

능동위상배열 레이더 부배열 수신기 설계

이희민^{1*} · 김도훈² · 한일탁³

Design of Sub-array Receiver for Active Phase Array Radar

Hui-min Yi^{1*} · Do-hoon Kim² · Il-tak Han³

^{1*}Chief Engineer, Radar-PGM R&D Division, Hanwha Systems, Yongin 17121, Korea

²Senior Engineer, Radar-PGM R&D Division, Hanwha Systems, Yongin 17121, Korea

³Senior Researcher, Agency for Defense Development, DaeJeon 34186, Korea

요 약

최신의 레이더는 동시에 다양한 다수의 표적을 탐색하고, 추적하며, 외부 재밍신호를 회피할 수 있는 다기능레이더 형태로 발전하고 있다. 이러한 다기능레이더 요구사항을 만족시키기 위해서 레이더 안테나는 실시간 빔조향 뿐만 아니라 동시에 다중 빔을 형성하고, 특정 방향에 대해 수신빔 제거 등 디지털 빔 형성이 가능한 능동위상배열 안테나 형태로 구현된다. 본 논문에서는 디지털 빔 형성이 가능한 부배열 타입 배열안테나의 하드웨어 구현방안에 대해 기술하였다. 또한 배열수신빔 형성시 부엽 준위를 낮추기 위한 안테나 개구면 진폭 가중치 적용방법에 따른 부배열 수신기 설계 방법을 제시하고, 진폭 가중치 적용방법에 따른 G/T 성능을 비교하였다. 또한 설계된 부배열 마다 부배열 수신기 동적 영역에 대해 분석하고, 디지털 빔형성기의 정렬 및 보정에 더 유리한 하드웨어 구현 방안을 제시하였다.

ABSTRACT

Modern Radars are evolving into MFRs which can search multiple targets simultaneously and then track them. Additionally they should be able to avoid some external jamming signals. Applying to these MFRs, Antennas should be able to perform DBF including to not only real-time beam steering but also multi-beam forming simultaneously. And they can cancel the beam at the specific direction. In this paper, we describe the implementation of sub-array type antenna hardware which can be applying DBF. Also we propose the modified amplitude aperture distribution for suppressing the side lobe level and explain the sub-array receiver design with amplitude tapering. It consists in making the amplitude weighting in 2 steps. In order to compare two weighting cases, we investigate the G/T performance for the array antenna. At the conclusion, we make a comparative study for the dynamic range of every sub-array receiver and present the hardware implementation that is more advantageous for sub-array alignment and calibration in DBF.

키워드: 다기능레이더, 능동위상배열안테나, 부배열 수신기, 디지털빔형성, ADC

Keywords: MFR(Multi-Function Radar), Active Phase Array antenna, Sub-array receiver, DBF(Digital Beam Forming), ADC(Analog to Digital Converter)

Received 22 February 2019, Revised 5 March 2019, Accepted 22 April 2019

* Corresponding Author Hui-Min Yi(E-mail:huimin.yi@hanwha.com, Tel:+82-31-8020-7547)
Chief Engineer, Radar-PGM R&D Division, Hanwha Systems, Yongin 17121, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2019.23.5.568>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

최근의 레이더는 동시에 다양한 다수의 표적을 탐색 및 추적할 수 있는 다기능 레이더 형태로 개발되고 있다 [1-3]. 이러한 다기능 레이더에 필요한 기능을 수행하기 위해 안테나는 실시간 빔조향 뿐만 아니라 동시에 다중 빔을 형성하고, 특정 방향에 대해 수신빔 제거 등 디지털 빔 형성이 가능한 능동위상배열 안테나 형태로 구현한다.

그림 1은 능동위상배열 안테나를 적용한 레이더의 수신 경로 블록도를 나타낸다.

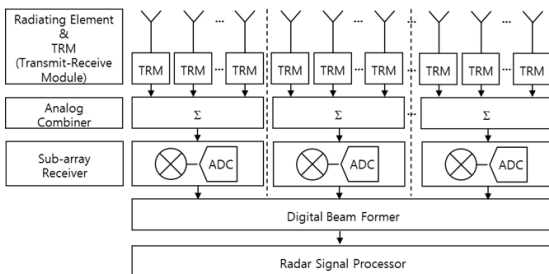


Fig. 1 Block Diagram for Active Phase Array Radar Rx Signal Path

다수의 복사소자가 각각의 송수신모듈 (TRM, Transmit-Receive Module)을 통해 아날로그 신호 결합기에서 부배열 단위로 신호 합산된 후 부배열 수신기로 전달되고, 그 신호를 디지털 변환하여 디지털빔형성 (DBF, Digital Beam Forming) 처리기로 전달한다.

