

논문 2016-53-12-1

지뢰탐지용 48채널 배열 UWB 임펄스 레이더 방식 지면투과레이더시스템 개발

(Ground Penetrating Radar System for Landmine Detection Using 48 Channel UWB Impulse Radar)

권지훈*, 광노준*, 하성재**, 한승훈***, 윤여선***, 양동원****

(Ji-Hoon Kwon, No-Jun Kwak[©], Seung-Jae Ha, Seung-Hoon Han,
Yeo-Sun Yoon, and DongWon Yang)

요약

본 논문은 지뢰탐지용 48채널 배열 UWB 임펄스 레이더 방식의 지면투과레이더 구현과 시험에 대해 기술한다. 지면투과레이더는 기존 금속탐지기의 한계인 비금속 지뢰 탐지의 어려움과 매질 내 금속 성분에 의해 발생하는 높은 오경보 문제점을 극복한다. 본 논문에서는 펄스폭이 600ps 급인 미세한 모노사이클(Monocycle) 펄스 파형을 사용해, 높은 해상도의 지뢰 전자파 영상을 제공토록 시스템을 구현한다. 특히 신호처리를 통해 지뢰가 매설된 지점을 자동으로 추정하고, 해당 지점에서의 분할된 상세 지뢰 전자파 영상을 사용자에게 제공한다. 기존 성능 분석을 위해 한국 대표 토양인 거친 사양토를 사용한 실내 시험장을 구축하고, 시험장 내의 자동화된 측정 플랫폼에 구현한 레이더를 장착하여 영상 획득 및 탐지심도 분석 등의 시험을 수행한다. 지뢰는 비무장 지대에 매설된 지뢰와 동일한 형태의 모형 지뢰를 사용한다.

Abstract

This paper describes the development of the ground penetrating radar (GPR) system using UWB impulse radar with 48 Channel array. GPR is an effective alternative technology to resolve th disadvantages of metal detectors. Metal detectors have a very low detection probability of non-metallic landmine and high false alarm rates caused by metallic materials under the ground. In this paper, we use the mono-cycle pulse waveform with about 600 ps pulse width to obtain high resolution landmine microwave images. In order to analyze performances of this system, we utilize indoor test facility that made up of rough sandy loam which representative Korean soil. The mimic landmine models of metal/non-metal and anti-tank/anti-personnel landmines buried in DMZ (demilitarized zone) of Korea are used to analyze the detection depth and the shape of the mines using microwave image .

Keywords : Ground penetrating radar, UWB radar, Landmine detection)

I. 서론

지뢰제거는 군에서 추진하고 있고, 민통선이나 군사 시설보호구역의 범위에 한정되어 진행되고 있다. 한편,

지방자치단체나 민간사업자의 지뢰제거 요구에 대한 대비가 전혀 부족한 실정인데, 이는 군이 한정된 지역의 지뢰제거작업을 시행하는 것도 상당한 수준의 시간이 소요될 뿐만 아니라, 자칫 군 본연의 임무수행에 막대

* 정회원, 서울대학교 융합과학기술대학원 (Graduate School of Convergence Science and Technology Seoul National University)

** 정회원, 한국폴리텍대학교 정보통신시스템 대전캠퍼스 (Department of Information and Communication Systems, Korea Polytechnics IV, Daejeon)

*** 정회원, 한화시스템 레이더연구소 (Hanwha Systems, Radar R&D center)

**** 정회원, 국방과학연구소 (Agency for Defense Development, Daejeon)

© Corresponding Author(E-mail: nojunk@snu.ac.kr)

Received ; August 22, 2016 Revised ; October 8, 2016 Accepted ; November 17, 2016

표 1. 미확인 지뢰지대 현황과 제거기간 [1]
Table 1. Unidentified minefields and removal time.

구분	면적(만, m ²)	제거기간 (년)
계	29,983	375
민통선 이북	29,370	367
민통선 이남	613	8

* 4개 대대(24개팀)운용, 대대당 1년(8개월)에 20만m² 제거

한 지장을 초래할 수 있기 때문에 이에 대한 대응이 전혀 이뤄지고 있지 않고 있다. 표 1은 미확인 지뢰지대에 대한 지뢰제거 추정 소요기간이다^[1].

비무장지대의 지뢰지대의 경우 북한군이 200만발 정도의 대인지뢰를 매설한 것으로 추정되고, 우리군은 105만발 정도의 지뢰를 매설한 것으로 추정하고 있다. 북한군의 매설 지뢰는 목합지뢰가 60~70%, 철제/플라스틱 지뢰가 30~40%를 점유하고 있는 것으로 보고되고 있기 때문에 목합 및 플라스틱 지뢰 탐지에 대한 대비가 요구된다^[1].

따라서, 국내 지뢰제거 관련 업무는 향후 증가할 것으로 예상되는 민간인 및 비무장 지대의 지뢰제거 소요에 적극적으로 대비해야 하고, 매년 신규부대의 교체투입에 따른 기술 및 경험 미숙을 보완할 수 있는 대책이 필요하다^[1]. 따라서 현재 재래식 탐지 방법을 대체하고, 금속/비금속 지뢰 탐지가 가능한 고성능 지뢰탐지기 개발이 절실히 요구된다.

