THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2013 Feb.; 24(2), 207～213.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2013.24.2.207
ISSN 1226-3133 (Print)

파수 영역에서 모노스태틱 변환을 이용한 바이스태틱 개구합성 레이다 영상화 기법 연구

A Study on Bistatic SAR Imaging Using Bistatic-to-Monostatic Conversion in Wavenumber Domain

조병래 · 선선구 · 이정수 · 박규철 · 하종수

Byung-Lae Cho · Sun-Gu Sun · Jung-Soo Lee · Gyu-Churl Park · Jong-Soo Ha

요 약

본 논문에서는 바이스태틱-모노스태틱 변환을 이용하여 바이스태틱 개구합성 레이다 영상화를 위한 ω–K (omega-K) 알고리즘에 대해 기술하였다. 고려된 바이스태틱 개구합성 레이다는 1개의 정지된 송신 안테나와 여러 개의 수신 안테나로 구성된 물리적 배열 구조로 구성되어 있다. 수신 안테나의 물리적 배열 구조의 길이는 SAR 시스템의 개구합성 길이와 동일하다. 모노스태틱 구조와 다르게 바이스태틱 구조에서 ω–K(omega–K) 알고리즘은 2차원 파수 영역에서 정확한 수학적 해를 얻을 수 없다. 제안된 영상화 기법의 핵심은 바이스태틱 구조의 데이터를 모노스태틱 구조의 데이터로 변환하는 것이다. 시뮬레이션과 실제 측정된 데이터를 이용하여 제안된 영상화 기법이 효과적임을 보여준다.

Abstract

This study describes an omega-K algorithm for focusing bistatic synthetic aperture radar(SAR) data using bistatic-to-monostatic conversion. Bistatic SAR system considered in this study consists of a transmitting antenna and a physical array of several receiving antennas. The length of the physical array is identical to the SAR synthetic aperture. Unlike the monostatic case, an omega-K algorithm for the bistatic case is difficult to obtain the exact equation in the 2D wavenumber domain. The key of the proposed algorithm is converting the bistatic data into a monostatic one. The effectiveness of the proposed algorithm is proved by simulation and real measurement data.

Key words : Omega-K Algorithm, One Stationary Bistatic SAR, Forward Imaging Radar

Ⅰ. 서 론

레이다는 군사용 목적으로 발명된 이래 장거리 표적의 탐지 및 추적용 레이다 위주로 발전하고 있으나, 현재에는 합성개구면 영상레이다, 민수 분야에서의 차량 충돌 방지 레이다 및 의료용 바이오 영상레이다 및 무인 차량의 장애물 회피용 영상레이다 분야에 이르기까지 그 사용이 널리 확대되고 있는 추세이다[1],[2].

무인 차량이 야지 자율 주행을 할 때 차량의 전방 및 주변에 대한 지형 정보, 즉 장애물, 웅덩이 및 바위와 같은 지형의 만곡에 대한 정보 획득을 위하여 여러 센서들 중 영상레이다가 사용된다. 무인 차량에 장착된 영상레이다는 미국의 ARL(Army Research

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 2, 2013 ; Revised February 14, 2013 ; Accepted February 15, 2013. (ID No. 20130102-001)

· Corresponding Author : Sun-Gu Sun (e-mail : sgsun@add.re.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

Lab.) 연구소에서 SIRE(Synchronous Impulse Reconstruction) UWB 레이다 시스템을 연구하고 있다[3]. 헬리콥터의 이착륙을 보조하는 시스템으로 독일의 DLR 연구소에서 연구한 SIREV(Sector Imaging Radar for Enhanced Vision) 레이다 시스템이 있다[4]. 또한 국내에서는 국방과학연구소에서 초광대역 신호를 이용한 전방 관측 영상레이다 가능성 연구를 완료하였으며, 시스템을 구현하고 있다[5].