능동위상배열 안테나는 각 복사소자의 위상을 천이하여 전자적 빔조향을 수행한다. 이 때 복사 소자의 위상 천이는 송수신모듈 내의 위상 천이기를 제어하여 조정한다. 또한 배열빔 형성시 발생하는 부엽(Sidelobe) 준위를 낮추기 위해 각 복사 소자별로 진폭 가중치를 조정(Tapering)하여 부엽 준위를 낮춘다. 진폭 가중치는 송수신모듈 내의 가변감쇄기 제어값에 적용한다.

일반적으로 다기능레이더 송신빔은 그림 2(a)와 같이 일정한(Uniform) 진폭을 유지하고 위상만 제어하여 빔조향을 수행하는 반면에 수신빔은 외부 방해신호 (Interference) 나 재밍 신호가 안테나 부엽을 통해 수신기로 유입되지 않도록 그림 2(b)와 같이 진폭에 가중치 (weighting)를 적용하여, 최대한 부엽을 낮춘다.

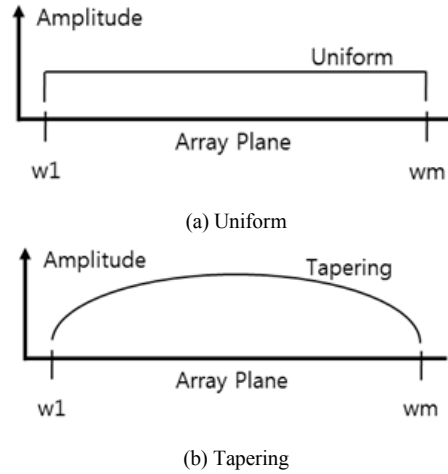


Fig. 2 Amplitude Weighting for Array antenna

본 논문에서는 배열안테나의 진폭 가중치를 구현하는 방법에 관해 기술하고, 가중치가 적용된 경우의 부배열 수신기 설계시 고려사항에 관해 기술하고자 한다.

II. 수신 배열안테나 구현

2.1. 배열안테나 요구사항

다기능 레이더에 사용하는 위상배열안테나의 복사소자 수는 경우에 따라 수 천개 이상으로 구성한다. 본 논문에서는 천개 이상의 복사소자로 구성된 그림 3과 같은 배열안테나에 대해 부배열 수신기를 설계하고자 한다.

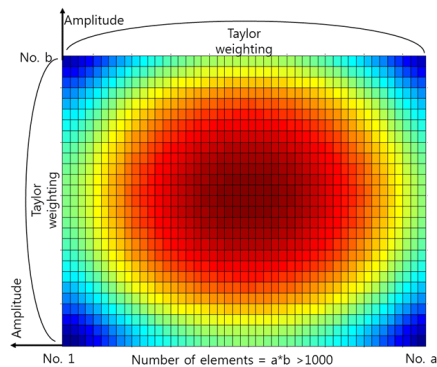


Fig. 3 Rx Antenna amplitude distribution with Taylor weighting

배열안테나의 가중치 선정, 부배열 설계 최적화는 시스템이 요구하는 안테나 패턴에 따라 결정되는 항목이므로 본 논문에서는 주어진 가중치와 부배열에 대해 수신기를 설계하고자 한다. 수신 안테나의 주요 요구사항은 표 1과 같다.

Table. 1 Rx Antenna Requirements for MFR

Items	Requirements	Description
Frequency	S-band (BW ≥ 10%)	
Number of Elements	>1,000	a*b > 1,000
Number of Sub-array	36	
G/T	≥ 0.0 dB/K	
Sidelobe Level	≤ -∞ dB	Taylor weighting

배열소자 수는 천개 이상이고, 00개의 소자(elements)를 결합하여 36개의 부배열을 구성하였다. 부배열은 안테나 소자가 그림 3과 같이 가운데를 중심으로 상/하/좌/우 대칭 구조이므로 본 논문에서는 그림 4와 같이 1/4면, 9개 부배열에 대해 주로 논의하고자 한다.