전통적 지뢰탐지장치는 금속탐지기(자성센서, Metal detector)를 이용하였다. 금속탐지기는 자기장의 변화를 감지하여 금속 물질을 감지하는 방식이다. 개발이 쉽고, 비용이 낮기 때문에 전 세계적으로 널리 개발 및 활용되고 있다^[2~3]. 그러나 비금속성 지뢰 탐지가 어렵기 때문에 북한군이 매설한 목합/플라스틱 지뢰 탐지가 거의 불가능하다. 또한 토양의 금속 및 자성 성분에 의한 오경보 발생 빈도가 매우 높은 한계를 갖는다^[2~3]. 한편, 전자파 신호를 송수신하여 지하 내에 매설된 물질 또는 단층 등을 탐지하는 지면투과레이더(지하투과레이더 또는 지하탐사레이더 등, Ground penetrating radar)가 개발되어 지뢰탐사에 활용되고 있다^[2~5]. 그러나 사용 주파수에 따라 전자파의 매질 투과율이 다르기 때문에, 매질에 따라 성능이 떨어지는 한계가 있다^[3~4]. 이러한 문제를 극복하기 위해 초광대역레이더(Ultra wideband Radar)의 기술을 접목한 광대역 지면투과레이더에 대한 연구가 진행되고 있다^[6~10].

초광대역 신호를 생성하는 방법은 광대역 FMCW 레

이더 방식과 임펄스(Impulse) 레이더 방식 등으로 구현한다. 광대역 FMCW 레이더 방식은 광대역 Chirp 신호를 사용하는 것으로 평균송신출력을 높게 사용할 수 있기 때문에 탐지거리에 이점을 갖는다. 하지만, 광대역 대역폭을 지원하는 선형 신호생성기 구현이 어렵고, 특히 주파수 변조를 위한 스위프 시간(Sweep time)이 요구되므로, 탐지 속도에 제약을 받는다. 임펄스 레이더 방식은 시간 도메인에서 초미세 펄스폭을 지닌 임펄스 파형을 사용한다. 상대적으로 높은 거리 및 각도분해능 구현에 용이하고, 광대역 주파수 신호를 동시에 송신/수신하는 장점을 갖는다. 특히 최근 반도체 공정 기술의 발달로, 서브 나노초 이하 급의 펄스폭을 갖는 소형 펄스 생성기 구현이 가능해져, 지면투과레이더용 임펄스 레이더에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[7~10].

본 연구에서는 서브 나노초 이하의 임펄스 파형을 사용하는 초광대역 임펄스 레이더를 다룬다. 특히 Single Channel 또는 수 채널 수준의 배열 레이더를 구현한 기존 연구^[7~11]와 달리, 채널 간섭을 극복토록 설계한 48채널 배열 임펄스 레이더 지뢰탐지 시스템을 구현하고, 지뢰 전자파 영상을 실시간으로 획득하고 분석한다. 이를 위해 자동화된 실내 전용시험장을 구축하고, 국내 비무장지대에 매설된 것으로 추정되는 지뢰와 동일한 모형 지뢰를 실 환경 토양(국내 대표 토양) 내에 매설하여 신호를 획득 및 분석한다.

각 장은 다음과 같이 구성한다. II장에서는 시스템 설계 및 분석을 다룬다. III장에서는 하드웨어 설계 및 구현을 다룬다. IV장에서는 신호처리 설계 및 구현을 다룬다. V장에서는 시험 및 분석을 다룬다. VI장에서는 결론과 향후연구방향을 도출한다.

II. 시스템 설계 및 분석

1. 탐지심도 분석

안테나가 지면에 떨어진 경우, 수신 전력을 다음 수식 (1)과 같이 정의하고, 거리방정식을 수식(2)와 같이 정의한다^[6, 12]. 이때 P_R 은 수신전력, P_T 는 송신전력, G 는 송신 및 수신 안테나 이득, σ 는 레이더단면적, λ 는 파장, ϵ_r 은 매질의 상대유전율, h 는 지면과 안테나의 거리, d 는 지면과 타겟과의 깊이, N 은 누적횟수, k 는 볼츠만 상수, T_s 는 시스템잡음지수, SNR_m 은 요구되는 최소 신호대잡음비로 정의한다.

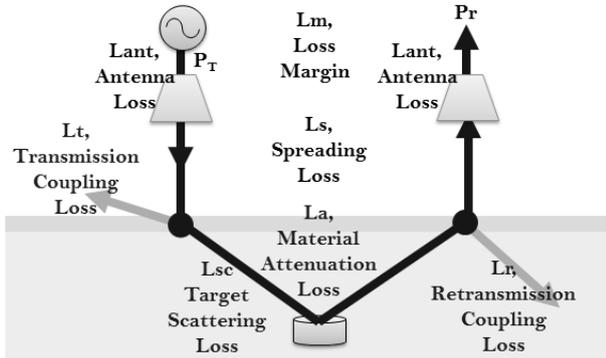


그림 1. 지면투과레이더의 손실모델 분석 [6]
Fig. 1. Loss model analysis for ground penetrating radar [6].

$$P_R \approx \frac{P_T G^2 \sigma \left(\frac{\lambda}{\epsilon_r}\right)^2}{(4\pi)^3 (h+d)^4 L_{total}} \quad (1)$$

$$R_{max} \approx \left(\frac{P_T G^2 \sigma \left(\frac{\lambda}{\epsilon_r}\right)^2 \sqrt{N}}{(4\pi)^3 k T_s B (SNR)_m L_{total}} \right) \quad (2)$$

