

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2019.19.3.141>
IIBC 2019-3-19

Ka-대역 위상배열안테나 배열 구조 분석

Array Configuration Analysis of Ka-Band Phase Array Antenna

김영완*, 권준범**, 강연덕***, 박종국****

Youngwan Kim*, Junbeom Kwon**, Yeonduk Kang***, Jongkuk Park****

요 약 본 논문에서는 Ka-대역 위상배열안테나의 배열소자 개수 및 빔 조향 범위에 따른 빔 패턴 성능 분석을 수행하였다. Ka-대역의 전기적 길이 특성으로 인해 배열구조 설계 시 배열 소자간의 거리가 짧아져 동일한 개구면 적용 시 배열 소자의 개수가 증가하게 된다. 배열 간격을 넓혀서 배열소자의 개수를 줄이면, 빔 패턴의 가시 영역에 주빔과 동일한 크기의 그레이팅 로브가 발생하게 된다. 배열소자의 개수가 최소화되어야 하는 시스템에 적용되어야 할 경우 배열소자의 개수를 72% 줄이며 빔폭 및 부엽준위 등의 성능 열화를 최소화 할 수 있는 최적화 방안에 대하여 분석을 수행하였다.

Abstract In this paper, a beam pattern performance analysis was performed according to number of array elements and spacing of the phase array antenna. The distance between array elements in an array structure design was reduced due to the electrical length of Ka-band, which increases the number of array elements in applying the aperture. If the number of elements reduce by widening the array distance, the grating lobes of the same size as the main beam will occur in visible region. If the number of array elements should be applied to a system where the number of array elements should be minimized, the analysis was performed on a plan to reduce the number of array elements and minimize degradation of performance, such as beam width and side lobe level.

Key Words : Ka-Band Phase Array Antenna, Thinned Array, SLL(Side Lobe Level)

I. 서 론

전자기파를 표적에 방사시켜 그 표적으로부터 반사되는 전자기파를 수신하여 표적과의 거리, 방위각, 고각 정보를 획득하는 장치인 레이더 (RADAR : Radio Detection and Ranging)는 제 1차 세계 대전을 거쳐 위상 배열인 AESA (Active Electronically Scanned Array)방식으로 발전되고 있다.^[1] 레이더에 적용되는 안

테나는 배열안테나 형태로 고이득에 좁은 빔폭을 가지는 빔 형태를 유지하여야 한다. 이러한 위상배열 구조에서 안테나는 주파수에 따른 파장 길이에 따라 배열 구조 및 개수가 정해지게 된다. 레이더에 적용되는 안테나들은 탐지 성능을 충족하기 위해 특정 개구면 크기 이상의 형상을 유지하여야 하며, 이때 배열소자 간격을 최대한 넓게 설계해 배열소자의 개수를 최소화하여 경제적인 측면을 고려할 필요하다. 하지만, 물리적인 배열구조에 따른

*정회원, LIG 넥스원(주)
접수일자 2019년 5월 7일, 수정완료 2019년 5월 27일
게재확정일자 2019년 6월 7일

Received: 7 May, 2019 / Revised: 27 May, 2019 /
Accepted: 7 June, 2019

*Corresponding Author: kyoungwan@lignex1.com
Dept. of RF/Microwave R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

Grating Lobe(GL)의 발생은 이러한 배열구조 설계에 제한적인 요소로 작용한다. 배열소자의 간격을 넓히면, 배열구조의 주기성에 의해 가시영역(Visible Range)내에 주빔과 동일한 크기의 부엽이 발생하여 레이더의 빔 조향 범위가 제한되는 등 레이더 시스템 운용이 불가능하게 된다.^{[2][3]} 특히 능동위상배열레이더의 경우 모든 채널에 고가의 TRM(Transmit Receiver Module)이 장착되므로 물리적인 공간 활용 및 비용 측면에서 배열소자 개수 최소화가 요구된다. 이를 구현하는 방법은 배열소자를 부배열 단위로 배치하여 채널 수를 줄이거나 배열구조의 형상을 최적화 하는 방법 등의 연구가 폭넓게 진행되었다.^{[4][5][6][7][8][9]}

