designed frequency synthesizer is consist of 2 modules of 6U size and generate L-band, C-band, Ku-band. The result of this study would enhance the design ability of RF module and help the frequency synthesizer design for SAR payload system.

Key Words : Qualification Model, Frequency synthesizer, SAR

1. 서론

국내 위성개발이 활성화됨에 따라, 위성탑재체의 국내 개발에 대한 관심 또한 높아지고 있다. 최근 천리안 2B호가 발사에 성공하고, 초소형 군집위성과 차세대중형위성과 같은 많은 위성이 개발되고 있지만, 대부분의 구성

품은 아직도 해외 기술에 의존하고 있는 실정이다. 지상 관측을 위해 그동안 개발된 위성들은 대부분 광학탑재체가 주를 이루고 있으나, 최근에는 날씨와 주야에 상관없이 영상데이터를 얻을 수 있는 SAR 탑재체에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[1]. 또한, 탑재체와 중계기 등에 적용할 수 있는 RF 구성품들에 대한 국내 연구가 이

*정회원, LIGNEX1, 위성/SAR개발단
접수일자 2020년 4월 17일, 수정완료 2020년 5월 17일
계재확정일자 2020년 6월 5일

Received: 17 April, 2020 / Revised: 17 May, 2020 /
Accepted: 5 June, 2020
*Corresponding Author: dongsik.kim@lignex1.com
SAR Technology R&D Lab. LIGNEX1

루어지고 있으며, 실용화를 통해 국내 위성의 자립화가 한발 더 가까워지고 있다^[2].

본 연구에서는 X 대역 SAR 시스템을 위한 RF 핵심 구성품인 QM (Qualification Model) 급 주파수합성기에 대한 설계 제작을 수행하고, 환경시험을 통해 우주환경에 적합성을 검증하였다. SAR 시스템은 전자파를 이용하여 지상으로부터 반사파에 대한 정보를 분석함으로써 영상을 획득하는 시스템으로 날씨와 주야에 상관없이 영상을 획득할 수 있다는 장점이 있어, 광학탐재체의 단점을 보완할 수 있다. 하지만, RF신호의 성능에 따라 영상 성능이 좌우되기 때문에 신호의 저잡음 특성이 요구된다. 영상의 성능을 저하시키지 않기 위해서는 고성능 저잡음 주파수 합성기 설계가 필수적이며, 일반적으로 우주급 부품을 적용한 PLL (Phase Locked Loop) 방식이 적용되고 있다. X대역을 사용하는 SAR시스템의 상하향변환의 구성은 아래 그림 1과 같다.

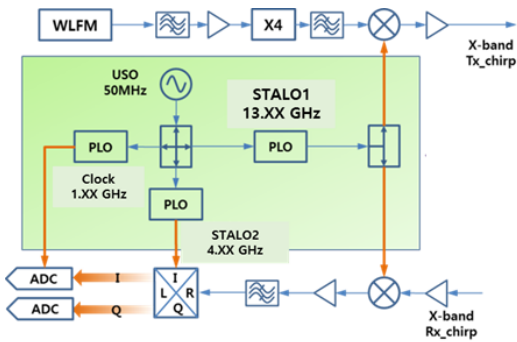


그림 1. SAR 시스템 설계 과정
Fig. 1. SAR system design process

파형발생기에서 생성된 광대역 LFM (Linear Frequency Modulation) 신호는 주파수합성기에서 생성된 국부신호와 혼합하여 X-대역의 송신신호를 생성하게 된다.

