

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.6.87
JIIBC 2019-6-13

밀리미터파(Ka-밴드) 탐색기를 이용한 라디오미터 성능 측정

Radiometer Performance Measure Using A Millimeterwave(Ka-band) Seeker

홍영곤*, 이만희*, 안세환*, 김영곤*, 김윤진*, 김홍락*

Young-Gon Hong*, Man-Hee Lee*, Se-Hwan Ahn*,
Young-Gon Kim*, Yoon-Jin Kim*, Hong-Rak Kim*

요 약 본 논문에서는 밀리미터파(Ka-밴드) 탐색기를 이용한 라디오미터 설계에 대해서 다룬다. 라디오미터는 TPR(Total Power Radiometer) 방식을 적용하였고, 이를 위해 IF-Drive amp, 대역통과필터(BFP), 검출기(Detector) 및 Op-amp를 구성하였다. 라디오미터는 잡음 수준의 신호를 측정하는 센서로서 시스템의 온도 변화에 따라 측정값이 상이하게 달라질 수 있다. 이를 해결하기 위해 온도보정 회로가 없는 라디오미터 구조에서의 밝기온도 보상 방안을 적용하여 보정을 수행하였다. 설계된 라디오미터를 이용하여 표적, 특히 차량과 지표면을 구분하는 실험을 수행하였고, 일정 이상의 BFF(Beam Fill Factor)를 만족하는 경우 표적과 배경을 구분함을 확인하였다.

Abstract We discuss the design of a radiometer using a millimeterwave(Ka-band) seeker. We applied a total power radiometer, thus the radiometer is composed of a IF-drive amp, band-pass filter, detector and an Op-amp additionally. As a radiometer measure a radiated signal of an object which is noise-like, a radiometer is easily affected by the variance of system temperature. To mitigate an adverse effect, we propose a compensation method in a radiometer without brightness temperature compensation circuits. Through some experiments such like a distinction a target and the background, we have verified that the designed radiometer system has distinguished a car from the ground completely.

Key Words : brightness temperature compensation, Ka-band, mmW seeker, passive sensor, radiometer

1. 서 론

적의 주요 군사시설 또는 바다 위의 함정, 항공모함 등을 표적으로 하는 탄도탄 용 유도무기는 적 방공망 회피와 표적 무력 극대화를 위해 그림 1과 같이 종말 유도 단계에서 높은 지표각(grazing angle)으로 궤적을 그리며

비행하는 형태로 개발되고 있다.

종래의 탐색기 탐재 탄도탄은 단일 센서를 탑재한 RF(Radio Frequency) 또는 IIR(Imaging Infrared) 계열 탐색기가 이용되어 왔다. IIR 계열 센서를 탑재한 탄도탄의 경우 RF 센서에 비해 상대적으로 높은 해상도의 표적 데이터(영상)를 획득 가능하지만, 표적 탐지거리가

*정회원, LIG 넥스원(주)

접수일자: 2019년 10월 1일, 수정완료: 2019년 11월 7일

계재확정일자: 2019년 12월 6일

Received: 1 October, 2019 / Revised: 7 November, 2019 /

Accepted: 6 December, 2019

*Corresponding Author: yg.hong@lignex1.com

Dept. of RF & IIR Seeker R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

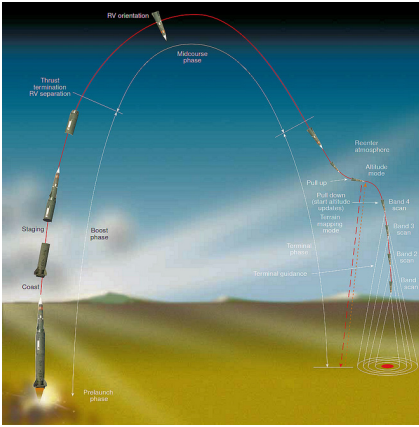


그림 1. 탐색기 탑재 탄도탄의 궤적
Fig. 1. A trajectory of the ballistic missile including a seeker

짧고 약천후 시 운용과 고속으로 기동하는 탄도탄의 공력가열로 인한 표적 획득/추적에 어려움이 있고, 능동 RF 센서를 기반으로 하는 유도탄의 경우는 상대적으로 긴 탐지거리를 만족하고 전천후 운용 가능하지만 종말단계에서 높은 지표각으로 인한 SCR(Signal-to-Clutter Ratio) 열화로 인해 표적 추적에 어려움이 있다.