본 논문에서는 Ka-대역에서 배열구조의 형상에 따른 GL특성을 분석한 후, 배열소자의 개수를 최소화하며 빔 조향에 따른 빔폭 및 부엽 준위 등의 빔 패턴 특성의 열화를 최소화 할 수 있는 방안에 대하여 검토하였다. 특정 채널을 무작위로 제거하여 개구면의 크기는 유지한 채 전체 배열소자의 개수는 줄이면서도 빔 특성의 열화는 최소화되도록 배열소자 위치를 최적화하는 방식이다. 이와 같은 Thinned Array(TA) 방식은 요구되는 빔 특성 사양을 만족시키면서 TRM의 개수를 최소화하여 비용적인 부분과 인터페이스 복잡도를 감소시킬 수 있다. 이를 위해 1024개의 배열소자를 갖는 Ka-대역 배열안테나 구조에 대해 GL 분석을 수행한 후 TA 방식을 적용하여 일부 채널을 제거함으로써 TRM의 개수를 최소화하고 동시에 요구되는 빔 패턴 특성을 만족하는 배열 구조 모델링을 수행하였다. 빔폭 및 부엽 준위 관점의 성능 분석을 통해 최적화된 TA 구조의 유효성을 검증하였다.

II. Ka-대역 배열구조 분석

Ka-대역에서 운용할 수 있는 배열 구조는 주파수에 따른 파장 길이를 고려하여 배열 간격이 결정된다. 개구

표 1. 위상배열안테나 구조
Table 1. Configuration of phase array antenna

Parameter	Design Objective
Frequency	Ka-Band
Dx/Dy (mm/mm)	4.4 / 5.2
Nx/Ny	40 / 32
Number of Elements	1024
Weight	Uniform
Steering Range	±55°

면 내에 배열 소자의 간격이 늘어나면, 배열소자의 개수는 줄어들지만 빔 조향에 따른 GL가 발생하게 된다. 이는 표1에서 설계된 위상배열안테나 구조를 적용하여 확인하였다.

분석은 Ka-대역에서 직경 200mm 내의 개구면에 빔 조향 특성을 고려하여 총 1024개의 배열소자를 가로, 세로 각각 40개, 32개로 구성하였다. 구성된 배열 구조는 그림 1과 같다. 배열소자의 급전계수는 모두 동일한 Uniform 분포를 가정하였다. 그림 1의 구조는 형상적으로 저부엽이 구현될 수 있도록 원형에 가까운 물리적 구조를 적용하고 대각선 부분의 배열소자를 제거하여 소자 개수를 최소화하였다. 그림 1의 배열 구조에 의한 빔 패턴의 GL 특성은 그림 2를 통해 확인하였다.

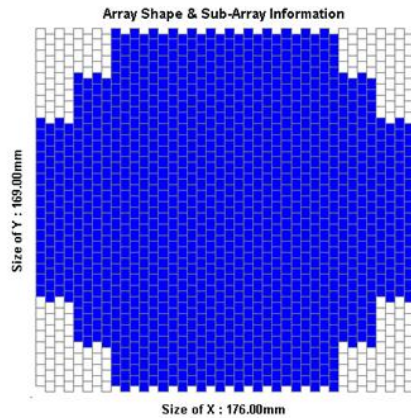


그림 1. 위상배열안테나 구조
Fig. 1. Configuration of phase array antenna

배열소자의 간격(d)은 운용 대역 내의 최소 파장 및 최대 빔 조향 범위와 연관되어 식 (1)로 표현될 수 있다.^[10]

$$d \leq \frac{\lambda_{min}}{2(1 + \sin\theta_{max})} \quad (1)$$

λ_{min} : Min. wavelength in bandwidth

$\sin\theta_{max}$: Max. beam steering angle

식 (1)에서 보는 것처럼 GL은 배열 소자간의 간격 및 빔 조향에 따라 발생한다. 이는 배열 구조에 따라 결정되는 현상으로 일반적인 배열 구조에서는 이러한 GL을 피하기 위해 배열간격 및 조향 범위가 정해지게 된다. 표1에서 정의된 배열구조의 GL 특성은 그림 2를 통해 확인할 수 있다.

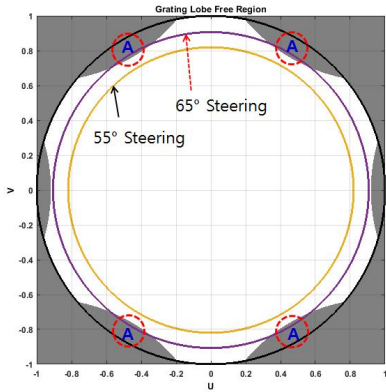


그림 2. 그레이팅 로브 자유 영역
 Fig. 2. Grating-Lobe free region

그림 2의 음영 구역은 표 1의 배열구조에서 GL 발생 구역을 나타내고 있다. 또한 빔 조향에 따른 GL 특성은 55°, 65° 특성 곡선을 확인할 수 있다. 이때 빔 조향 각도가 55°에서 65°로 증가하면 GL 발생 음영 구역과 교차되어 GL가 발생하게 된다. 이러한 배열 합성 이론은 기본적으로 그림 3의 형상으로부터 수식을 유도할 수 있다. 그림 3의 \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 (2)과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{R}_N = \bar{R} - \bar{r}_N \quad (2)$$