개발된 주파수합성기는 3개의 주파수 13.xxGHz, 4.xxGHz, 1.xxGHz 신호를 생성한다. 상하향 변환을 위한 국부신호로 13.xxGHz 의 신호를 사용한다. 수신단에 있어서는 국부신호에 의해 하향 변환된 후, 주파수합성기에서 생성된 4.xxGHz 신호와 혼합하여 I,Q 복조를 수행하게 된다. 1.xxGHz 신호는 Analog Digital Convert의 Clock 으로 사용된다. 하지만, 시스템 적용에 따라 설계된 Ku-대역 주파수, C-대역 주파수나 L-대역 주파수를 국부신호로 사용하는 SAR 시스템에도 적용가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다, 2장에서는 주파수합

성기의 설계 방안에 대해 기술하고, 3장에서는 전기적 시험과 환경시험 결과를 제시하고, SAR 영상성능에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 결론을 맺는다.

II. 주파수합성기 설계 및 제작

X대역 SAR시스템에 적용하기 위해서 주파수합성기는 크게 3개의 주파수 1.xxGHz, 4.xxGHz, 13.xxGHz를 생성하게 된다. 주파수생성을 위하여 PLL기법을 적용하며, 가장 높은 주파수인 13.xxGHz를 직접 생성 가능한 우주급 PLL과 VCO의 부재로 인해 내부에서 생성한 6.xGHz 와 4.xxGHz 그리고, 2.xMHz 주파수를 혼합하여 생성하였다. 주파수합성기의 내부 구성은 그림 2와 같다.

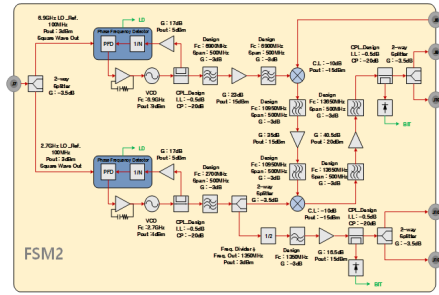


그림 2. 주파수합성기 내부 구성
Fig. 2. Block Diagram of Frequency synthesizer

일반적으로, 하나의 PLL의 위상잡음은 기준주파수와 VCO 그리고, PLL 칩의 잡음레벨을 통해 분석가능하며, 이들 각각의 중첩의 원리를 적용하여 최종 13.xxGHz 의 위상잡음을 분석할 수 있다^[3]. 분석된 13.xxGHz 의 위상잡음 결과는 그림 3과 같다.

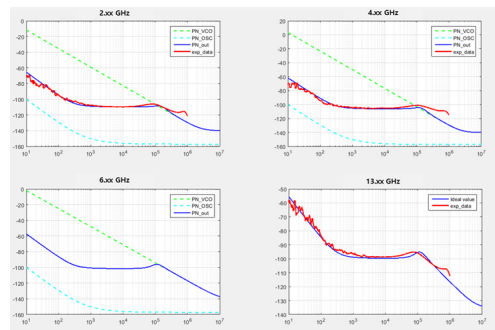


그림 3. 주파수별 위상잡음 가상시험 결과
Fig. 3. phase noise simulation results

분석결과 각 PLL의 위상잡음 분석결과와 시험결과가 일치함을 확인하였으며, 3개의 위상잡음을 더한 값 또한 실제 측정치와 일치함을 확인하였다.

인증모델 개발을 위해서는 우주환경에 대한 방사선 내성을 보유한 부품을 사용해야 하며, 본 연구에서는 100krad 이상의 TID (Total Ionized Dose) 성능을 보유한 RAKON사의 RK408 100MHz OCXO(Oven Controlled Crystal Oscillator)를 기준 주파수로 사용하였으며, PLL칩은 peregrine 사의 PE97640을 적용하였다. 적용된 OCXO와 PLL의 형상은 그림 4와 같다.