일반적인 레이더방정식과 달리, 지면투과레이더는 부정합 및 매질에 의한 손실을 반영해야 한다. 손실총합 L_{total} 은 수식(3)와 같고, 이를 그림 1에 보인다^[6].

$$L_{total} \approx L_{ant} + L_t + L_r + L_{sc} + L_a + L_s + L_m \quad (3)$$

L_{ant} 는 급전손실 및 빔 부정합(beam mismatch)으로 인해 발생하는 손실이다. L_t 는 지면(안테나)과 매질과의 부정합으로 인해 발생하는 손실이다. L_r 은 매질과 지면(안테나)과의 부정합으로 인해 발생하는 손실로, L_t 와 동일하다. L_{sc} 는 매질과 타겟면(레이어 또는 물체)의 부정합으로 인해 발생하는 손실이다. L_a 는 매질에 의해서 발생하는 손실이다. L_s 는 안테나와 타겟 간에 떨어진 거리에 의해서 발생하는 공간손실이다. 마지막으로 L_m 은 손실 마진으로 정의한다. 특히 매질의 조성비율 및 수분함유량에 따라 상대 유전율이 변하기 때문에 L_t , L_r , L_{sc} 및 L_a 를 분석하는 것은 매우 까다로운 일이며, 시험을 통한 경험적 보완이 필요하다^[6, 12].

앞서 제시한 수식(1), (2) 및 (3)을 적용해서 탐지심도 (Detection Depth)를 분석한 시뮬레이션을 그림 2에 보인다. 이때 시뮬레이션 조건 및 시스템 파라미터를 표 2에 보인다.

2. 거리해상도 및 측면해상도 분석

거리해상도(R_{res} , Range Resolution) 및 측면해상도

표 2. 지뢰탐지용 지면투과레이더 시스템 파라미터
Table 2. System specifications of GPR for Landmine detection.

구분	Specifications	비고
송신첨두출력	20V _{p-p} 이상	
펄스폭	1ns 이하	
시스템잡음지수	10dB 이하	
안테나이득	-2dBi 이상	
신호대잡음비	00.0dB	
표적종류	대전차지뢰	금속, 비금속
중심주파수	S band 내	
토양종류	일반적 사양토	국내 대표 토양

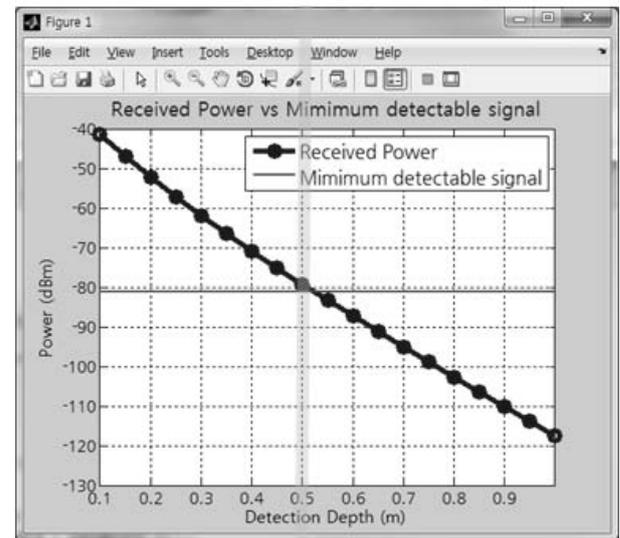


그림 2. 지뢰탐지용 지면투과레이더 탐지심도 시뮬레이션
Fig. 2. Detection depth simulation of GPR for Landmine detection.

(ΔL , Lateral Resolution)는 매질의 비유전율에 의해서 변경되며, 탐지거리와 달리 비유전율이 높을수록 좋아지는 특징을 갖는다. 거리해상도는 수식 (4), 측면해상도는 수식 (5)와 같이 정의한다^[6, 12]. 여기서 c 는 광속도, τ_p 는 펄스폭 및 V_r 은 상대속도를 나타낸다. 가장 나쁜 조건인 1ns급의 펄스폭 및 모래토양 기준으로 거리해상도 및 각도해상도가 각각 0.15m 및 0.23m 로 계산된다.

$$R_{res} \approx \frac{1.39c}{2B\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1.39c\tau_p}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

$$\Delta L \approx \sqrt{\frac{(h+d)\lambda}{2}} = \sqrt{\frac{(h+d)V_r\tau_p}{2}} \quad (5)$$

3. 거리모호성 및 펄스반복주파수 분석

펄스반복주파수(PRF, Pulse Repetition Frequency)를 선택하기 위해서는 거리모호성을 분석해야 하며, 모호하지 않은 거리 $R_{unambiguous}$ 를 수식 (6)에 보인다^[12]. 표 2의 시뮬레이션 조건으로 $R_{unambiguous}$ 과 토양의 상대유전율과의 관계를 분석한 결과를 그림 3에 보인다. 펄스반복주파수가 빠를수록, 스캔속도를 향상시킬 수 있는 장점을 갖는다. 실 토양환경에서 여유 마진을 포함토록 PRF를 40MHz로 설정한다. 한편, 수분 함유량이 매우 높은 경우 PRF를 20MHz로 내려 동작토록 설계한다.