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 (3)와 같이 간략화 될 수 있다.^{[11][12][13]}

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

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

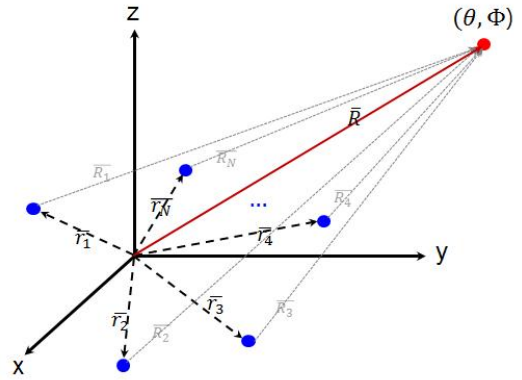


그림 3. 2D 배열 구조 합성 형상
 Fig. 3. Synthesis configuration of 2D array structure

식 (3)에 조향에 따른 위상 변위량을 추가하여 조향된 빔패턴 $f_{steer}(\theta, \Phi)$ 을 얻을 수 있다.

$$f_{steer}(\theta, \Phi) = P_e(\theta, \Phi) \sum_{n=1}^N W_n \cdot e^{j\bar{k} \cdot \bar{r}_n} \cdot e^{-j\bar{k} \cdot \Delta\Psi_{steer}} \quad (4)$$

$\Delta\Psi_{steer}$: Phase Variation due to the beam steering

식 (4)에 빔 조향 55°를 적용하면 2D 빔패턴은 그림 4와 같다.

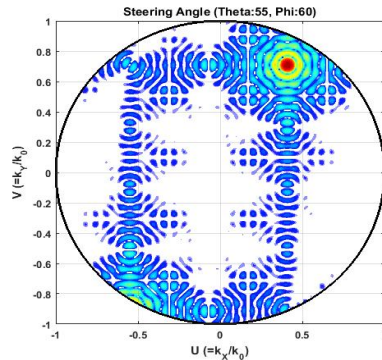


그림 4. 2D 합성 빔 패턴 (@ 55°)
 Fig. 4. 2D Synthesized beam pattern (@ 55°)

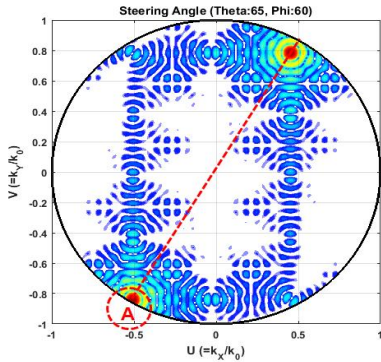


그림 5. 2D 합성 빔 패턴 (@ 65°)
Fig. 5. 2D Synthesized beam pattern (@ 65°)

다음으로 빔 조향 65°를 적용한 패턴은 그림 5와 같으며, 조향각이 증가하면서 주빔의 180° 반대 방향에서 신호 크기가 증가함을 “A” 부근에서 확인 할 수 있다. 이는 조향에 따른 GL 발생에 따른 것이다. 그림 5의 “A” 영역은 합성된 2D빔 패턴상에서 확인 할 수 있다. 원통형 좌표계 기준 ϕ 각도 60°에서 Cut 데이터는 그림 6과 같다.

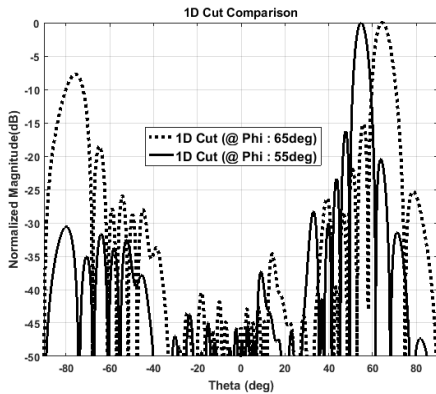


그림 6. 1D-Cut 빔 패턴 비교 (@ 55°,65°)
Fig. 6. 1D-Cut beam pattern comparison(@ 55°,65°)

그림 6을 보면 조향각이 10°도 증가하면서 GL이 급격히 증가하여 거의 주빔 레벨에 근접하게 됨을 알 수 있다.