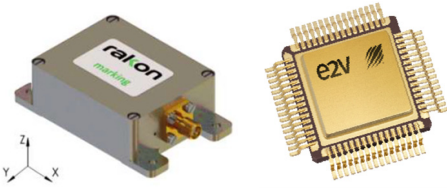


그림 4. RK408 (좌) 와 PE97640 (우) 형상
 Fig. 4. RK 408 OCXO (L) & PE97640 (R) configuration

설계된 주파수합성기는 6U 사이즈의 2개의 모듈로 구성이 되며, 주파수합성기모듈1은 마스터오실레이터를 포함하고 있으며, PLL을 위한 기준 주파수를 생성하는 역할을 수행한다. 주파수합성기모듈2는 PLL과 혼합기를 이용하여 출력주파수를 생성하는 역할을 수행한다. 제작된 주파수합성기의 형상은 그림5와 같다.



그림 5. 주파수합성기모듈 제작 형상
 Fig. 5. frequency synthesizer module design result

제작된 주파수합성기는 기구물의 구조 해석 및 열 해석을 수행하였다. 위성용 부품의 경우 발사진동을 견디기 위하여 구조물이 갖는 고유공진주파수는 100Hz 이상이 되어야 한다. 본 설계에서의 1차 고유주파수는 그림 6과 같이 992.25Hz로 충분한 마진을 가지고 있음을 알 수 있다.

또한, 우주공간상에서는 전도 및 복사에 의한 방열만 존재하기 때문에 제작된 모듈의 발열 분석이 필요하다. 열분석 결과 최대 온도는 86.11도이며, 이는 최대 허용 온도 110도에 비해 24도의 마진을 보유하고 있다.

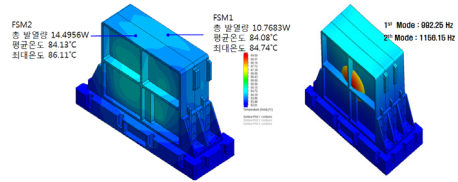


그림 6 주파수합성기 열 구조분석 결과
 Fig. 6. Thermal & Structure analysis of frequency synthesizer

III. 주파수합성기 시험결과

제작된 주파수합성기는 전기적 성능 이외에 우주환경 모의시험을 수행하였으며, 진동, 충격, 열진공, 열주기, EMI시험을 수행하였으며, 시험의 신뢰도를 확보하기 위하여 우주 부품 시험 전문 기관인 우주부품시험센터(진주)에서 수행하였다. 환경시험 순서는 그림 7과 같은 순서로 진행하였으며, 열진공 시험을 위하여 주장비와 케이블에 대한 Bake-out 과정을 사전에 수행하였다.

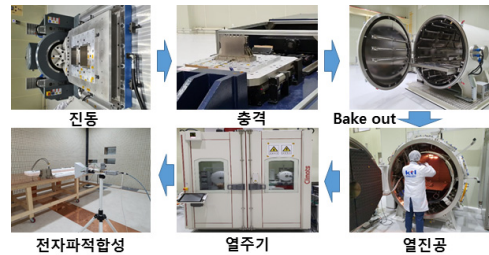


그림 7. 우주환경모의시험 과정
 Fig. 7. Space environment test process

위성용 부품은 발사진동과 충격에 대한 요구사항으로 x,y,z 축 방향으로 각각 sine 파 진동시험과 20 ~ 2000Hz의 랜덤 진동시험이 수행하였다. 진동 시험의 프로파일은 그림 8과 같다.

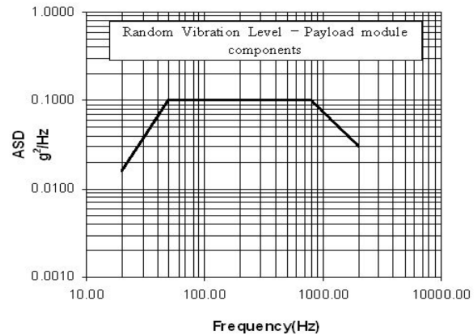


그림 8. 진동시험 프로파일
 Fig. 8. Vibration test profile

열진공 시험은 그림 9와 같이 10^{-5} torr에서 -25 ~ +55 도에서 8주기 시험을 수행하였으며, 매 주기마다 측정을 통해 출력성능에 이상이 없음을 확인하였다.

