

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.3.149
JIIBC 2019-3-20

Ka-대역 수동위상배열탐색기용 위상 변위기 개발 및 변위기 위상 오차에 의한 탐색기 성능 분석

Development of phase shifter for Ka-band Passive Phase Array Seeker and Seeker Performance Analysis due to the Phase Error of Phase Shifter

김영완*, 우선걸**, 권준범***, 강연덕****, 박종국*****

Youngwan Kim*, Seon-keol Woo**, Jun-beom Kwon***, Yeon-duk Kang****,
Jongkuk Park*****

요약 본 논문에서는 Ka-대역 수동위상배열탐색기에 적용할 위상 변위기를 설계하고 제작하여 성능을 확인하였다. 수동위상배열안테나에서 배열소자의 위상을 조절하여 전자 빔 조향을 수행하기 위한 핵심 소자인 위상 변위기를 설계하여 Ka-대역 1GHz 대역폭내에서 삽입손실 1.5dB이하 위상 오차 10°(RMS)이내의 성능을 확인하였다. 실제 제작을 통해 확인된 성능은 배열합성 이론에 기초한 빔패턴 분석에 적용하여 추가적인 분석을 수행하였다. 검증된 위상 변위기의 최종 성능이 수동위상배열안테나 빔패턴의 성능 및 지향 오차, 각도 정확도에 미치는 영향성을 분석하여 제안된 위상 변위기 규격의 유효성을 검증하였다.

Abstract In this paper, phase shifter has been designed and manufactured to apply to passive phase array seeker for Ka-band and its performance was confirmed. It was designed as a key element for conducting electric beam steering by adjusting the phase of the array element. Insertion loss of less than 1.5dB and phase accuracy of less than 10°(RMS) in operation bandwidth of 1GHz were checked. The performance identified by the actual fabrication was further analyzed by applying the beam pattern analysis based on the array synthesis theory. The effect of the final performance of the proven phase shifter on the performance and pointing error and angular accuracy of the passive phase array antenna beam pattern was analyzed. Then, the validation of the proposed phase shifter has been made.

Key Words : Passive Phase Array Seeker, Phase Shifter, Ka-band

1. 서 론

수동전자주사식위상배열(PESA:Passive Electrically

Scanned Array)은 하나의 송신기에서 배열소자로 신호가 분기되며, 빔을 전자적으로 조향시키기 위해 각 배열소자 전단에 위상변위기를 배치시킨다.^[1] PESA는 송수

*정회원, LIG 넥스원(주)
접수일자 2019년 5월 7일, 수정완료 2019년 5월 29일
게재확정일자 2019년 6월 7일

Received: 7 May, 2019 / Revised: 29 May, 2019 /
Accepted: 7 June, 2019
Corresponding Author: kyoungwan@lignex1.com
Dept. of RF/Microwave R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

신 경로의 안테나에 연결되는 위상 변위기의 손실로 인해 출력 파워 저하 및 Noise Figure 증가 등의 target 탐지 관점의 성능 열화를 가져 올 수 있다.^[2] 전자 빔 조향을 수행하는 PESA에 적용되는 위상 변위기는 탐지 영역의 효율적인 스캔을 위해 저손실에 짧은 switching time이 요구된다. 이러한 위상 변위기의 대표적인 타입으로는 페라이트 위상 변위기(FPS:Ferrite Phase Shifter), RF MEMS(Micro-ElectroMechanical Systems) 위상 변위기, MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 위상 변위기 등이 있다.^{[3][4]} RF MEMS 위상 변위기에 사용하는 RF MEMS switch 는 아직 국내에서 Ka-대역에서 제작한 경우가 없으며, 전자 빔 조향 시 고려되어야 하는 switching time이 상대적으로 길고, 삽입 손실이 커져 PESA에 적용하기에는 전자 빔 운용상의 한계점을 가지고 있다. MMIC의 경우도 상대적으로 높은 삽입 손실로 인해 탐지거리 관점에서 PESA 적용에 제한적이다. 반면에 FPS의 경우 삽입손실이 상대적으로 낮고 switching time이 짧은 장점이 있다.