이런 연유로 복합센서를 탑재하는 탄도탄의 개념이 대두되고 있으며, 그 한가지 예로 상대적으로 긴 탐지거리를 가지는 능동 RF 센서를 초기/중기 추적단계에서 이용하고 SCR 열화를 회피하기 위한 수동 라디오미터를 종말 단계에 이용하는 시스템이 연구되고 있다.

라디오미터는 물체의 고유의 방사 에너지를 측정하는 시스템으로 표적과 배경의 방사 에너지 차이를 구별하여, 종말단계의 능동센서 운용으로 인한 SCR 열화를 회피할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 밀리미터파(Ka-밴드) RF 탐색기를 이용한 라디오미터 수신기를 분석하고 구현하였다. 또한 잡음 수준의 신호를 측정하기에 획득하는 신호가 운용 시간에 따른 주변회로 온도상승에 의한 변화가 큰데 이를 보상하는 방안을 제시하였으며, 최종적으로 설계/구현한 라디오미터를 운용하여 차량 및 선박 표적 획득 성능을 확인하였다.

II. 라디오미터의 원리

일반적으로 수신부만 존재하는 라디오미터의 입력 신호는 안테나 빔이 조사하는 영역에 존재하는 다양한 복

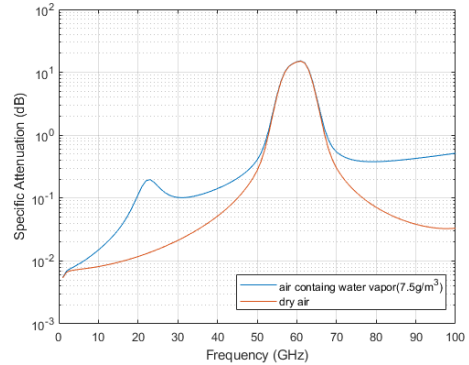


그림 2. 대기 감쇄
Fig. 2. Atmospheric attenuation

사체(표적)들의 복사에너지(P)로서 수식 (1)과 같이 잡음 신호의 형태로 표현된다.

$$P = k T_A B \quad (1)$$

여기서, k 는 Boltzmann 상수, B 는 시스템 대역폭을 의미한다. 이때 안테나에 나타나는 등가 잡음온도는 수식 (2)와 같이 표적의 T_{AP} (apparent brightness temperature)와 안테나 효율(η_I)로 나타난다^{[1][2][3]}.

$$T_A = \eta_I T_{AP} + (1 - \eta_I) T_{A0} \quad (2)$$

여기서, T_{A0} 는 안테나의 물리적 온도이고, T_{AP} 는 수백 m 이내의 영역을 감지하는 라디오미터 시스템에서 식(3)과 같이 근사화 가능하다^[4].

$$T_{AP} \approx \frac{1}{L_a} (T_B + T_{SC}) \quad (3)$$

여기서 L_a 는 대기 감쇄량^[5]으로서 그림 2와 같으며 T_{SC} 는 scattered radiation으로,

$$T_{SC} = \Gamma_i T_{SKY} \quad (4)$$

와 같이 표적의 반사계수인 Γ_i 와 하늘 온도 T_{SKY} 의 곱으로 나타나고, T_B 는 표적의 밝기 온도(brightness temperature)로서,

$$T_B = e T_{T0} \quad (5)$$

와 같이 표적의 방사율(emissivity) e 와 표적의 물리적 온도 T_{T0} 의 곱으로 나타난다.