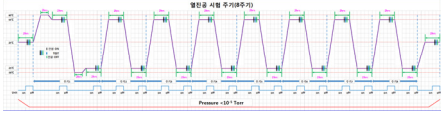


그림 9. 열 진공 프로파일 (8주기)
Fig. 9. Thermal vacuum test profile

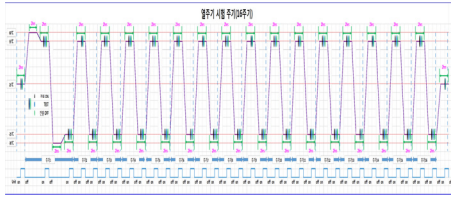


그림 10. 열주기 프로파일 (16주기)
Fig. 10. Thermal cycle profile (16 cycles)

열 주기 시험은 그림 10과 같이 -25 ~+55 에서 16주기 시험을 수행하였으며, 마지막으로 전자파적합성 시험을 수행하였으며, 모든 규격을 만족하였다.

SAR 탑재체용 주파수합성기의 가장 중요한 성능은 불요파레벨과 위상잡음이다. 불요파레벨은 송신 칩신호 대 역내의 스펙트럴 재성장 성분을 증가시키는 영향을 주게 되며, 위상잡음은 위상애러에 의해 PSLR 과 ISLR에 영향을 미치게 된다^{[4][5]}. 본 설계에서는 스펙트럴 재성장 레벨을 최소화 하기 위하여 필터링을 통해 불요파 레벨을 70 dBc 이상으로 억제하였으며, 위상잡음 결과는 지터 성분으로 환산하여 영상성능에 미치는 영향을 분석하였다. 제작된 주파수합성기에서 실질적인 SAR 송신파형에 가장 큰 영향을 주는 주파수는 13.xxGHz 이며, 이에 대한 위상잡음 측정 결과는 그림 11과 같다.

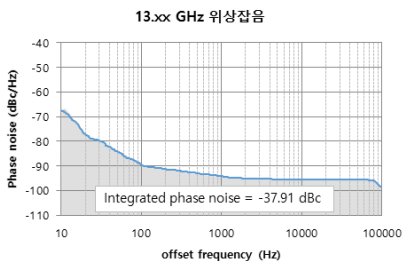


그림 11. 13.xxGHz 위상잡음 측정 결과
Fig. 11. 13.xxGHz phase noise test result

측정된 위상잡음은 10Hz에서 1MHz 까지 적분하여 누적 위상잡음을 확인할 수 있다. 위상잡음값은 식 (1)~(4)를 이용하여 위상변조 애러와 주파수변조 애러를 변환할 수 있으며, 시간축에서의 지터값으로 환산이 가능하다. SAR 시스템의 경우, 지터값은 펄스간의 애러를 발생하게 되며, 이는 Azimuth 방향의 PSLR과 ISLR값에 영향을 주게 된다. 측정된 위상잡음의 누적위상잡음은 -37.91 dBc 이며, 잉여 위상변조는 17.98mrad 잉여주파수변조는 10kHz 그리고, 0.2 psec 의 지터 값을 도출할 수 있다.

$$\text{integrated phase noise} \int L(f)df \quad (1)$$

$$\text{Residual PM} \frac{180^\circ}{\pi} \sqrt{2 \int L(f)df} \quad (2)$$

$$\text{Residual FM} \sqrt{2 \int f^2 L(f)df} \quad (3)$$

$$\text{Jitter} \frac{1}{2\pi f_c} \sqrt{2 \int L(f)df} \quad (4)$$

여기에서, L(f) 는 단측파대 위상잡음이다.

지터값에 따른 PSLR과 ISLR 성능 분석 결과는 그림 12와 같다. 지터값이 커질수록 부엽의 진폭이 커지게 되며, 이는 ISLR 의 증가를 야기하게 된다.