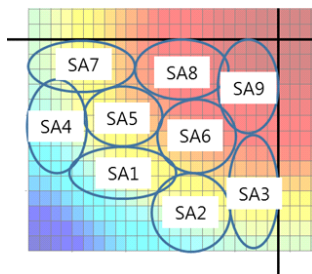


Fig. 4 Sub-array structure of a quarter of the antenna

표 1의 요구사항 중 G/T는 신호와 잡음이 동시에 배열안테나를 통과할 때의 성능 지표로 신호대 잡음의 증폭 비율이다[4]. 단일 표적에 대한 반사신호는 동위상으로 배열 소자에 유입되고, 잡음 신호는 전체 공간에 대해 상관성 없이 입력된다.

2.2. 수신 배열안테나 가중치 적용

배열안테나에 가중치를 적용하면 배열면 중심부 소자의 진폭이 가장 큰 값을 갖고, 모서리 및 외곽일수록 진폭은 작아진다. 이러한 소자별 진폭이 합산된 부배열의 신호레벨도 그림 4의 9번 부배열(SA9)과 같이 중심

부에 위치할수록 큰 신호가 집중된다.

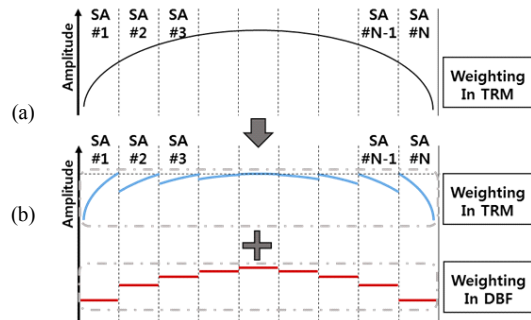


Fig. 5 Amplitude weighting Applied in Rx array antenna

그림 5(a)와 같이 진폭 가중치가 송수신모듈에 적용될 경우 중심부의 송수신모듈은 감쇄가 적고, 외곽으로 갈수록 감쇄량은 증가한다. Taylor 가중치를 적용할 경우 최대-최소 송수신모듈 감쇄량 차이는 22.4dB 이다. 감쇄량이 증가할 경우 송수신모듈 전단부 LNA의 이득이 충분히 높지 않을 경우 송수신모듈의 잡음지수가 함께 증가한다. 결과적으로 잡음 신호가 증가되어 배열안테나 전체의 G/T가 낮아질 수 있다.

이러한 동작 특성을 극복하기 위해 그림 5(b)와 같이 진폭 가중치를 두 단계로 구분하여 적용하였다. 송수신 모듈에서는 정규화된 만큼 가중치를 적용하고, 나머지 보상값은 디지털빔 형성기에서 디지털 샘플에 연산으로 적용하는 방법이다.

송수신모듈에서 정규화값은 아래 수식과 같이 계산할 수 있다.

$$g_{n,SA} = \sqrt{\sum_{SA_{element}} w_{o_{element}}^2} \tag{1}$$

$$g_{s,SA} = \sum_{SA_{element}} w_{o_{element}} \tag{2}$$

$$w_{a_{element}} = \frac{w_{o_{element}}}{g_{SA}} \tag{3}$$

여기서 $w_{o_{element}}$ 는 그림 5(a)에 적용된 소자별 진폭 가중치값, $g_{n,SA}$ 는 잡음합산에 대한 부배열 이득, $g_{s,SA}$ 는 신호합산에 대한 부배열 이득이다. 수식 (3)의 g_{SA} 는 수식 (1) 또는 (2)에서 계산한 부배열 이득이고, $w_{a_{element}}$ 는 정

규화 계산한 송수신모듈 진폭 가중치이다. 신호합산 또는 잡음합산 값에 대해 정규화 할 수 있다.

수식 (1)과 (3)으로 잡음합산 값에 대해 정규화하여 송수신모듈에 적용할 진폭 가중치, $w_{element}$ 를 계산하였다. 이 때 송수신모듈에서 구현해야 하는 최대-최소 감쇄량 차이는 13.6dB이다. 수식 (1) 부배열이득 $g_{n,SA}$ 는 디지털빔 형성기에서 연산으로 적용한다.