$$R_{unambiguous} \approx V_r \frac{T_r}{2} = \frac{cT_r}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

4. 스캔 매커니즘 및 속도분석

48채널의 배열 임펄스 레이더가 스캔하는 매커니즘(구조)을 그림 4에 보인다. 48채널이 배열된 방향이 Cross-track 축(B-scan 축)이고, 각각의 개별 임펄스

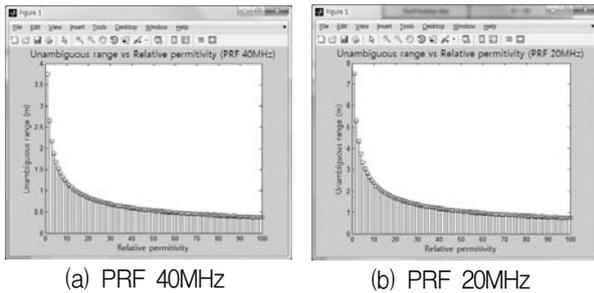


그림 3. Unambiguous range와 상대유전율
Fig. 3. Unambiguous range vs Relative permittivity.

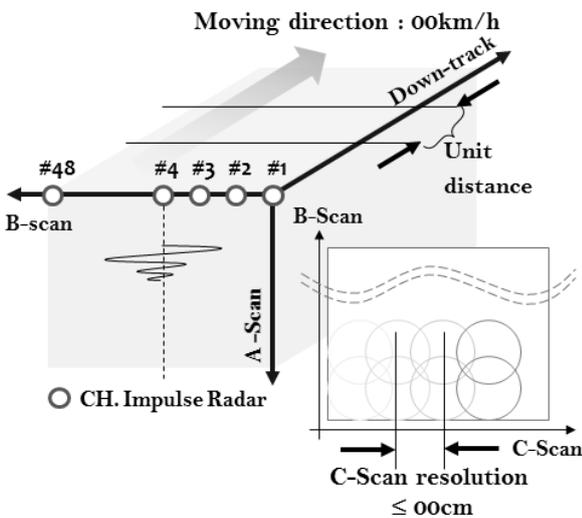


그림 4. 48채널 배열 임펄스 레이더의 스캔 매커니즘
Fig. 4. Scan mechanism of 48 Ch. array impulse radar.

레이더가 깊이 방향으로 측정하는 방향을 A-scan 축으로 정의한다. 48채널 배열 임펄스 레이더가 플랫폼에 탑재되어 이동하면서 획득하는 축을 Down-track 축(C-scan)으로 정의한다.

A-scan 및 B-scan 속도는 각각 수식 (7)과 (8)에 의해 계산한다. 이때 N_D 는 임펄스레이더 하드웨어 구조와 관련한 DAC 간격의 수이고, N_I 는 펄스누적 개수이다. B-scan 속도는 A-scan 속도 및 채널 수에 비례하며, 동시 송수신 개수인 M 에 반비례한다. α 는 수신데이터 전송, 정렬 및 기타 시간에 대한 값으로 상대적으로 매우 작은 값을 갖는다. 배열 임펄스 레이더는 채널 간 상호 간섭을 최소화하기 위해 시간도메인 상에서 송수신 시간을 랜덤하게 제어한다. 이 방식을 통해 동시 송수신 개수 M 을 높게 사용함으로써 속도를 개선시킨다. 그러나 유효한 값의 펄스 누적 수를 사용해야 타 채널로 인한 잡음 유입을 억제할 수 있기 때문에 N_I 와 M 을 상호 보완적으로 적용한다.

$$A_{scan_rate} (Hz) = \frac{PRF}{N_D \times N_I} \quad (7)$$

$$B_{scan_rate} (Hz) = \frac{A_{scan_rate} \times M}{Number\ of\ channel} \quad (8)$$

본 장비는 PRF 40MHz 기준, 수신기 샘플러 해상도 26ps, N_D 8192, N_I 10이상, M 3 등의 설정값 기준으로 B-scan rate를 10Hz (0.1s) 이상으로 구현한다.

III. 하드웨어 설계 및 구현

48채널 배열 UWB 임펄스 레이더 방식의 지면투과레이더는 안테나모듈, TRX모듈, 신호처리 모듈 및 전력모듈로 구성한다. 각각의 안테나모듈 및 TRX모듈은 각각 16개의 송수신안테나 및 임펄스 레이더 트랜시버를 갖는다. 블록다이어그램을 그림 5에 보인다.

송수신안테나는 배열 확장성을 감안하여, Cross-Track 방향 개구면 크기를 줄일 수 있는 비발디(Vivaldi) 안테나를 채택한다. Cross-track 방향으로 넓은 탐지 영역을 커버하기 위해, Down-track보다 상대적으로 넓은 Cross-track 방향의 빔폭을 갖도록 구현한다. 제한기(Limiter)의 회복시간보다 고속으로 송수신이 근거리에서 동작하기 때문에 수신기 보호용 제한기 사용이 불가능하다. 따라서 안테나 송수신 간에 높은 격리도가 요구되며, 본 개발의 경우 수신기의 물리적 특성을 고려하여 25dB 이상을 유지토록 설계한다.