III. 배열소자 최소화 방안

본 절에서는 위상배열안테나의 빔 조향 범위 및 배열소자 간격을 유지한 채 빔폭 및 부엽 준위 수준의 성능을

유지하면서 배열소자 개수를 최소화하는 방안에 대하여 검토하였다. GL를 회피하고 동시에 배열 소자를 최소화할 수 있는 배열 구조 최적화를 하기 위한 방안으로 임의의 배열소자를 제거하는 Thinned Array 방식을 검토하여 결과를 확인하였다. 개수를 제한하여 최적화된 배열 구조를 찾기 위해 1,2 계 도함수가 요구되는 고전적 최적화 방법과 달리, 연속이며 미분 가능한 목적함수 구성이 요구되지 않고, 연산시간이 짧은 패턴 서치 알고리즘을 사용하였다. 최적화는 2D 최대 부엽레벨 관점에서 빔 조향 시 부엽억제 최적화를 수행하였다. 조향 시 GL를 피하기 위해 u,v 가시영역을 확장하여 최적화를 수행하였으며 최적화 파라미터는 표 2와 같다.

표 2. 최적화 파라미터
Table 2. Optimization parameter

Parameter	Design Objective
Frequency	Ka-Band
Dx/Dy (mm/mm)	4.4 / 5.2
Nx/Ny	40 / 32
Number of Elements	288
U/V limit	1.3
Steering Range	$\pm 55^\circ$

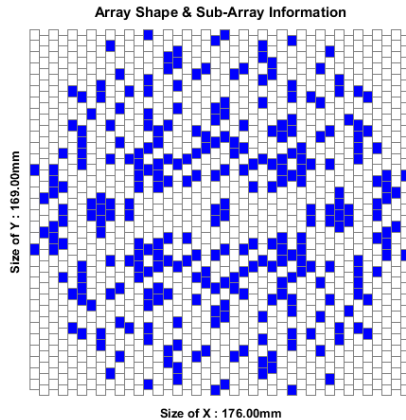


그림 7. 최적화 배열 구조
Fig. 7. Optimized array configuration

최적화 알고리즘을 통해 검증된 배열 구조는 그림 7과 같다. 288개의 배열 소자를 제외하고는 모두 제거된 상태로 약 72%를 제거하였다. 그림 7 구조의 55° 조향된 빔 패턴은 그림 8,9과 같다.

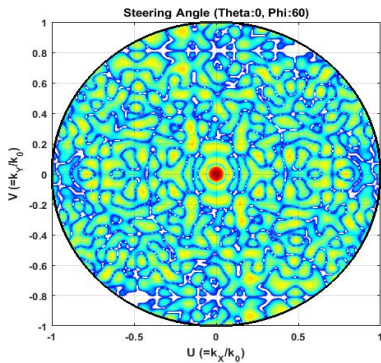


그림 8. 최적화된 2D 합성 빔 패턴 (@ 0°)
 Fig. 8. Optimized 2D synthesized beam pattern (@ 0°)

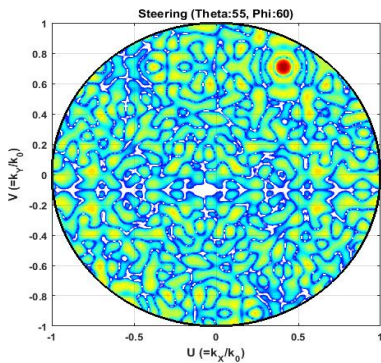


그림 9. 최적화된 2D 합성 빔 패턴 (@ 55°)
 Fig. 9. Optimized 2D synthesized beam pattern (@ 55°)

그림 8은 빔을 조향하지 않은 상태 결과이며 그림 9는 55° 조향한 상태에서의 2D 빔패턴 결과이다. 배열소자를 288개까지 줄였음에도 GL은 발생하지 않았으며, 빔폭 및 부엽 관점 결과는 그림 10,11을 통해서 확인할 수 있다. 배열소자의 개수가 줄어들면서 평균적으로 배열소자간의 간격은 늘어났지만, 배열 구조의 불규칙성으로 특정 방향에서 배열구조의 주기성에 의해 발생하는 GL을 억제할 수 있었다.