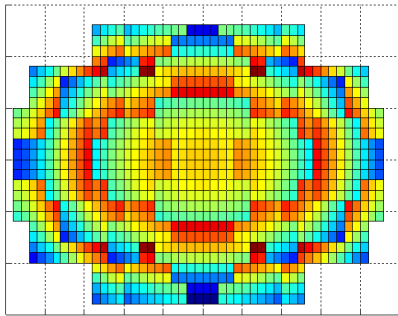


Fig. 6 Modified Rx Antenna amplitude distribution with Taylor weighting

그림 5(b)와 같이 진폭 가중치를 적용하였을 때 배열면의 진폭 분배 결과는 그림 6과 같다. 그림 6 배열면에서 모서리 부분은 배열안테나 최적화 설계를 거쳐 복사 소자 수를 최소화 할 수 있도록 삭제 하였다.

그림 6과 같은 배열안테나에 대해 디지털빔 형성기에서 보상해야할 부배열 번호에 따른 가중치 진폭값은 그림 7과 같다. 해당하는 부배열 번호 위치는 그림 4와 동일하다.

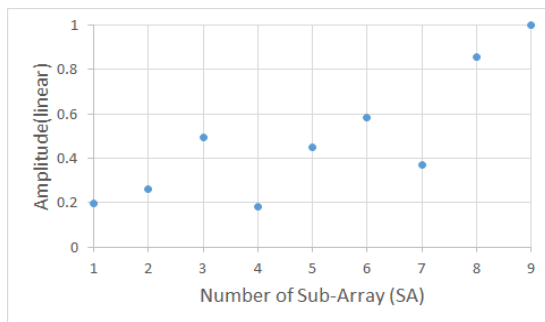


Fig. 7 Complementary weighting Factor in Digital Beam Former

그림 8은 송수신모듈 이득에 따른 그림 5(a)와 (b)의

G/T 성능 변화를 보여준다.

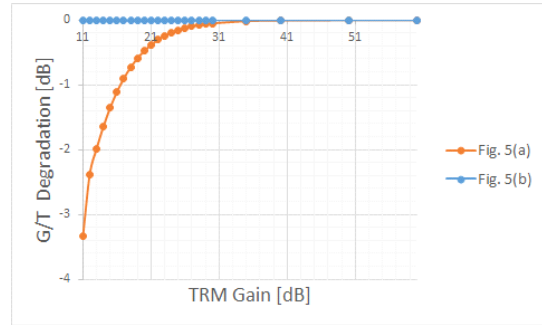


Fig. 8 G/T Comparison between Fig. 4(a) and (b)

배열안테나의 진폭 가중치를 송수신모듈과 디지털빔 형성기로 분산하여 적용한 경우가 송수신모듈 이득 변화에도 G/T 성능을 유지 하는 것을 볼 수 있다.

III. 부배열 수신기 설계

레이더 수신기 이득은 선형 동적 영역(Dynamic Range)을 확보하기 위해 사용할 ADC(Analog-to-Digital Converter)의 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 및 SFDR(Spurious Free Dynamic Range) 특성에 맞춰 설계한다 [5].

ADC를 포함한 수신기의 동적 영역은 수식 (4)와 같이 정의한다.

$$D_{ADC} = 20 \cdot \log\left(\frac{2^{N-1}}{\sqrt{2}} \cdot \alpha\right) - 1 \quad (4)$$

여기서, D_{ADC} 는 수신기 동적영역, N은 ADC 비트수, α 는 ADC 입력 잡음(σ_{IN})과 양자화 레벨(h)비이다.

ADC의 입력 SNR 대비 출력 SNR로 정의되는 ADC 손실은 수식 (5)와 같다.

$$L_{ADC} = 10 \cdot \log\left(1 + \frac{\left(\frac{2^{N-1}}{\sqrt{2}} \cdot 10^{-\frac{SNR_{ADC}}{20}}\right)^2}{\alpha^2}\right) \quad (5)$$

여기서, L_{ADC} 는 ADC 손실, SNR_{ADC} 는 ADC SNR 이다.