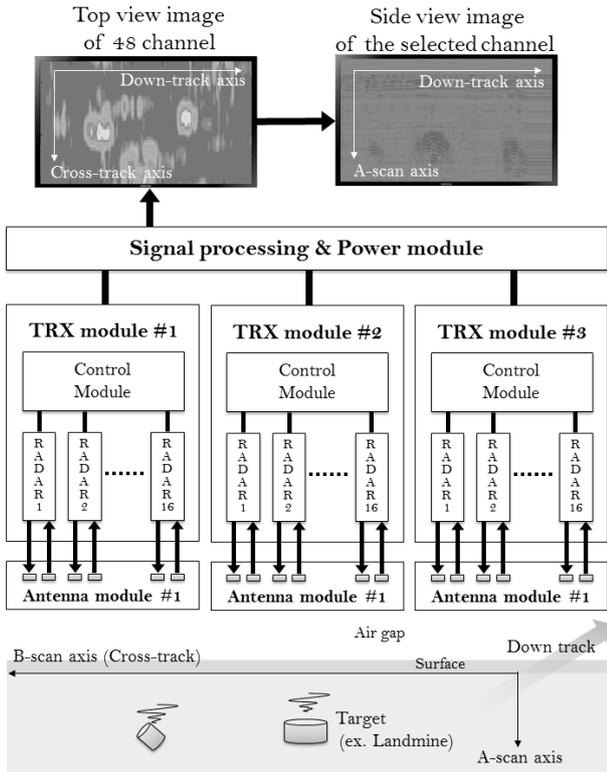


그림 5. 지면투과레이더 블록다이아그램
Fig. 5. GPR system block-diagram.

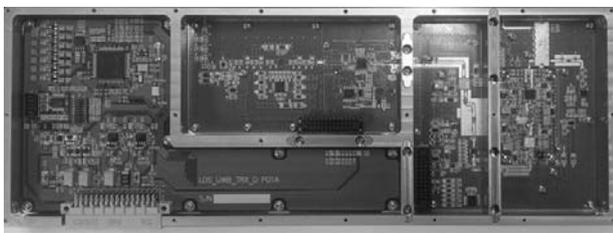


그림 6. 단채널 임펄스 레이더 트랜시버
Fig. 6. Single Channel Impulse Radar Transceiver.

임펄스 레이더 트랜시버는 송신회로와 수신회로 등으로 구성하며, 송신회로는 1ns 이하의 모노싸이클 형태의 파형을 생성하고, 왜곡을 최소화하여 증폭한다. 수신회로는 광대역 저잡음증폭 및 직접검파(Direct Conversion) 회로를 탑재한다. 개발된 임펄스 트랜시버 레이더 모듈을 그림 6에 보이고, 생성된 송신신호의 오실로스코프 및 스펙트럼 어널라이저를 통해 측정된 결과를 각각 그림 7 및 그림 8에 보인다.

16채널 안테나모듈 및 TRX모듈을 그림 9에 보인다. 전체 48채널은 그림 9에서 보이는 장치를 3개 통합하여 구현한다. 최종 구현한 시스템을 그림 10에 보인다.

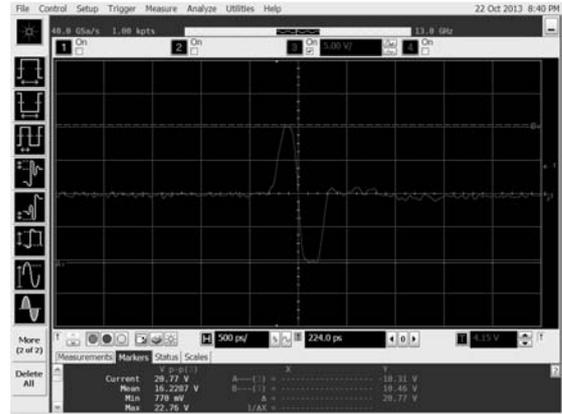


그림 7. 1ns 이하, 20V_{p-p} 급 모노싸이클 송신파형
Fig. 7. Mono-cycle tx signal waveform (<1ns, 20V_{p-p}).

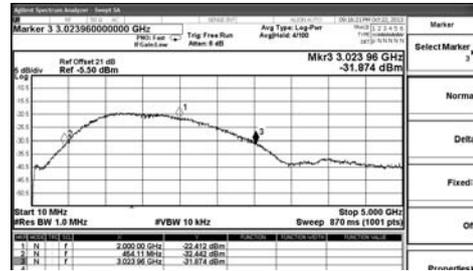


그림 8. 생성된 송신출력의 광대역 스펙트럼
Fig. 8. Ultra-wideband spectrum of the generated signal.

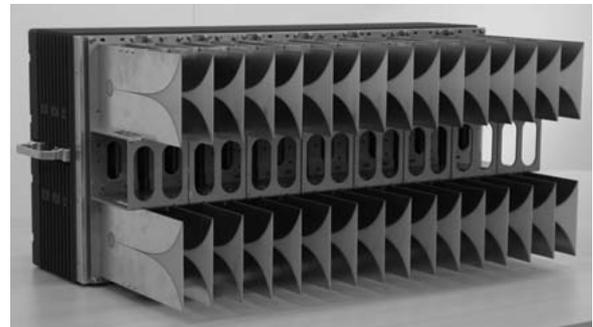


그림 9. 16 채널 안테나 및 TRX 모듈
Fig. 9. 16 channel Antenna and TRX module.