본 논문 II장에서는 페라이트를 이용한 이중 모드 가역성(Dual-Mode Reciprocal) 위상변위기를 설계하고 제작하여 성능을 확인하였다. 위상 분해도는 5bit를 적용하여 11.25°의 분해능을 구현하였으며, 1GHz의 대역폭 내에서 삽입 손실 1.5dB 이하, 위상 정확도 10°(RMS)이하의 성능을 확인하였다. 또한 switching time은 50us 이하로 동작함을 확인하였다.

다음 III 장에서는 이렇게 설계 및 제작, 측정을 통해 확인된 위상 변위기 성능을 빔 패턴 특성 및 target 탐지 관점의 성능과 연계하여 분석을 수행하였다. Ka-대역에서 운용할 수 있는 배열구조를 적용하여 빔 패턴, 각도 정확도, 지향 오차 분석을 통해 검증된 위상 변위기의 성능 규격이 PESA 운용에 적절함을 확인하였다.

II. FPS 설계 및 제작/측정 결과

PESA에 적용할 위상 변위기는 전자 빔 조향 및 탐지 관련 성능의 요구사항을 충족하기 위해 낮은 삽입 손실 그리고 짧은 switching time이 요구된다. 또한 Ka-대역의 위상배열에 적용하기 위해 특정 크기 이하의 물리적 제한 사항이 요구된다. 이러한 전기적/물리적 요구사항을 충족시키기 위해 본 논문에서는 표.1의 성능 규격을 기준으로 위상 변위기를 설계하였다.

표 1. 위상변위기 설계 규격

Table 1. Design Objective of phase shifter

Parameter	Design Objective
Type	Dual Mode Reciprocal
Frequency	Ka-Band
Operation Band Width	$F_c \pm 500\text{MHz}$
Average Insertion Loss[dB]	less than 1.5dB
VSWR	less than 1.7:1
Phase Resolution	11.25 °
Phase Accuracy[deg.]	less than 10 ° (RMS)
Diameter	less than 5mm
length	less than 42mm

위상 변위기는 그림 1에서 확인할 수 있는 것처럼 원통형 막대 구조로 설계하였다. 위상 변위기는 변위기 로드, 요크, 코일, 금속 케이스로 구성되어 있으며, 코일 양 끝단의 전위차를 조절하여 위상을 조절할 수 있다. 요크는 코일에서 발생된 자성을 구속시켜 주는 장치로 직경 크기를 고려하여 소형화 설계를 수행하였다.

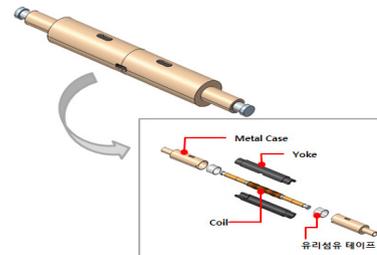


그림 1. 위상 변위기 형상

Fig. 1. Configuration of phase shifter

설계된 위상 변위기 크기는 그림 2와 같이 목표한 크기 내에서 설계를 완료하였다.

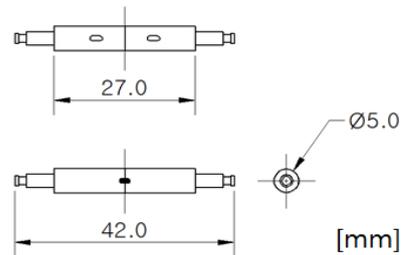


그림 2. 위상 변위기 크기

Fig. 2. Dimension of phase shifter

설계 후 페라이트 정밀가공을 통해 제작된 위상 변위기 실물 사진은 그림 3과 같다.