Analog Device 사의 AD9461 ADC를 이용하여 ADC 입력 잡음 레벨에 따른 수신기 동적 영역과 ADC 손실을 계산해 보았다. 표 2에 계산에 필요한 ADC 특성을 정리하였다.

Table. 2 Characteristics of AD9461 ADC

Items	Unit	Value
Number of Bits	bit	16
ADC SNR	dB	77.5
SFDR	dB	84

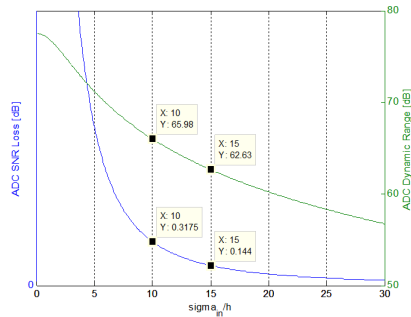


Fig. 9 ADC Dynamic Range & Loss vs. α (σ_{IN}/h)

수신기 이득이 높으면 ADC 입력 잡음(σ_{IN} , σ_{main})이 높아지고, α 값이 커져서 수신기 동적영역 D_{ADC} 가 줄어드는 반면, ADC 손실 L_{ADC} 는 줄어든다. 수신기 이득이 낮으면, 반대로 D_{ADC} 가 커지지만 L_{ADC} 또한 커진다. 입력 잡음신호 레벨($\alpha = \sigma_{IN}/h$) 대비 ADC 동적영역과 손실의 특성 그래프는 그림 9와 같다.

그림 5(a) 경우 신호레벨이 가장 높은 부배열 9번(SA9)에 대해 동적영역이 60dB이상, 손실이 0.2dB이하가 되도록 수신기 이득을 입력 잡음이 15h ($\alpha=15$) 수준으로 설정하였다.

송수신모듈 소자별 감쇄값 차이로 인해 부배열 수신기마다 유입되는 신호와 잡음레벨에 차이가 발생한다. 같은 부배열수신기 이득에 대해 신호레벨이 가장 낮게 입력되는 부배열 4번(SA4)의 경우를 비교해 보았다. 비교 결과는 표 3과 같다.

그림 5(a) 경우 부배열 수신기에 동일한 아날로그 수신이득을 적용하면, 각 부배열별로 ADC 동작 범위가 달라진다. 표 3과 같이 ADC 동적 영역과 손실에 차이가

발생한다. ADC 기준으로 같은 동작 범위에서 동작하도록 이득 제어값을 반영하여 부배열 수신기를 설계하면, 아날로그 수신이득이 부배열마다 달라진다. 이렇게 전체 부배열 수신기의 하드웨어 일치성이 유지되지 못하면 부배열 채널별로 오차성분이 발생할 확률이 높아져 보정이 어려워지고, 디지털빔 형성기에서 디지털 빔 형성시 성능 저하를 유발할 수 있다[6].

Table. 3 Comparison between SA9 and SA4 in the case of Fig 5(a)

Items		SA9	SA4
Level Comparison	Signal	0 dB	-14.9 dB
	Noise	0 dB	-14.7 dB
σ_{IN}		15h	10h
D_{ADC}		62.6 dB	66.0 dB
L_{ADC}		0.144 dB	0.317 dB
Gain Control for Unity Noise level		0 dB	+14.7 dB
Weighting in DBF		0 dB	0 dB

표 4는 그림 5(b) 경우의 부배열 수신기 특성을 나타낸다. 표 3과 동일하게 부배열 9번과 4번을 비교하였다.

Table. 4 Comparison between SA9 and SA4 in the case of Fig 5(b)

Items		SA9	SA4
Level Comparison	Signal	0 dB	-0.21 dB
	Noise	0 dB	0 dB
σ_{IN}		15h	15h
D_{ADC}		62.6 dB	62.6 dB
L_{ADC}		0.144 dB	0.144 dB
Gain Control for Unity Noise level		0 dB	0 dB
Weighting in DBF		0 dB	-14.72 dB

그림 5(b) 경우에 가중치를 수식 (1)과 같이 잡음합산으로 정규화 하였기 때문에 부배열마다 동일한 이득의 수신기를 적용해도, ADC 동작 영역이 동일하다. 또한 부배열간 신호 이득 차이도 계산 결과 최대 차이가 SA9와 SA3 사이의 0.52dB로 전체 부배열에 대해 1dB 이내이다. 이 경우 별도의 이득 조정 없이 각 부배열 수신기를 하드웨어적으로 동일하게 구현할 수 있다.