따라서 수식(1)은 수식 (2), (3), (4), (5)를 이용하여 수식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

표 1. 대표적인 물체의 방사율과 T_{AP}

Table 1. Typical object emissivity and T_{AP}

복사체	e	$T_{AP}(K)$		
		맑음	구름	비
모래	0.9	267.0	277.5	285.5
아스팔트	0.83	250.9	268.75	282.4
콘크리트	0.76	234.8	260.0	279.2
초목	0.93	273.9	281.2	286.9
잔디	0.92	271.6	280.0	286.4
금속	0.1	83	177.5	249.5

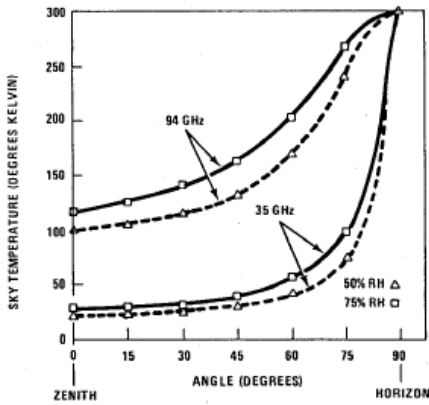


그림 3. 천정각에 따른 T_{SKY}
 Fig. 3. T_{SKY} versus zenith angle

$$P = k(\eta_I \frac{e T_{T0} + \Gamma_i T_{SKY}}{L_a} + (1 - \eta_I) T_{A0}) B \quad (6)$$

Ka-밴드에서 지표각(grazing angle 또는 zenith angle)에 따른 대표적인 지상물체에 대한 방사율과 이로부터 유도된 T_{AP} 는 표 1 및 그림 3^[6]과 같다.

III. 라디오미터 시스템의 구성

기본적으로 라디오미터는 잡음 수준의 신호를 획득하여 측정하는 시스템으로 기존 개발된 능동형 RF 탐색기 수신기를 별도의 수정없이 사용가능 하다. 다만 기저대역 단(Baseband)의 신호 대역 및 처리 방법이 일부 상이하

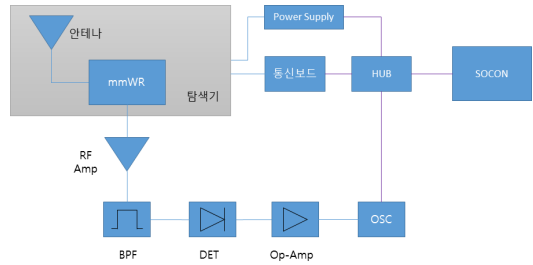


그림 4. Ka-band 탐색기를 이용한 라디오미터 시스템 구성
 Fig. 4. The radiometer system configuration using Ka-band seeker

여 개발된 RF 탐색기 구조에 추가로 외부 회로를 꾸며 환경을 구성하고 오실로스코프(Oscilloscope)를 통하여 신호를 획득하도록 설계하였다^[7].

앞서 2절에서 언급했듯이 모든 물체는 자연방사 에너지를 고유의 양만큼 방출하며 이는 안테나 빔폭에 해당하는 면적만큼 안테나에서 수신한다. 이때 신호는 T_{AP} 에 비례하는 잡음과 같은 신호이고 안테나의 특성 값에 따라 중심주파수 $OO \text{ GHz}$ 로 $\pm OO \text{ MHz}$ 대역폭만큼 의미 있는 신호가 입력된다. 여러 가지 방법이 존재하지만 본 논문에서는 국부발진기(LO, Local Oscillator) 포함한 구조로 1차 주파수 하향 변환(Down Converting)한 신호를 측정하도록 구성하였다. 안테나 ~ 밀리미터파 수신기 경로를 통과한 신호는 IF-drive amp를 통해 Detector가 정상 범위에서 동작하는 범위만큼 증폭되고, DC 영역의 신호를 배제하고 설계된 대역폭에서 신호를 수집하기 위한 대역통과필터(BPF : Band Pass Filter)를 거친다. 대역통과필터를 통과한 신호는 Square-law Detector를 이용하여 해당 대역폭에 입력된 총 잡음 신호를 파워로 변환하고 최종적으로 OP-amp를 거쳐 변환된 파워를 증폭하도록 구성했다. 그림 4는 구성된 시스템 블록도를 나타낸다.