그림 3. 위상 변위기 제작 사진
 Fig. 3. Fabricated photo of phase shifter

제작된 위상 변위기는 성능 시험을 위해 그림 4의 시뮬레이션 형상으로 검증된 것처럼, 회로망 분석기로 4-port 측정을 통해 삽입 및 반사 손실을 측정하였다. 그림 5와 같이 위상 변위기를 제어하기 위한 제어 모듈 및 변위기 시험 장치를 구성한 후 변위기 시험 장치를 통해 위상 제어 명령값을 전달하고 회로망 분석기에서 S-파라미터를 저장할 수 있는 제어 타이밍을 설정하였다.

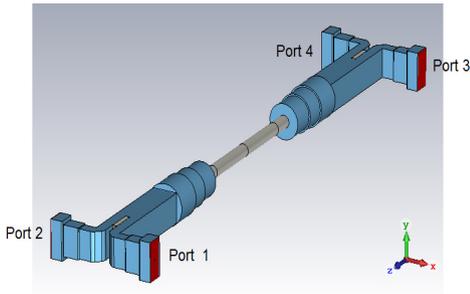


그림 4. 위상 변위기 시뮬레이션 형상
 Fig. 4. Simulation configuration of phase shifter

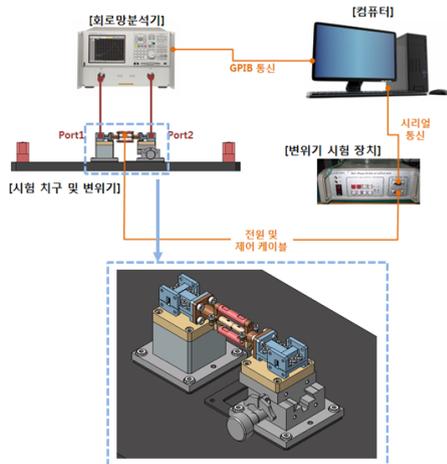


그림 5. 위상 변위기 측정 형상 및 치구
 Fig. 5. Measurement configuration of phase shifter

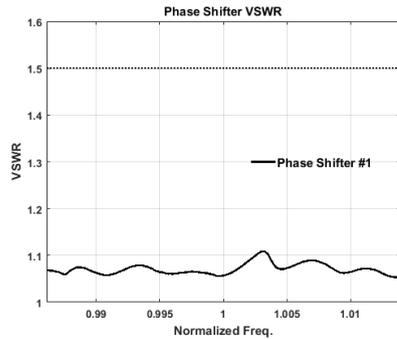


그림 6. 측정 결과 (VSWR)
 Fig. 6. Measurement result (VSWR)

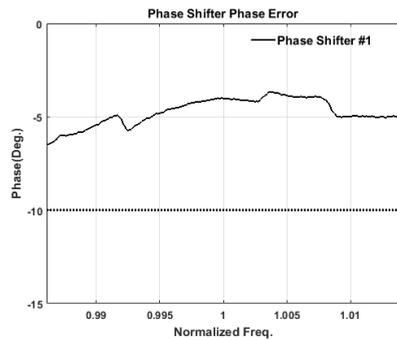


그림 7. 측정 결과 (위상 정확도)
 Fig. 7. Measurement result

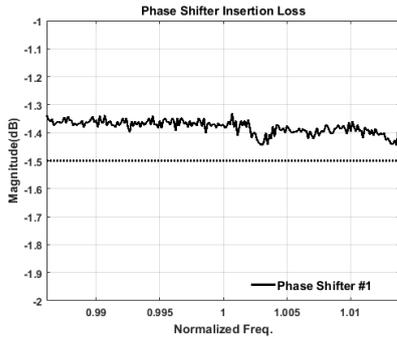


그림 8. 측정 결과 (삽입 손실)
 Fig. 8. Measurement result (Insertion Loss)

4포트 S-파라미터 측정된 결과는 그림 6과 같이 VSWR은 최대 1.1이하의 반사 성능을 확인할 수 있었다. 위상 정확도는 360° 위상 범위를 5bit로 동작 시키기 위해 11.25° 단위로 주파수 대역내에서 총 32번 측정된 결과의 평균값으로 최대 6° 이하의 정확도를 확인할 수 있었다. 위상 명령 32번 동안 측정된 주파수 대역내 삽입 손실의 평균값은 그림 7과 같았으며 전 주파수 대역내에

서 1.5dB이하의 결과를 확인 할 수 있었다. 대역폭 내의 전 주파수, 전 위상 명령 시나리오를 측정하는 동안 위상 변위기의 switching time 은 모두 50us 이하에서 동작함을 확인할 수 있었다.