개구합성 레이다(Synthetic Aperture Radar)의 영상 형성 알고리즘은 Range-Doppler 알고리즘, Chirp-Scaling 알고리즘, Omega-K 알고리즘, Back Projection 알고리즘 등이 있다[6]. 참고문헌 [3]~[5]에서 제시된 레이다 시스템의 경우, 송신 안테나가 고정되어 있고 수신 안테나의 물리적 배열 구조가 개구합성을 형성하는 바이스태틱(bistatic) 구조를 가진다. 바이스태틱 구조에서 omega-K 알고리즘의 경우 수치 해석적으로 정확한 해를 구할 수 없다[7]. 참고문헌 [7]에서 바이스태틱 구조에서 omega-K 알고리즘을 이용하여 영상을 획득하는 방법에 대해 기술하고 있으며, 이 본문에서는 전방 관측 영상레이다에 적용 가능한 방법 중 하나인 바이스태틱 구조의 획득 데이터를 모노스태틱 구조의 데이터로 변환하는 방법에 대해 기술하였다. 본 논문 Ⅱ장에서는 바이스태틱 구조의 데이터를 모노스태틱 구조의 데이터로 변환되는 과정을 수치 해석적으로 기술하고, Ⅲ장에서는 시뮬레이션 데이터 및 시험 데이터를 이용하여 영상화 실험 및 분석에 대해 기술하며, Ⅳ장에서는 결론을 맺는다.

Ⅱ. 모노스태틱으로의 구조 변환을 이용한 $\omega-K$ 알고리즘 구현

그림 1은 전방 관측 영상레이다 시스템의 기하학 구조를 보여주고 있다. 하나의 송신기는 x_T에 위치하며, 수신기 배열은 u에 위치한다[5].

실제 u에 위치한 수신기와 (x,y)에 위치한 표적과의 실제 거리를 계산하고, 이를 테일러 확장을 통해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$r_u = \sqrt{y^2+(x-u)^2} \quad ,^{1)}$$
$$\approx R - u\sin\theta + \frac{u^2}{2R}\cos^2\theta \tag{1}$$

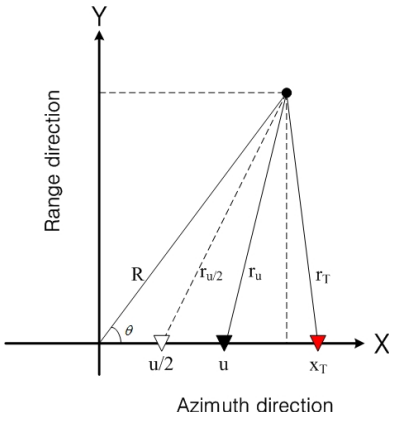


그림 1. 바이스태틱 개구합성 레이다 기하학 구조
Fig. 1. Geometry configuration of bistatic SAR system.

여기서 $R=\sqrt{y^2+x^2}$, $\cos\theta=\frac{y}{R}$, $\sin\theta=\frac{x}{R}$이다.

x_T에 위치한 송신기에서 (x,y)에 위치한 표적과의 거리는 식 (2)와 같이 표현 가능하다.

$$r_T = \sqrt{y^2+(x-x_T)^2}$$
$$\approx R - x_T\sin\theta + \frac{x_T^2}{2R}\cos^2\theta \tag{2}$$

$u/2$의 위치에 가상의 송수신기가 존재한다고 가정할 경우 (x,y)에 위치한 표적과의 거리는 다음과

---

1) $r_u = \sqrt{y^2+(x-u)^2} = \sqrt{y^2+x^2-2xu+u^2}$
$= R\sqrt{1-\frac{2xu}{R^2}+\frac{u^2}{R^2}}$
$= R\sqrt{1-\frac{2\sin\theta}{R}u+\frac{u^2}{R^2}}$

$$r_u' = \frac{-\frac{2}{R}\sin\theta+\frac{2u}{R^2}}{2\sqrt{1-\frac{2u}{R}\sin\theta+\frac{u^2}{R^2}}}$$

$$r_u'' = \frac{\frac{1}{R^2}}{\sqrt{1-\frac{2u}{R}\sin\theta+\frac{u^2}{R^2}}} - \frac{\left(-\frac{\sin\theta}{R}+\frac{u}{R^2}\right)^2}{\left(1-\frac{2u}{R}\sin\theta+\frac{u^2}{R^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$r_{u=0}' = -\frac{\sin\theta}{R},\quad r_{u=0}'' = \frac{\cos^2\theta}{R^2}$$

같이 표현된다.

$$r_{u/2} = \sqrt{y^2 + \left(x - \frac{u}{2}\right)^2} \approx R - \frac{u}{2}\sin\theta + \frac{u^2}{8R}\cos^2\theta \quad (3)$$