IV. 결 론

다기능레이더의 안테나는 다수 표적을 동시에 탐색하고 추적 전환하기에 충분히 빠른 빔 전환 시간이 필요하다. 이러한 요구사항을 만족하기 위해 위상배열안테나는 디지털빔 조향 방식으로 발전하고 있다. 또한 수신 빔 형성시 안테나 부엽 패턴으로 유입되는 원치 않는 신호의 크기를 최대한 낮추기 위해 배열소자에 진폭 가중치를 적용한다.

본 논문에서는 능동위상배열안테나 중에 아날로그 빔형성과 디지털 빔형성이 조합된 형태인 하이브리드 형태의 부배열 타입 배열안테나에서 부엽을 효과적으로 저하시키면서 디지털 빔형성시 하드웨어 차이로 인해 발생할 수 있는 오차를 최소화할 수 있는 방법에 대해 기술하였다.

진폭 가중치를 안테나 배열면에서만 구현하는 기존 방식 대신 안테나 배열면 송수신모듈과 디지털빔 형성기 두 부분에 분산 적용하였다. 능동위상배열안테나 구현 측면에서는 감쇄값 가변 범위를 22.4dB에서 13.6dB로 줄일 수 있다. 송수신모듈의 감쇄값 가변 범위가 작아지면서, 추가적인 잡음신호 증가 원인이 줄어서 전체 수신배열안테나의 G/T 성능을 유지할 수 있다. 또한 감쇄 가변 범위가 축소되므로서 디지털 감쇄기 부품 특성인 감쇄값 대비 위상변화량 연관성을 줄일 수 있어서 감쇄량과 위상천이 사이의 격리도가 향상되어 배열안테나 보정에 유리해진다[7]. 또한 ADC를 포함한 부배열 수신기 하드웨어를 전체 부배열에 동일하게 적용할 수 있어서 디지털 빔 형성시 하드웨어 오차 성분을 줄일 수 있고, 부배열 간 정렬 및 보정을 용이하게 할 수 있다.

References

[1] H. M. Yi, B. C. Jun, and B. H. Lee, "Miniaturization Development of Transmit/Receive Module using a 10W MEMS switch," in *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 12, pp. 2417-2424, Dec. 2016.

[2] K. Y. Jung, "Long-range Multi-function Radar for combat technology trend and development direction," in *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 25, no. 2, pp. 21-29, Mar. 2014.

[3] H. M. Yi, J. H. Choi, and I. T. Han, "Development of the Frequency Synthesizer for Multi-function Radar," in *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 22, no. 8, pp. 1099-1106, Aug. 2018.

[4] J. J. Lee, "G/T and Noise Figure of Active Array Antenna," in *IEEE Transactions on Antenna Propagation*, vol. 41, no. 2, pp. 241- 244, Feb. 1993.

[5] T. H. Kim, B. G. Choi, H. Y. Lee, and C. S. Cho, "Receiver Gain of Active Phased Array Radar-Dependence on ADC Characteristic," in *Journal of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 20, no. 1, pp. 52-59, Jan. 2009.

[6] W. L. Melvin, and J. A. Scheer, *Advanced Principles of Modern Radar : vol. II Advanced Techniques*, Edison, NJ: SciTech Publishing, 2014.

[7] Analog Device. Attenuators-Digital-SMT HMC472A Data Sheet [Internet]. Available: <http://www.analog.com/en/products/hmc472a.html#product-overview>.



이희민(Hui-Min Yi)

전파공학전공 공학박사
한화시스템 레이더 · PGM 연구소 수석연구원
※관심분야 : 레이더, 레이더 송수신기,
초고주파부품



김도훈(Do-Hoon Kim)

정보통신공학전공 공학석사
한화시스템 레이더 · PGM 연구소 전문연구원
※관심분야 : 레이더, 레이더 송수신기,
디지털신호처리 및 제어



한일탁(Il-Tak Han)

전파공학전공 공학석사
국방과학연구소 선임연구원
※관심분야 : 레이더, 레이더 신호처리,
레이더 송수신체계