III. 위상 오차에 의한 PESA 성능 분석

이전 II 절에서 제작된 페라이트 위상 변위기의 측정 결과 모두 목표 성능을 만족함을 확인하였다. PESA의 핵심 구성품인 위상 변위기는 빔 조향 명령에 의해 배열 각 소자의 위상을 조절하게 되지만, 실제 명령값과 다르게 오차가 포함되어 위상이 바뀌게 된다. 실제 측정을 통해 확인 된 위상 오차량을 수학적인 빔 합성 이론에 적용하여 위상 변위기의 위상 오차에 의해 유발되는 안테나 빔 패턴의 열화 특성을 분석할 수 있다. 이를 위한 분석 및 시뮬레이션에 사용된 배열 구조는 표2와 같이 가정하였다. 배열구조는 소자의 수를 최소화하기 위해 그림 9와 같은 원형 구조의 배열 형상을 가정하였다.^{[5][6][7][8][9][10]}

표 2. 수동위상배열안테나 설계 파라미터
Table 2. Design parameter of passive phase array antenna

Parameter	Design Objective
Frequency	Ka-band
Dx/Dy [mm]	6.5/6.5
Nx/Ny	28/28
Weight	Taylor 30dB
Array Grid	Triangular (Y-Shift)

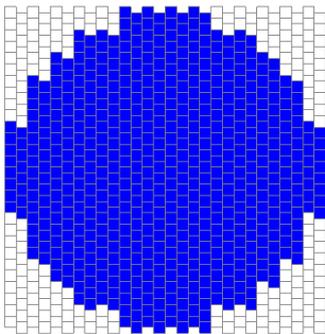


그림 9. 배열 구조
Fig. 9. Array configuration

배열 합성 이론은 기본적으로 그림 10의 형상에서 수식을 유도할 수 있다. 그림 10의 \bar{R} 은 원점에서 임의의

관찰점(θ, Φ)까지의 거리를 나타내며, \bar{r}_N 은 원점 기준 배열 소자의 위치 벡터를 나타낸다. 두 벡터의 경로 차이를 나타내는 \bar{R}_N 은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{R}_N = \bar{R} - \bar{r}_N \quad (1)$$

임의의 관찰점(θ, Φ)이 안테나 원전계 조건($|\bar{R}| \geq \frac{2D^2}{\lambda}$ (D:antenna dimension, λ : wavelength))을 만족하는 충분히 떨어진 거리이며 모든 배열소자의 패턴이 동일하다고 가정하면, N개의 소자로 구성된 2D 배열 구조의 합성된 원거리 패턴 $f(\theta, \Phi)$ 는 식 (2)와 같이 간략화될 수 있다.^{[11][12][13]}

$$f(\theta, \Phi) = P_e(\theta, \Phi) \sum_{n=1}^N W_n \cdot e^{j\bar{k} \cdot \bar{r}_n} \quad (2)$$

W_n : Weight of elements
 \bar{k} : vector wave number
 $P_e(\theta, \Phi)$: element pattern

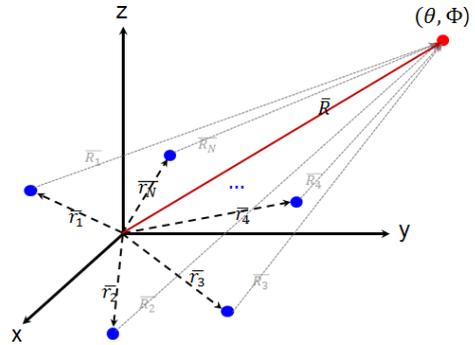


그림 10. 2D 배열 구조 합성 형상
Fig. 10. Synthesis configuration of 2D array structure

식(2)에서 유도한 2차원 배열 구조의 합성패턴에 위상 변위기의 위상 오차량 ϕ_{Error} 을 적용하여 시뮬레이션을 수행하면 최종 오차가 포함된 원거리 패턴 $f_{Error}(\theta, \Phi)$ 는 식 (3)과 같이 정리된다.