바이스태틱 레이다의 경우, 송신기-표적-수신기까지 왕복 거리는 식 (4)와 같이 표현되며, 가상의 모노스태틱 레이다의 경우, 송신기-표적-수신기까지 왕복 거리는 식 (5)와 같이 표현된다. 참고문헌 [3]과 [5]에서 방위각 해상도를 분석하였을 때 바이스태틱 구조의 방위각 해상도가 모노스태틱 구조의 방위각 해상도보다 2배 나빠지는 결과를 보여주고 있다. 이는 개구합성 길이가 절반으로 줄어드는 효과가 있으므로 식 (5)와 같이 가정하였다.

$$r_b = r_u + r_T = 2R - (u + x_T)\sin\theta + \frac{u^2 + x_t^2}{2R} \quad (4)$$

$$r_m = 2r_{u/2} = 2R - u\sin\theta + \frac{u^2}{4R}\cos^2\theta \quad (5)$$

바이스태틱 레이다와 가상의 모노스태틱 레이다 사이의 송신기-표적-수신기까지 왕복 거리 차는 식 (4)와 식 (5)의 차로 구할 수 있다.

$$\Delta r = r_b - r_m = -x_t\sin\theta + \frac{u^2}{4R}\cos^2\theta + \frac{x_T^2}{2R}\cos^2\theta = -x_t\sin\theta + \frac{1}{4R}\left(u^2 + 2x_T^2\right)\cos^2\theta \quad (6)$$

그림 2는 바이스태틱 레이다에서 획득한 데이터 $s_b(u,k)$를 식 (6)의 왕복 거리차를 보상하여 모노스태틱 레이다 데이터 $s_m(k_u,k)$로 변환하는 과정을 보여주고 있다.

그림 2의 과정을 거쳐 획득된 가상의 모노스태틱 레이다 데이터 $s_m(k_u,k)$는 다음과 같이 표현된다.

$$s_m(k_u,k) = \int A_n * \exp\left\{-j2k\sqrt{y^2 + \left(x - \frac{u}{2}\right)^2}\right\} * \exp\{-jk_u u\}\,du = A_n * \exp\left\{-j2\sqrt{k^2 - k_u^2}\,x - j2k_u y\right\} \quad (7)$$

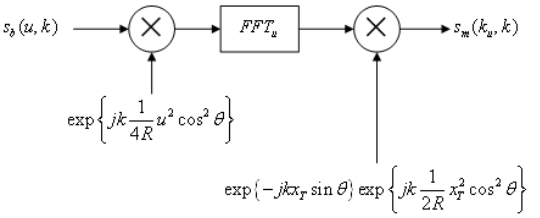


그림 2. 바이스태틱 데이터를 모노스태틱 데이터로 변환하는 과정

Fig. 2. Bistatic-to-monostatic conversion process.

여기서 A_n은 (x,y)에 위치한 표적의 절대적 반사 크기를 의미한다.

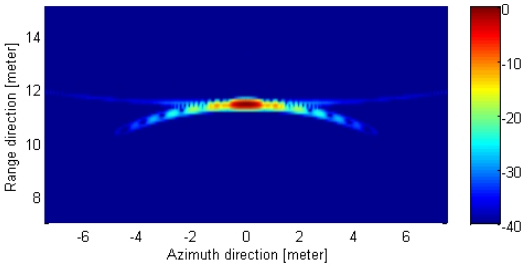
레이다 기하학적 구조에 의해 결정되는 측정 데이터 영역을 표적이 위치한 영역으로 다음과 같이 변환 가능하다.

$$s(k_x,k_y) = A_n * \exp\{-jk_x x - jk_y y\}, \quad k_x = 2\sqrt{k^2 - k_u^2}, \quad k_y = 2k_u \quad (8)$$

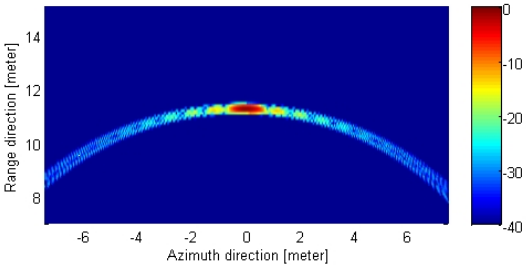
식 (8)의 과정을 통해 (x,y) 영역으로 데이터 변환하는 과정을 stolt interpolation이라 한다[6]. Stolt interpolation을 거친 후 SAR 영상 $s(x,y)$는 $s(k_x,k_y)$를 2D IFFT를 수행하므로 획득할 수 있다.