최종 오실로스코프로 입력되는 전압 형태의 신호는 수식 (7)과 같다^[8].

$$V_{osc} = P_I \cdot G_{mmw} \cdot G_{IF} \cdot S_{det} \quad (7)$$

G_{mmw} 는 밀리미터파 수신기의 이득, G_{IF} 는 IF drive-amp의 이득이다. S_{det} 는 square-law detector의 감도이며, P_I 은 안테나로 입력되는 등가 전력으로 수식 (8)과 같다.

$$P_I = k T_{sys} B \quad (8)$$

2절의 수식 (1)과 달리 T_A 는 수신기 잡음지수 및 시

$$T_{sys} = T_A + (NF - 1) T_S \quad (9)$$

시스템의 온도 영향으로 T_{sys} 로 치환되고 이는 라디오미터 수신기(시스템)의 온도가 된다. T_{sys} 는 수식 (9)이며, NF 는 시스템의 잡음지수 T_S 는 시스템의 온도이다.

III. 라디오미터 측정 및 보정

라디오미터는 잡음 수준의 전력을 측정하는 시스템으로 내부 시스템 및 외부 환경 변화에 대한 보정을 수행하여야 좀 더 정확한 결과를 획득할 수 있다.

수식 (7)에서 알수 있듯이 라디오미터 신호는 물체의 고유 방사율 및 이득 구조에서 의해서 결정된다. 하지만 시스템 운용 시간에 따라 시스템 내부 온도가 상승하고 이는 수신기 이득 변화, 잡음지수 악화 및 detector 감도 열화를 야기하게 된다. 이는 같은 대상을 측정하더라도 시간에 따라 다른 수준의 전압값을 출력하게 되고 상대적으로 장시간을 운용한다고 할 때 처음 획득한 결과와 마지막 획득한 결과를 비교할 수 없게 만들 수도 있고 심지어는 방사율이 다른 물체가 있음에도 불구하고 그 차이를 나타내지 못 할 수도 있다.

그림 5는 논문에서 구성한 라디오미터 시스템으로 측정된 결과를 시간순으로 정렬한 결과이다. 측정된 결과에 의하면 동일 대상 배경을 측정/획득하였지만 출력이 시간이 지남에 따라 지속적으로 감소하는 형태를 보였고, 그 레벨 또한 수백 mV 수준으로 실제 배경과 표적을 구별되는 차이만큼 변화가 발생했다.