$$f_{Error}(\theta, \Phi) = P_e(\theta, \Phi) \sum_{n=1}^N W_n \cdot e^{j\bar{k} \cdot \bar{r}_n} \cdot e^{j\bar{k} \cdot \phi_{Error}} \quad (3)$$

시뮬레이션에서 가정한 ϕ_{Error} 는 위상 변위기의 위상 정확도 규격인 11.25° 가 되도록 랜덤하게 가정하고 반복적인 시뮬레이션을 수행하는 몬테 카를로 시뮬레이션을 수행하였다.^[14] 총 시뮬레이션 횟수는 500회를 수행하였다. 시뮬레이션 결과 2D 패턴상의 부엽레벨(SLL:Side Lobe Level)을 분석한 결과는 그림 11과 같다.

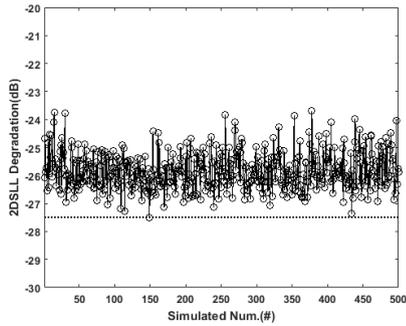


그림 11. 시뮬레이션 결과 (2D 최대 부엽 준위)
 Fig. 11. Simulation result (2D maximum SLL)

아무런 오차가 없는 이상적인 상태의 2D 최대 부엽준위 값은 -27.48dB 였으며, 500회 시뮬레이션한 부엽준위의 평균값은 -25.84dB ($\sigma: 0.67$)로 약 1.64dB 의 열화를 확인하였다.

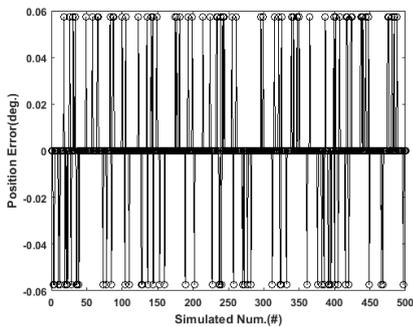


그림 12. 시뮬레이션 결과 (지향 오차)
 Fig. 12. Simulation result (Pointing Error)

그림 12는 빔 지향 오차 결과를 그림 15의 차패턴의 null 위치를 기준으로 계산하였으며, 최대 0.06° 의 지향 오차를 확인할 수 있었다. 총 500회의 시뮬레이션 중 2D 최대 부엽준위가 최대로 열화되는 케이스의 배열소자별 위상 오차량은 그림 13과 같이 최대 오차량은 약 30° 의 오상 오차가 가정되었고, 그 경우의 합, 차 패턴은 그림 14, 15를 통해 열화된 패턴을 확인할 수 있다. 위상 오차

가 없는 상태와 최대 열화된 상태의 빔패턴 비교 결과를 확인하면, 합패턴의 경우 부엽 상승 이외의 큰 열화는 없었으며, 차 패턴의 경우 좌우 위상 밸런스차가 커져, null 위치 및 좌우 최대 봉우리의 차이가 발생하여 모노펄스 기울기에 영향을 미칠 것으로 예측된다.