Ⅲ. 영상화 실험 및 분석

Ⅱ장에서 언급한 영상화 기법을 시뮬레이션과 실제 시험을 통해 검증하였다. 시뮬레이션은 참고문헌 [8]에서 제안한 시스템 파라미터를 이용하였다. Chirp pulse 레이다 방식으로 대역폭은 1.6 GHz, 펄스폭은 2 msec, 수신 안테나 배열은 3 cm씩 26개로 이루어졌다. 송신 안테나는 수신 안테나 배열 중심으로부터 좌측 0.465 m 떨어진 곳에 위치하였다. 그림 3은 거리방향으로 11 m 떨어진 곳에 점표적을 가정하여 시뮬레이션 한 데이터를 이용하여 SAR 영상을 얻은 결과들이다. 그림 3(a)는 제안된 방법을 이용하여 획득한 영상이며, 그림 3(b)는 back-projection[8] 알고리즘을 이용하여 획득한 영상이다. 그림 4는 그림 3의 표적에 대한 방위각 방향 프로파일을 보여주고 있다. 그림 4에서 실선은 제안된 방법을 이용한 SAR 영상의 방위각 방향 프로파일이고, 점선은 시간 영



(a) 제안된 방법을 이용하여 획득된 영상
(a) Image obtained by using the proposed method



(b) Back-projection을 이용하여 획득된 영상
(b) Image obtained by using back-projection method

그림 3. 시뮬레이션 데이터의 영상화 결과 비교
Fig. 3. Comparison of SAR images for the simulation data.

역의 back-projection 알고리즘을 이용한 SAR 영상의 방위각 방향 프로파일이다. Back-projection 알고리즘에서는 송신 안테나의 치우침에 따른 영향으로 좌우측 사이드로브가 상이함을 보여주고 있다. 제안된 방법에서는 모노스태틱으로 변환하였으므로 좌우측 대칭으로 나타난다. 그러나 제안된 방법에서 PSLR (Peak to Side-Lobe Ratio)가 약 10 dB로 시간 영역 back-projection 알고리즘에 비해 약 3 dB 가량 나빠졌음을 알 수 있다(그림 3에서 보듯이 근거리 표적의 경우 부채꼴형 격자 구조를 통해 영상을 획득해야 표적에 의한 정확한 사이드로브 특성을 분석할 수 있으나, omega-K 알고리즘을 통해 획득한 영상은 직교 격자 형태를 이루고 있어 방위각 방향 프로파일을 통해 정확한 사이드로브 특성을 분석할 수는 없다.).

그림 5(a)와 같이 잔디밭에 코너반사기를 위치하고 참고문헌 [8]에서 제안한 시스템을 이용하여 영상화 시험을 수행하였다. 코너반사기는 레이다로부터 10 m 떨어진 곳에 위치시켰다. 그림 5(b)에서 보듯이 근거리에 잔디밭에 의한 반사 신호를 볼 수 있

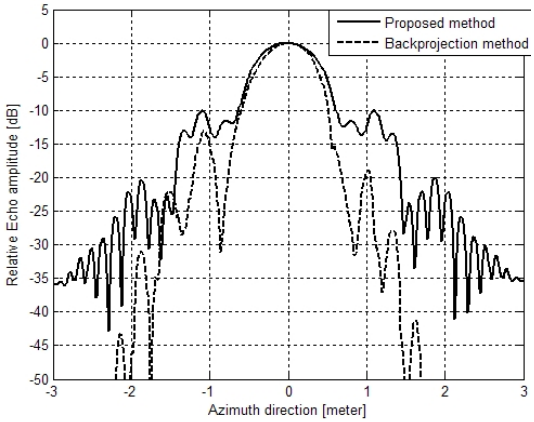


그림 4. 그림 3의 표적에 대한 방위각 방향 프로파일 비교
Fig. 4. Comparison of the azimuth profiles for a target in Fig. 3.