그림 10. 48 채널 배열 임펄스레이더방식 지면투과레이더
Fig. 10. Ground penetrating radar using 48 channel UWB impulse radar.

III. 신호처리 설계 및 구현

수신한 신호로부터 DC offset을 제거 처리하고, 채널 간의 크기 밸런스를 조정할 수 있는 Scaling factor, ρ 를 곱한 수식을 식 (10)에 보인다. $A(t)$ 는 t 시점에 획득한 A-scan 데이터로 512개의 샘플로 구성된 벡터로 수식 (9)와 같다.

$$A(t) = [A_1, A_2, \dots, A_N] \quad (9)$$

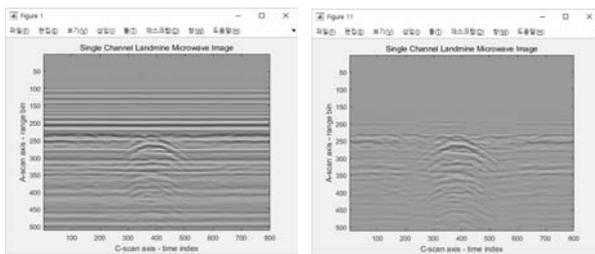
$$A(t) = \rho \left(A(t) - \frac{1}{N} \sum_1^N A_i(t) \right) \quad (10)$$

클러터 제거는 Down-track 방향으로 $A(t-n)$ 부터 $A(t)$ 동안 획득한 n 개의 A-scan 데이터로부터 각각 element의 평균을 구해, $A(t)$ 에서 제거함으로써 처리한다. 이를 수식 (11)에 보인다. 처리 전과 처리 후의 단 채널 영상을 그림 11에 보인다.

$$A_p(t) = \left(A(t) - \frac{1}{n} \sum_1^n A(t-i) \right) \quad (11)$$

깊이에 따라 전달되는 에너지량이 상이하기 때문에 이를 보상할 수 있는 방법이 요구되고, 기존 연구는 거리모델에 따른 특징하게 정해진 상대이득 값을 보상하는 방식으로 접근한다^[10]. 그러나 이 방식은 잡음 역시 증가하는 문제가 있고, 매질에 따라서 보상해야 할 이득이 재계산되어야 하는 단점을 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 윈도우시간(Window time) 동안에 각 깊이에서의 평균잡음전력 크기를 계산하고, 평균 잡음전력 대비 $SNR_{required}$ dB 이상을 윈도우 시간 내에 존재하는 값들로부터 적응적 임계치(threshold)를 계산하고, 임계치 이상의 신호만을 검출하는 방식으로 처리한다. 또한, 신호처리 편리성을 위해 임계치 이하의



(a) 처리전 (a) before processing
(b) 처리후 (b) after processing

그림 11. DC offset 및 클러터 제거 처리 영상
Fig. 11. Landmine image after removing DC offset and clutter.

값은 0으로 sparse 처리한다. 이를 수식 (12), (13) 및 (14)에 보인다. 처리 결과를 그림 12에 보인다.

$$Ap(t) = 10 \times \log_{10} A(t) \times A(t) \quad (12)$$

$$threshold(t) = \frac{1}{n} \sum_1^n Ap(t-i) + SNR \quad (13)$$

$$\text{if } Ap_n(t) < threshold_n(t), Ap_n(t) = 0 \\ \text{else, } Ap_n(t) = Ap_n(t) - threshold_n(t) \quad (14)$$

48채널을 합성하여, Gaussian Smoothing Filter를 적용한, TOP view 영상을 생성한다. 지뢰가 존재할 가능성이 높은 영역이 더 많은 에너지가 수신됨을 고려하여, Hough transform을 통한 peak 검출법을 적용해서 추정 점들을 찾아낸다. 이를 그림 13에 보인다.

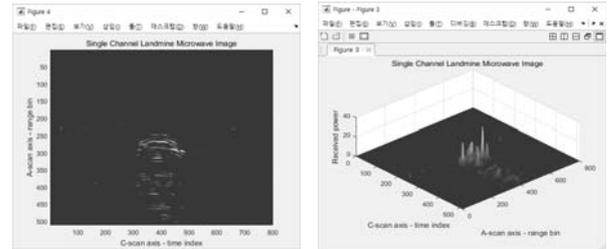
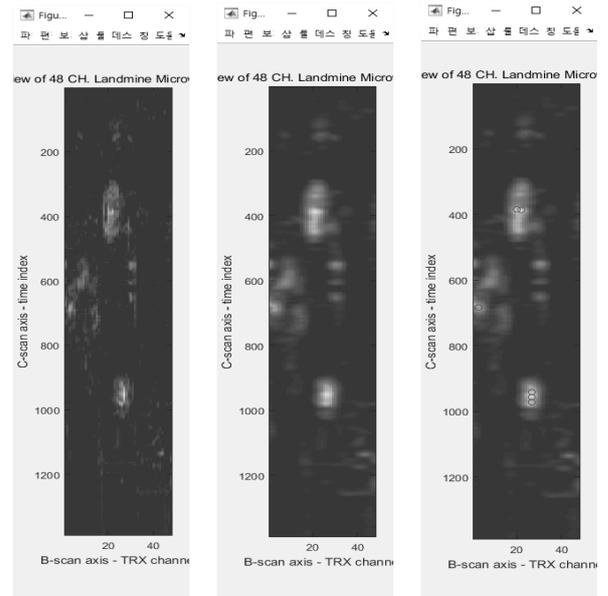


그림 12. 깊이에 따른 임계치 설정 및 Sparse 처리
Fig. 12. Sparse processing by adaptive threshold level.