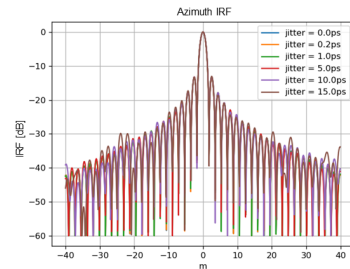


그림 12. 지터에 의한 IRF 성능 영향
Fig. 12. IRF according to Jitter

지터 성분에 의한 IRF영향성은 해상도와 PSLR은 크게 영향이 없으며, ISLR 값에 영향을 주게 됨을 알 수 있다.

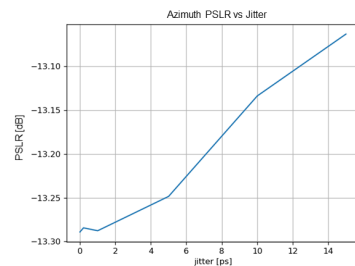


그림 13. 지터에 의한 PSLR 영향 분석
Fig. 13. PSLR analysis by Jitter

지터에 의한 PSLR 영향은 그림 13과 같으며, 이상적인 경우 PSLR 값은 -13.28 dB이며, 지터가 14 psec 까지 높아져도 PSLR 값은 -13.0 dB 이하로 크게 영향이 없다.

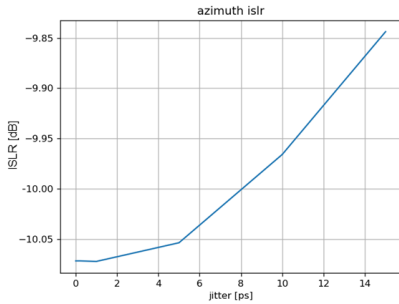


그림 14. 지터에 의한 ISLR 영향 분석
 Fig. 14. ISLR according to Jitter

지터에 의한 ISLR 영향은 그림 14와 같다. 이상적인 경우 ISLR값은 -10.5dB 이며, 지터값이 8 psec까지는 -10dB 로 유지됨을 알 수 있다. 개발된 주파수합성기는 0.2 psec 의 지터값을 가지며, PSLR과 ISLR에 거의 영향이 없는 아주 낮은 위상잡음을 보유하고 있다.

또한, SAR 탑재체는 수십초 이상동안 연속 동작으로 인해 신호의 안정도가 중요하며, 이는 마스터오실레이터에 의해 좌우되며, 전원인가 후 주파수 안정화 이후 매 초당 주파수를 확인하여 표준편차를 통해 주파수 안정도를 확인 할 수 있다. 본 연구에서는 PLL 의 기준신호로 사용되는 50MHz 신호를 측정하여 주파수 안정도를 확인하였다.

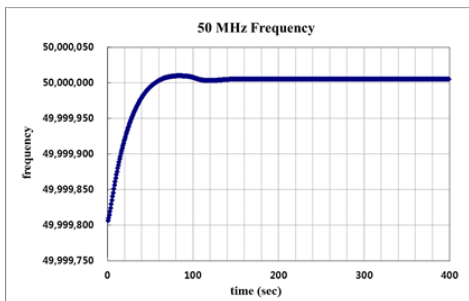


그림 15. 초당 주파수 측정 결과
 Fig. 15. frequency stability test result

주파수 합성기에 전원 인가 후 초당 주파수를 측정 한 결과는 그림 15와 같다. 측정결과 약 180초 이후에 워업이 완료되어 주파수가 안정화 됨을 알 수 있다. 안정화

이후 주파수 편차 분석을 통해 주파수 안정도를 확인 할 수 있으며, 200초에서 400초 사이 주파수 최고치와 최소치의 차이는 0.4 Hz 로, 50MHz 에 대한 규준화 값은 8 ppb 로 매우 안정적인 주파수를 출력하고 있음을 확인하였다.