그림 10의 결과 조향하지 않은 상태의 방위각 패턴 결과 최대 부엽준위는 오히려 다소 감소함을 확인하였다. 다만 배열소자가 72% 가까이 감소하며 에너지가 2D 영역으로 흩어지는 경향이 있어 평균 부엽준위는 다소 상승함을 확인하였다. 또한 주빔의 빔폭 또한 채널감소대비 증가하지 않아 분해능 관점의 성능 열화도 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 11은 55° 조향한 상태의 Cut 결과이다. 이 때 GL레벨은 1024개 급의 배열구조와

비교해 다소 낮은 레벨을 확인할 수 있었으며, 최대 SLL 또한 다소 낮아진 결과를 확인하였다. 마찬가지로 빔폭도 채널 감소 대비 거의 변하지 않았다. 이렇게 배열소자의 개수를 72% 가까이 줄이며 GL을 포함한 부엽 준위 그리고 빔폭이 거의 유지됨을 확인하였다.

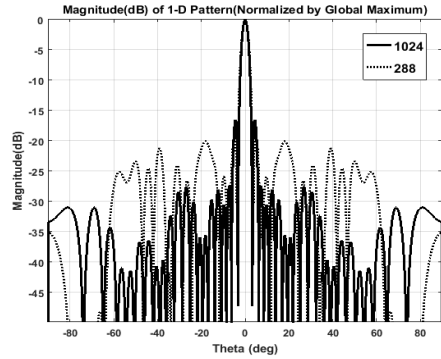


그림 10. 최적화된 1D 합성 빔 패턴 (@ 0°)
 Fig. 10. Optimized 1D synthesized beam pattern (@ 0°)

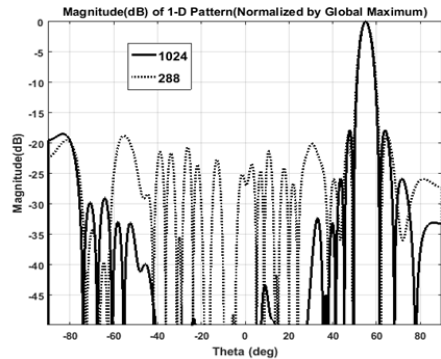


그림 11. 최적화된 1D 합성 빔 패턴 (@ 55°)
 Fig. 11. Optimized 1D synthesized beam pattern (@ 55°)

V. 결론

본 논문에서는 Ka-대역 위상배열안테나의 배열 구조 분석을 수행하였다. 주파수에 따른 배열 특성에 따라 발생하는 GL 특성을 확인하고, 배열 간격을 유지하며 배열소자 개수를 줄일 수 Thinned Array 방식의 최적화를 수행하였다.

1024개급 위상배열안테나 구조의 Thinned Array 방식 최적화를 통해 288개급의 약 72% 감소된 위상배열안테나 구조로 최적화한 후 조향 특성 및 부엽 특성을 확

인하였다. 배열소자의 개수가 현저히 줄었지만, 부엽 특성 및 빔폭 그리고 조향 특성 등에서 거의 유사한 특성을 확인함으로써 최적화 방안의 유효성을 검증하였다. 이로 인해 시스템의 비용 및 물리적인 인터페이스 측면의 효용성을 증가시킬 수 있는 가능성을 확인하였다. 향후 능동위상배열안테나의 비용 및 공간 특성을 고려한 최적화 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] Skolnik, M. I., Introduction to Radar System, McGraw-Hill, NY, USA, 2001

[2] Balanis, C. A., Antenna Theory : Analysis and Design, 3rd Edition, Wiley, 2005.

[3] 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.

[4] R.L. Haupt, "Interleaved thinned linear arrays", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume: 53, Issue:9, Pages: 2858-2864, 2005.

[5] Aidin Razavi, Keyvan Forooraghi, "Thinned arrays using pattern search algorithms", Article in Progress In Electromagnetics Research, 78:61-71, Jan 2008.

[6] J.B.L. Rao, T.C. Cheston, J.Y. Choe, M.G. Parent, P.K. Hughes, "Phased arrays with sub-array architecture", Proceedings 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology, Pages: 453-456, 2000.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] K. W. Lee, J.Y. Moon, S.W. Yun, "Design and fabrication of active transmit and receiver module in K-band", Journal of the Korea Electromagnetic Engineering Society, Pages: 940-945, Aug 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.

저 자 소 개

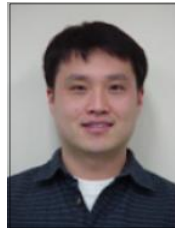
김 영 완 (정회원)



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

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

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 위상 배열 레이더

박 중 국(정회원)



- 1995년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 (공학석사)
- 2001년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 (공학박사)
- 2001년 8월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석 연구원

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