(a) 필터링 전 (a) before filtering
(b) 필터링 후 (b) after filtering
(c) 피크검출 (c) Peak detection

그림 13. 합성된 Top view 영상 필터링 및 피크 검출
Fig. 13. Filtering the top view image and detecting peaks.

찾아진 peak들 간의 거리를 계산하고, 지뢰의 크기를 고려한 임계치를 설정하고, peak를 군집 분류처리한다. 군집 분류 후에 군집 내에 있는 점들의 평균좌표를 계산해, 중심을 추정한다. 추정된 좌표를 기준으로 16 by 256 크기의 이미지로 분할(Segmentation)한다. 분할된 이미지는 다음 그림 14와 같으며, (a) 및 (b)는 실제로 지뢰가 매설된 곳의 추정 영상이며, (c)는 지표 아래 돌 등에 의해서 발생한 클러터 영상이다.

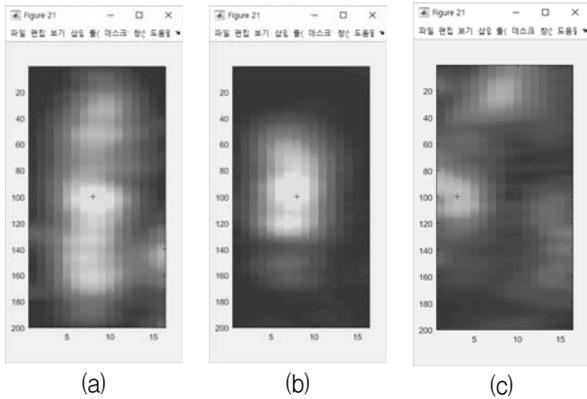


그림 14. 분할처리된 지뢰 추정 영상
Fig. 14. Estimated landmine images by preprocessing.

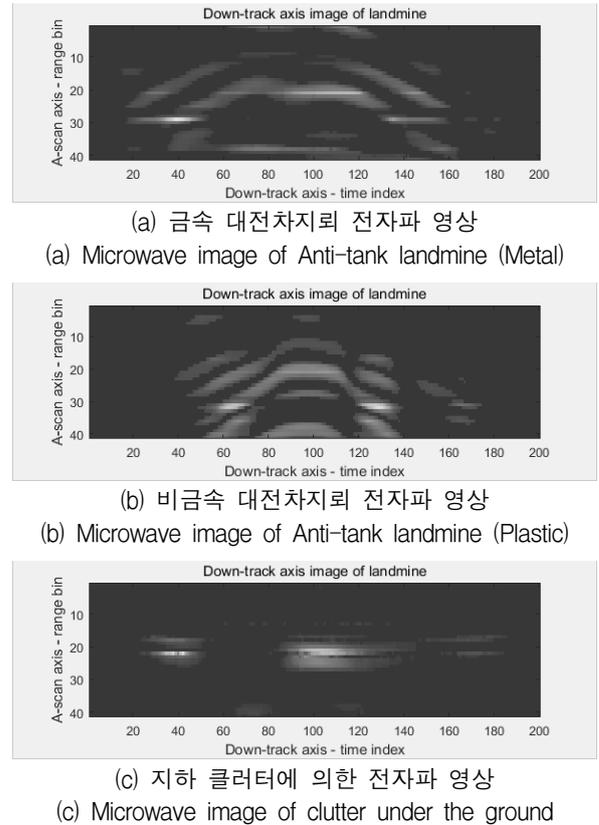


그림 16. 추정된 지뢰위치에서의 분할 처리된 이미지
Fig. 16. Segmented images at the estimated position of landmine.

앞 절 그림 14에서 찾아진 3개의 지뢰 추정 영상으로부터 지뢰여부를 판단하기 위해서는 Down-track 방향으로 영상을 탐색한다. 이를 위해서는 앞 절에서 찾은 Hough transform으로부터 찾은 peak의 Cross-track 인덱스 및 Down-track 인덱스 정보를 활용해, 탐색해야 할 채널 영상 및 지점을 선택한다. 선택된 지점의 A-scan 데이터로부터 peak를 찾고, 해당 지점에서 이미지를 분할한다. 이를 포함한 전체 신호처리 과정을 그림 15에 보이고, 최종 지뢰 추정영상 정보를 그림 16에 보인다.