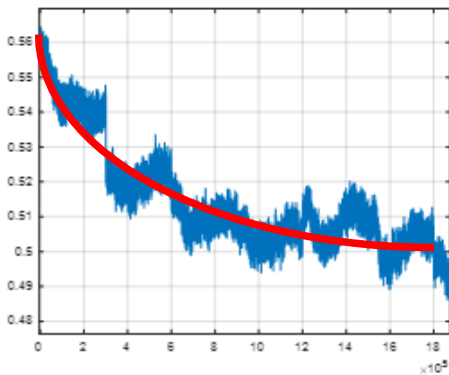


그림 5. 시간에 따라 흐르는 라디오미터 측정값
Fig. 5. The time-variant radiometer outputs

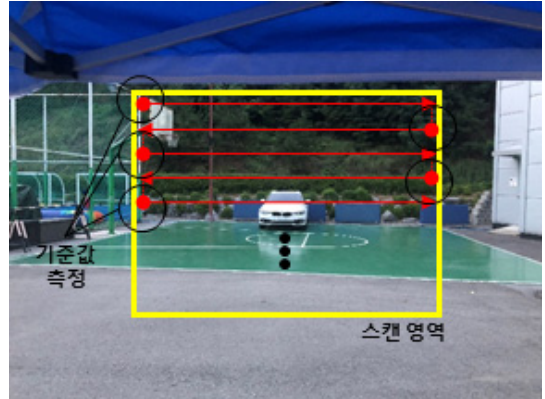


그림 6. 기준값 측정을 포함하는 라디오미터 스캔 방안
Fig. 6. The radiometer measure method with refer

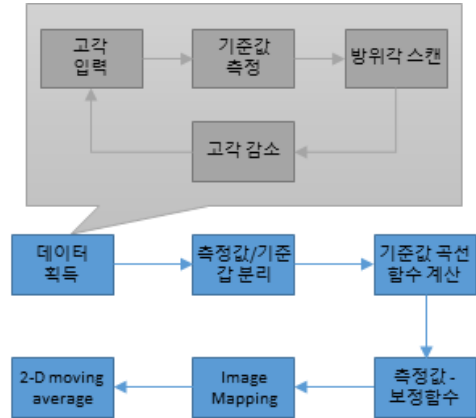


그림 7. 라디오미터 측정 및 보정 절차
Fig. 7. The process of radiometer measure and compensation

이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서 구성한 라디오미터 시스템은 기준으로 삼을 수 있는, 항상 같은 물체(대상)를 측정하고 그 출력 변화를 측정값에 적용하는 방법을 사용하였다. 그림 6과 같이 방위각 1회 스캔 측정 전 기준값으로 사용할 수 있는 소스를 안테나가 지향하도록 설계하였으며, 이를 기준값으로 이용하여 각 방위각 스캔 구간 측정값과 기준값의 함수를 맵핑하여 밝기 온도를 보정하였다.

기준값을 이용한 측정값 보정은 매 방위각 스캔 마다 수행하였고, 운용시간 대비 온도변화를 고려하여 다음 수식 (10)과 같이 2차 다항식(2nd polynomial equation) 곡선 맞춤(curve fitting)을 수행하였다.

여기서 x 는 각 기준값의 시간이며, $p(x)$ 는 기준값의

$$p(x) = p_1x^2 + p_2x^1 + p_3 \quad (10)$$

측정 전압값이다. 이를 이용하여 p_1, p_2, p_3 가 찾고자하는 계수로 2차 함수를 찾는다.

측정과 보정을 포함하는 전체 과정은 그림 7과 같다. 앞서 말한 바와 같이 매 방위각 측정간 기준값 측정 절차를 수행하여 데이터를 획득하고, 획득한 데이터는 측정값과 기준값을 분리하여 유효구간을 구분한다. 이후 기준값을 이용해 2차 다항식 형태의 기준값 곡선을 도출한 뒤, 기준값의 흐름 정도를 측정값에 반영하기 위해 측정값과 차이를 구한다. 영상생성을 위한 방위각/고각 영역에 맵핑을 수행하고 2-D 이동 평균(moving average)를 취하였다. 여기서, 기준값 측정은 Cold Source로 간주할 수 있는 하늘 또는 Hot Source로 분류할 수 있는 지표면을 사용하였다.

IV. 실험 및 결과

본 논문에서 구성한 밀리미터파(Ka-밴드) 탐색기를 이용한 라디오미터가 표적과 배경이 분리됨을 확인하기 위해 그림 8과 같이 실험을 구성하였다. 실험에 사용한 변수 및 환경은 표 2와 같다.

1. 지면과 차량의 정면/측면의 구분

표 1에서 대략적으로 알 수 있듯이 차량(금속)과 지면(아스팔트 또는 숲, 잔디)은 대략 170 K 근처의 T_{AP} 차이를 가지고 이를 기반으로 지면과 차량에 대한 구별(분



그림 8. 실험 장면
 Fig. 8. Test View

표 2. 실험 파라미터

Table 2. Test Parameters

항 목	값	비 고
스캔 방식	raster scan	
기준값	하늘(sky)	cold source
방위각 스캔 영역	$\pm 20^\circ$	scan time = 1.3 초 dwell time = 32.5 ms
고각 스캔 영역	$\pm 15^\circ$	
고각 간격	1°	
스캔속도	30 deg/sec	
표적	승용차 / 배	금속
표적과의 거리	18 / 28 / 780 m	레이저 거리 측정기 사용

리) 실험을 진행하였다.