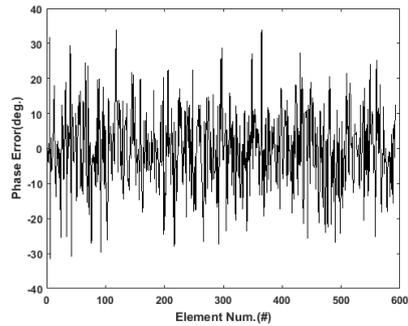


그림 13. 위상변위기 위상 오차 (@최대 열화 경우)
 Fig. 13. Phase shifter phase error (@Worst Case)

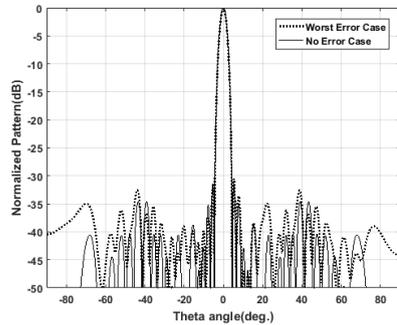


그림 14. 합패턴 비교 (@최대 열화 경우)
 Fig. 14. Sum pattern comparison (@Worst Case)

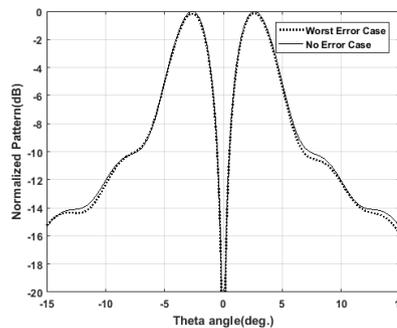


그림 15. 차패턴 비교 (@최대 열화 경우)
 Fig. 15. Del. pattern comparison (@Worst Case)

이러한 차 패턴의 열화를 최종적으로 검증하기 위해 열화된 합,차 패턴을 통해 추출한 모노펄스 기울기를 확인한 그림은 15와 같다. 각도 정확도의 지표인 모노펄스 기울기($Slope_{mono}$)는 식(3)과 같은 수식을 통해 추출할 수 있으며, 이상적인 빔패턴의 경우와 거의 유사한 경향을 확인 할 수 있었다.^[15]

$$Slope_{mono}(\theta) = \text{imag}\left(\frac{Pat_D(\theta)}{Pat_S(\theta)}\right) \quad (3)$$

Pat_D : Complex Del. Pattern

Pat_S : Complex Sum. Pattern

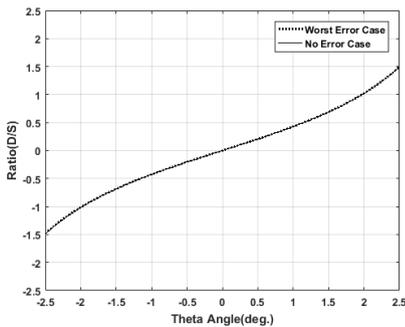


그림 16. 모노펄스 기울기 비교 (@Worst Case)
Fig. 16. Mono-pulse slope comparison
(@Worst Case)

앞서 수행한 몬테 카를로 시뮬레이션을 통해 확인한 빔 성능 및 지향오차, 각도 정확도 모두 PESA 운용에 모두 수용 가능한 위상 변위기의 규격으로 판단할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 Ka-대역 PESA 탐색기에 적용되는 위상 변위기를 설계하고 제작하여 측정결과를 분석하였다. 위상 변위기의 규격을 선정하고 선정된 규격의 PESA 탐색기 운용의 적합성을 판단하기 위해 몬테 카를로 시뮬레이션을 통해 성능 열화를 확인하였다. 본 논문에서 제시한 위상 변위기의 위상 정확도 및 삽입손실 규격은 PESA 탐색기 운용 관점에서 수용 가능한 규격으로 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있었다.