본 연구에서 수행한 주파수합성기의 요구사항 및 시험 결과는 표1과 같다.

표 1. 주파수합성기 설계 요구사항 및 측정결과
 Table 1. frequency synthesizer design requirements

parameter	Requir.	Meas.	Comp.
frequency	13.xx GHz, 4.xx GHz, 1.xx GHz	13.xx GHz, 4.xx GHz, 1.xx GHz	C
output level (13xx GHz)	+10 dBm +/- 1dB	9.58 dBm	C
phase noise (13.xx GHz)	-90 dBc/Hz @ 10KHz	-95.65 dBc/Hz	C
spurious level	>-60 dBc	> -80 dBc	C
Harmonics@2fo	>-60 dBc	-73.3	C
Stability [ppb]	100 ppb	8 ppb	C
weight	5kg 이하	3.94 kg	C

본 연구는 우주기술개발사업의 일환으로 한국연구재단의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

IV. 결 론

본 논문에서는 위성 SAR 시스템에 적용할 수 있는 QM급 주파수합성기를 설계 제작하였다. SAR 시스템에서 중요한 RF부품이 바로 주파수합성기이며, 영상의 성능을 저하시키지 않는 낮은 위상잡음을 구현하였다.

또한, 우주환경에서의 적합성을 확인하기 위하여 환경시험 및 전자파적합성 시험을 수행하였으며, 시험결과 모든 규격을 만족함을 확인하였다. 본 연구를 통해 국내 SAR 탑재체 개발을 위한 RF모듈 국산화에 도움이 될 것으로 판단되며, L 대역 및 C 대역 그리고, Ku 대역 SAR 시스템 개발에도 응용할 수 있다.

References

[1] 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>

- [2] S.H. Oh, G.J. Seo, D.S. Oh, J.S. Lee, C.W. Oh, "Design and Implementation of Engineering Qualification Model of S-Band Transmitter for STSAT-3", Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol 38, No.1, pp. 80-86, Jan. 2010.
DOI: <http://doi.org/10.5139/JKSAS.2010.38.1.080>
- [3] D.S. Kim, H.S. Lee, J.P. Kim, S.J. Kim, " Design and Modeling of a DDS Driven Offset PLL with DAC", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol 12, No.5, pp.1-9, Oct. 2012.
DOI: <http://doi.org/10.7236/IJWIT.2012.12.5.1>
- [4] S.B. Ryu, J.P. Kim, J.H. Yang, Y.J. Won, S.K. Lee, "Study of RF Impairments in Wideband Chirp Signal Generator", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol 24, No.12, pp.1205~1214 Dec. 2013.
DOI: <http://doi.org/10.5515/KJKIEES.2013.24.12.1205>
- [5] 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>

허 전(정회원)



- 2002년 : 고려대학교 전자공학과 (공학사)
- 2004년 : 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2004년 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 수석연구원
- 주관심분야 : SAR 및 레이더 반도체송수신모듈

김 완 식(정회원)



- 1991년 : 건국대학교 전자공학과 (공학사)
- 1993년 : 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2004년 : 건국대학교 정보통신공학과 (공학박사)
- 1992년 ~ 2001년 : (주)대우전자 선임연구원
- 2001년 ~ 2005년 : 고등기술연구원 책임연구원
- 2005년 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 수석연구원
- 주 관심분야 : 초고주파 회로설계, RF/밀리미터파 시스템, MMIC, 레이더 및 관련 센서 시스템

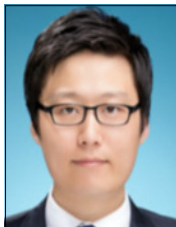
저 자 소 개

김 동 식(정회원)



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

김 현 철(정회원)



- 2011년 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과(공학사)
- 2014년 : 고려대학교 전기전자전파공학과 (공학석사)
- 2014년 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 선임연구원
- 관심분야 : SAR위성, 영상레이더