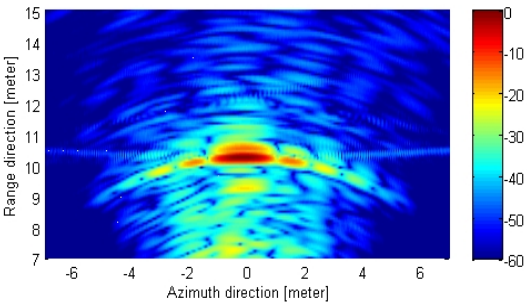
으며, 10 m 떨어진 곳에 점표적이 나타남을 확인할 수 있다. 그림 5(c)는 back-projection 알고리즘을 이용하여 획득한 영상이다.

그림 6(a)는 여러 개의 표적이 운동장에 위치한 시험 장소를 보여주고 있다. 표적의 위치는 나무그루터기(8 m, 10°), 코너반사기(11 m, 0°), 돌(14 m, −10°)이다(직교좌표계로 변환하면 나무그루터기는 (7.88 m, 1.39 m), 코너 반사기(11 m, 0 m), 돌(13.79 m, −2.43 m)이다.). 그림 6(b)는 제안된 방법을 이용하여 획득한 SAR 영상이고, 그림 6(c)는 back-projection 알고리즘을 이용하여 획득한 영상이다. 표적이 여러 개 존재할 때도 제안된 방법을 이용하여 영상 획득이 가능한 것을 확인할 수 있다.

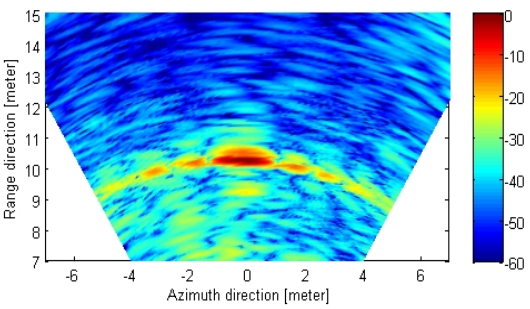
그림 3~6에서 보듯이 시간 영역 back-projection 알고리즘에 비해 omega-K 알고리즘을 적용할 경우 윈도우윙을 통해 사이드로브를 쉽게 감소시킬 수 있다. 그러나 제안된 방법을 통해 획득된 영상에서 강한 점표적의 경우 원하지 않는 신호가 존재하고 있는 단점이 있다. 바이스태틱 구조의 경우, 식 (8)에서 $k_u > k$인 경우가 발생하여 기인한 것으로 판단되며, 원하지 않는 신호의 원인 규명 및 억제를 위해 추후 심층적인 연구가 필요할 것이다.

제안된 방법은 바이스태틱 레이다 구조에서 가정과 간략화 과정을 거치면서 모노스태틱 omega-K 알고리즘을 적용하는 것이며, 바이스태틱 레이다 구조

(a) 시험 장소 1
(a) Picture for measurement site 1



(b) 제안된 방법을 이용하여 획득한 영상
(b) SAR image obtained by using the proposed method

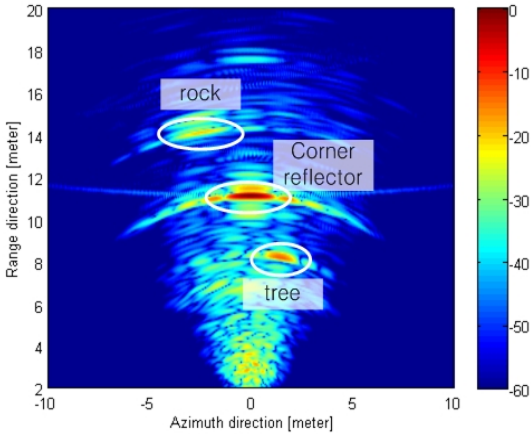


(c) Back-projection을 이용하여 획득한 영상
(c) SAR image obtained by using back-projection method

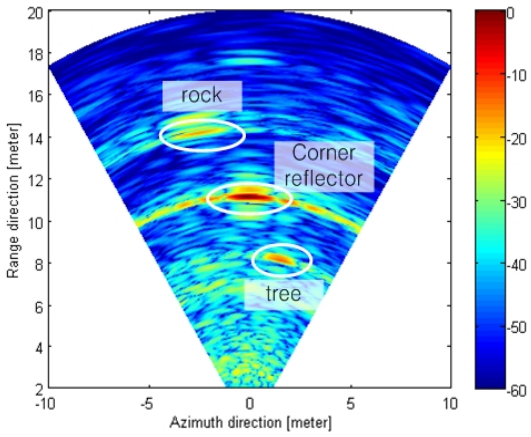
그림 5. 시험 장소 1과 제안된 방법을 이용하여 획득한 SAR 영상
Fig. 5. Measurement site 1 and SAR image obtained by using the proposed method and back-projection method.