Ka-대역에서 동작하는 페라이트 위상 변위기를 최초로 제작하여 결과를 확인함으로써 추후에 Ka-대역 PESA 구조에 적용 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Skolnik, M. I., Introduction to Radar System, McGraw-Hill., NY,USA,2001
- [2] K. Gyoda, T. Ohira, "Design of electronically steerable passive array radiator (ESPAR) antennas", Antennas and Propagation Society International Symposium, Volume 2, Pages:922-925 vol.2, Feb 2000. DOI: <http://doi.org/10.1109/APS.2000.875370>
- [3] Dong-Woo Kang, Hui Dong Lee, Chung-Hwan Kim, Songcheol Hong, "Ku-band MMIC phase shifter using a parallel resonator with 0.18- μm CMOS technology", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume: 54, Issue :1, Pages : 295-301, 2006.
- [4] Y.K. Oh, J.W. Kim, J.H. Ryu, "A Development of Intelligent Controller for Phase Control in Main Circuit Breaker", The Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.18, no 11, Pages : 755-761, 2017.
- [5] Hyung-Gi Lee, Yong-Uk Park, Hak-Keun Choi, "Design of X-Band Phased Array Antenna Systems for Satellite Communication", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 5, No. 1, pp. 53-61, May 2005.
- [6] Jeong-Jin Kang, Hark-Shin Chang, "Design and manufacture of the Ka-Band Array Antenna for Satellite Communication System", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 6, No. 1, pp. 21-26, March 2006.
- [7] Han-Young Lee, "Design and Fabrication of Satellite Array Antenna for Ku-Band", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers", v. 61, no. 11, pp. 1668-1670, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.11.1668>
- [8] D.Y. Yang, M.S. Lee, "Analysis of DOA Estimation and Adaptive Beam-forming of MIMO between Linear-circular Array Antennas", The Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.12, no 6, Pages : 2777-2784, 9, 2011.
- [9] Y.U. Park, "Design and Fabrication of Array antenna in the WLAN Band", The Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.13, no 2, Pages : 779-783, 9, 2012.
- [10] W.Y. Song, M.H. Lee, J.H. Joo, "Multi-beam Pattern using Beam Steering Algorithms to Adaptive Array Antenna", The Journal of KIIT, Vol.6, No 4, Pages : 60-65, 2008.
- [11] Balanis, C. A., Antenna Theory : Analysis and Design, 3rd Edition, Wiley, 2005.
- [12] Kwan-hyeong Lee, "A Study on the Performance CDMA System Using Adaptive Array Antenna Beamforming Technique", The Journal of Korea Institute of Information Electronics and Communication Technology,

Volume: 5, No 2, Pages : 68-73, June 2012.

- [13] Seung-gag Lim, Daesu Kang, "Performance analysis of DoA estimation algorithm using a circular array antenna", The Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.9, no 2, Pages : 395-400, 9. 2008.
- [14] Shinya Sugiura, Noriyoshi Suzuki, Hideo Lizuka, "Effect of Number of Elements of a Reactively Loaded Ring Antenna Array on the performance of Beamwidth Variation", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Volume: 7, Pages : 669-672, 2008.
- [15] Lamont V. Blake, Radar Range-Performance Analysis, Artech House, Inc., 1986.

저 자 소 개

김 영 원(정회원)



- 2005년 2월 : 광운대학교 전자공학부 (공학사)
- 2007년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임 연구원

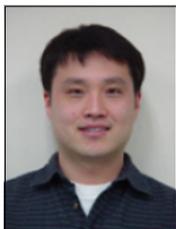
• 주 관심분야 : 위성 배열 안테나 설계, 능동 위성 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계

우 선 결(정회원)



- 2001년 2월 : 광운대학교 전자공학부 (공학사)
- 2003년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2007년 7월 : 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
- 2007년 8월 ~ 현재 : LIG 넥스원(주), 수석연구원
- 주 관심분야 : 레이더 신호처리, 밀리미터파 탐색기

권 준 범(정회원)



- 1997년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과(공학사)
- 1999년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)
- 1999년 2월 ~ 현재 : LIG 넥스원(주), 수석연구원
- 주 관심분야 : 마이크로파 신호처리, 마이크로파 탐색기

강 연 덕(정회원)



- 1993년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학사)
- 1996년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학석사)
- 2000년 8월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학박사)
- 2000년 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원
- 주 관심분야 : 능동 위성 배열 레이더

박 종 국(정회원)



- 1995년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
- 2001년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
- 2001년 8월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원

• 주 관심분야 : 위성 배열 안테나 설계, 능동 위성 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석