구성된 시스템으로 측정된 라디오미터 변화량은 오실로스코프에서 차량과 지면에 대해서 약 0.5 V 수준을 나타내었고, 표적과 배경이 구별됨은 물론이고 측면과 정면의 윤곽을 확인할 수 있었다. 차량을 정면과 측면으로 주차하여 측정한 결과는 그림 10과 같다.

2. 지면 위의 두 대의 차량 구분

그림 11과 같이 앞선 실험과 유사한 실험을 진행하여 스캔 영역 안에 승용차와 SUV를 두어 구분이 되는 지 확인하였다. 첫 번째 실험은 주차장 공간 중 중간인 두 번째 열에 표적을 두어 탐색영역 양 끝에 표적이 걸리도록 한 경우이고(이격 거리 약 6m), 두 번째 실험은 주차장 공간 중 마지막 열인 세 번째에 표적을 두고 차량을 더욱 가깝게 붙힌 경우의 실험이다(이격 거리 약 2 m). 실제로 두 실험의 표적 간의 이격 거리가 크지않음에도 결과상 첫 번째 실험과 두 번째 실험의 거리가 차이가 많이 발생하는데 이는 표적과의 상대 거리가 멀어짐에 따라 빔폭이 커지게 되고 실제로 동일 거리가 떨어진 표적들 일지라도 빔폭의 크기에 따른 표적 간의 거리차가 반비례하여 나타남을 확인 할 수 있다.

3. 해면과 선박의 구분

끝으로 바다 위의 선박을 측정하였다. 바다 위의 금속 선박은 매우 큰 배로 정박해 있는 경우가 있지 않아 이동하는 선박을 측정한 결과이며 이동에 따른 밝기 온도 영상을 보정한 결과이다.

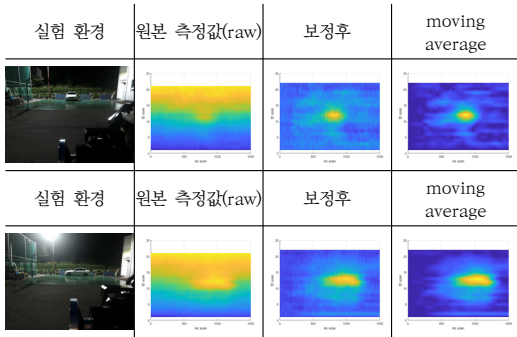


그림 9. 차량 측면 및 정면 측정 결과
Fig. 9. The test result of a front-view and a side-view of a car

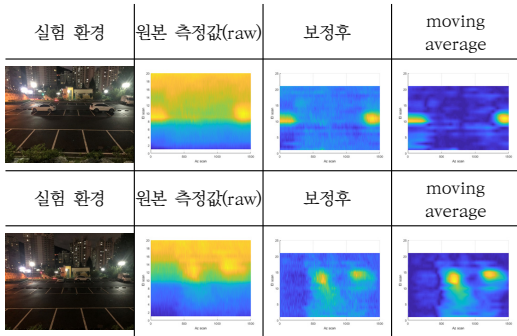


그림 10. 두 대의 차량 측정 결과
Fig. 10. The test result of two cars within the same scan region

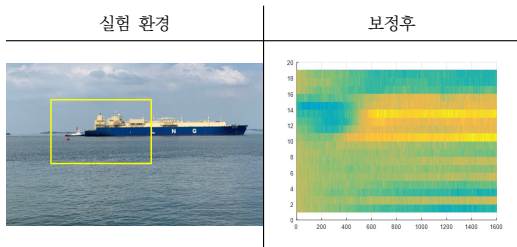


그림 11. 대형 선박(LNG 선) 측정 결과
Fig. 11. The test result of a large ship

V. 결론

본 논문에서는 밀리미터파(Ka-밴드) 탐색기를 이용한 라디오미터 수신기의 구성과 제작을 다루었다. 또한 라디오미터는 잡음수준의 에너지를 측정하는 센서로 시스템 운용 시간에 따른 온도 영향으로 인한 측정값 변화를

확인하였다. 이 문제를 해결하기 위해서 온도 보상 회로가 없는 시스템의 온도보상 방법을 제시하고 그 결과를 그림 9 ~ 그림 11과 같이 실험 및 결과 절에서 확인하였다. 구성된 라디오미터는 지면과 차량의 전압 변화 값이 약 0.5 V 였으며, 측정으로 인한 흐르는 값 약 0.35 V 이 보상되어 표적과 배경을 분리할 수 있음을 확인하였다.