에서 정확한 영상을 얻을 수 있는 시간 영역 back-projection 알고리즘에 비해 PSLR 특성이 나빠지지만, 실시간 신호처리가 가능하다는 장점이 있다.

(a) 시험 장소 2
(a) Picture for measurement site 2



(b) 제안된 방법을 이용하여 획득한 SAR 영상
(b) SAR image obtained by using the proposed method



(c) Back-projection을 이용하여 획득한 영상
(c) SAR image obtained by using back-projection method

그림 6. 시험 장소 2과 제안된 방법을 이용하여 획득한 SAR 영상
Fig. 6. Measurement site 2 and SAR image obtained by using the proposed method and back-projection method.

Ⅳ. 결 론

이 논문에서는 송신 안테나가 고정되어 있고, 수신 안테나가 움직이면서 개구합성을 형성하는 바이스태틱 SAR 시스템에 omega-K 알고리즘을 적용하기 위한 방법으로 가상의 모노스태틱 레이다 구조로의 변환을 이용하는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션과 시험을 통해 획득한 데이터를 이용하여 SAR 영상을 형성하였으며, 영상이 형성되는 것을 확인하였다. 제안된 방법은 바이스태틱 레이다 구조에서 가정과 간략화 과정을 거치면서 시간 영역 back-projection 알고리즘에 비해 사이드로브 특성이 나빠지지만, 실시간 신호처리가 가능하여 전방 관측 영상 레이다 시스템에 적용 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] B. Edde, *Radar Principles*, *Technology*, *Applications*, NJ: Prentice Hall, 1993.

[2] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd Ed., McGraw-Hill, 2001.

[3] L. Nguyen, D. Wong, B. stanton, and G. Smith, "Forward imaging for obstacle avodiance using ultra-wideband synthetic aperture radar", *Proc. SPIE*, vol. 5083, pp. 519-528, 2003.

[4] G. Krieger et. al., "Sector imaging radar for enhance vision", *Aerospace Science and Technology*, vol. 7, pp. 147-158, 2002.

[5] 선선구, 조병래, 박규철, 남상호, "무인 차량 탑재형 전방 관측 영상레이다 가능성 연구", 한국전자파학회논문지, 21(11), pp. 1285-1294, 2010년 11월.

[6] Ian G. Cumming, Frank H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Artech House, 2005.

[7] B. Liu, T. Wang, Q. Wu, and Z. Bao, "Bistatic SAR data focusing using an omega-K algorithm based on method of series reversion", *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, vol. 47, no. 8, pp. 2899-2912, 2009.

[8] S. G. Sun, B. Cho, G. C. Park, and Y. S. Kang, "UWB forward imaging radar for unmanned ground vehicle", *Proc. APSAR*, pp. 1-4, 2011.

조 병 래

1999년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)
2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2005년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2005년 3월～2006년 1월: 포항공과대학교 전자전기공학과 연구원
2006년 1월～현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이다 신호처리, 영상레이다 등

선 선 구

1987년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1989년 2월～현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 레이다 신호처리, 영상레이다, 컴퓨터비젼

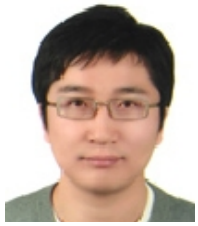
이 정 수

2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2002년 3월~2005년 12월: LG 전자 연구원
2006년 1월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 안테나 설계, 영상레이다 등

박 규 철

1989년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)
1991년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학석사)
2010년 8월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
1991년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 근거리 특수레이다 시스템, Transceiver 등

하 종 수



2001년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] UWB 레이더 시스템, 펄스도플러 레이더 시스템, 시스템 M&S, 영상 신호처리