확인한 바와 같이 표적과 배경의 T_{AP} 차이가 있고 이를 구분할 수 있는 라디오미터 수신기를 설계하며 온도 영향을 보정하여 최소화 할 수 있다면, 종말단계에서 라디오미터를 이용하여 능동센서 운용으로 인한 SCR 열화를 회피할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] F. T. Ulaby et. al., Microwave Remote Sensing, vol. 1, Addison-Wesley, 1981.
- [2] Neils Skou, Microwave Radiometer Systems: Design & Analysis, Artech House, 1989.
- [3] G. Evans, C. W. McLeish, RF Radiometer Handbook, Artech House, 1977.
- [4] C. R. Seashore, "Millimeter Wave Guidance Application : An Overview", Proceedings of SPIE: Millimeter Wave Technology II, vol. 423, pp.66-73.
- [5] No-Uk Park, "Radio Propagation Characteristics Analysis for Various Receiving Environments of Satellite Communication on Ka-band", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 13, No. 1, pp. 215-220, Feb. 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/IJIBC.2013.13.1.215>.
- [6] Bartia, Bahl, Millimeter Wave Engineering and Applications, Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [7] Jin-Kyu Choi, "A Development of the High-Performance Signal Processor for the Compact Millimeter Wave Radar", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 17, No. 6, pp. 161-167, Dec. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7236/IJIBC.2017.17.6.161>
- [8] Myung-Suk Jung, "Design of a W-band Radiometer Simultaneously Operating with a Single-Antenna Configured FMCW Radar", The Institute of Electronics Engineers of Korea - Telecommunications 43(4), pp. 67-74, Apr. 2006.

저 자 소 개

홍 영 곤(정회원)



- 2007년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공학과(공학사)
- 2009년 2월 : 부산대학교 전자전기공학과(공학석사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 선임연구원
- 주요관심분야 : 디지털 신호처리, 레이다 신호처리, 마이크로파 탐색기

이 만 희(정회원)



- 2007년 2월 : 충남대학교 전기정보통신공학부(공학사)
- 2009년 2월 : 충남대학교 전파공학과(공학석사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 선임연구원
- 주요관심분야 : 마이크로웨이브 탐색기, 초고주파 회로 및 시스템

안 세 환(정회원)



- 2004년 2월 : 숭실대학교 정보통신공학과(공학사)
- 2006년 2월 : 숭실대학교 정보통신공과(공학석사)
- 2007년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주요관심분야 : 초고주파 회로 설계, 마이크로파 송수신기, 마이크로파 탐색기

김 영 곤(정회원)



- 2006년 2월 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부(공학사)
- 2008년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학석사)
- 2013년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학박사)
- 2013년 2월 ~ 현재: LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주요관심분야 : 초고주파 회로 설계, 초광대역 발룬, 초광대역 소자, 마이크로파 송수신기, 마이크로파 탐색기

김 윤 진(정회원)



- 1997년 2월 : 서울대학교 전기공학부(공학사)
- 1999년 2월 : 서울대학교 전기공학과(공학석사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : LIG 넥스원(주) 수석연구원
- 주요관심분야 : 레이다 시스템, 마이크로파 탐색기

김 흥 락(정회원)



- 1995년 2월 : 대구대학교 전자전기컴퓨터학부(공학사)
- 1997년 8월 : 대구대학교 전자공학과(공학석사)
- 1997년 7월 ~ 현재: LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주요관심분야 : 초고주파 회로 설계, 마이크로파 신호처리기, 마이크로파 송수신기, 마이크로파 탐색기