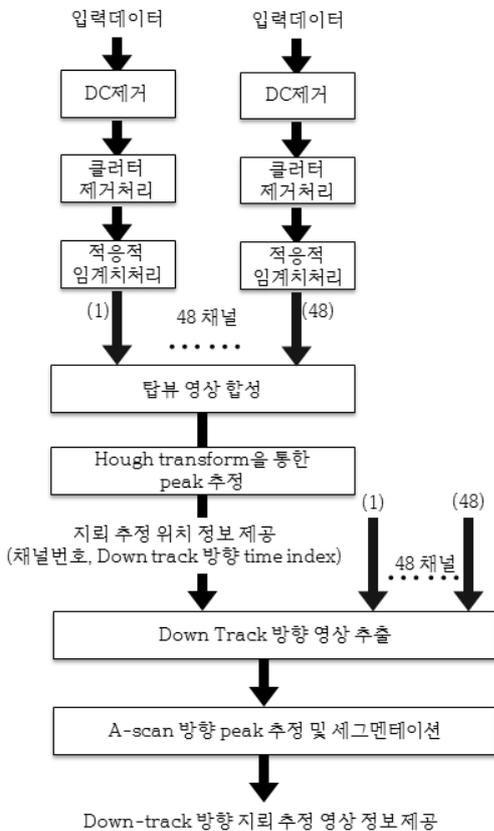


그림 15. 48 채널 배열 임펄스레이더방식 지면투과레이더
Fig. 15. Ground penetrating radar using 48 channel UWB.

IV. 시험 및 분석

시험은 전용 실내시험장에서 수행하며, 자동화된 측정 장비에 구현한 투과레이더를 장착하여 측정한다. 이를 그림 17에 보인다. 토양은 한국 대부분의 지형에서 관찰되는 사양토를 사용하였고, 지름 5cm 수준 이하의 돌을 포함하고 있다. 크기는 가로×세로×깊이 기준 00m×00m×2m 로 조성되었다. 이를 그림 18에 보인다.



그림 17. 구현한 지면투과레이더 및 자동화된 측정 설비
Fig. 17. GPR system and Automatic measurement facility.

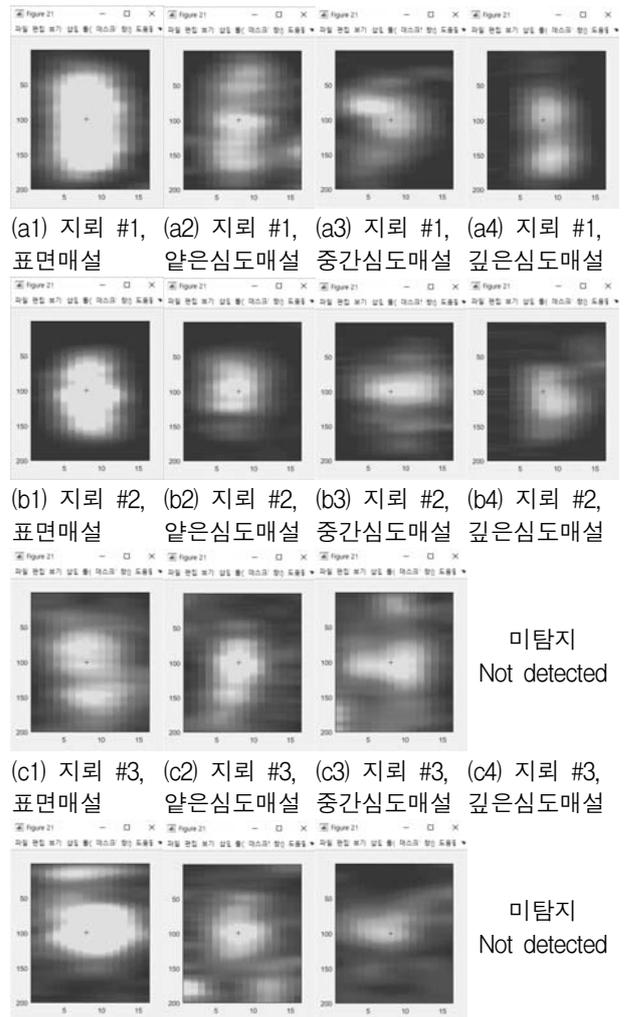


그림 18. 사용된 거친 사양토 (한국 대표토양)
Fig. 18. Used rough sandy loam (Korean representative soil).

시험에 사용된 지뢰는 대전차지뢰와 대인지뢰로 구분하고, 재질에 따라서 금속과 비금속 지뢰로 구분한다. 시험방법은 실 지뢰와 동일한 모형인 지뢰 #1(대전차/금속), 지뢰 #2(대전차/비금속), 지뢰 #3(대인/비금속) 및 지뢰 #4(대인/금속)를 각각 표면, 얇은 심도, 중간 심도 및 깊은 심도에 매설하고, 지뢰 전자파 영상을 획득 및 합성한다. 본 논문에서 심도는 표면부터 최대탐지심도를 분할하여 표기한 ‘표면, 얇은, 중간 및 깊은’이란 용어로 대체하여 표현한다.

48채널 합성된 탐류 영상으로부터 Hough peak 검출법을 적용해 분할 처리된 Top view 지뢰 전자파영상과 위치정보(채널번호, Down-track time index)를 찾는다. 이를 그림 19에 보인다. 추정된 위치정보를 통해 채널을 선택하고, 선택된 채널의 Down-track 방향 영상으로부터 Down-track time index 지점에서의 A-scan 방향의 지뢰 신호를 탐지해, 분할 처리된 지뢰 영상을 제공한다. 이를 그림 20에 보인다.

시험결과 대전차지뢰인 지뢰#1 및 지뢰#2의 경우 깊은 심도 내에 매설된 지뢰까지 탐지되었고, 측정된 영상이 클러터와의 구분이 용이한 형태 및 강도를 보였



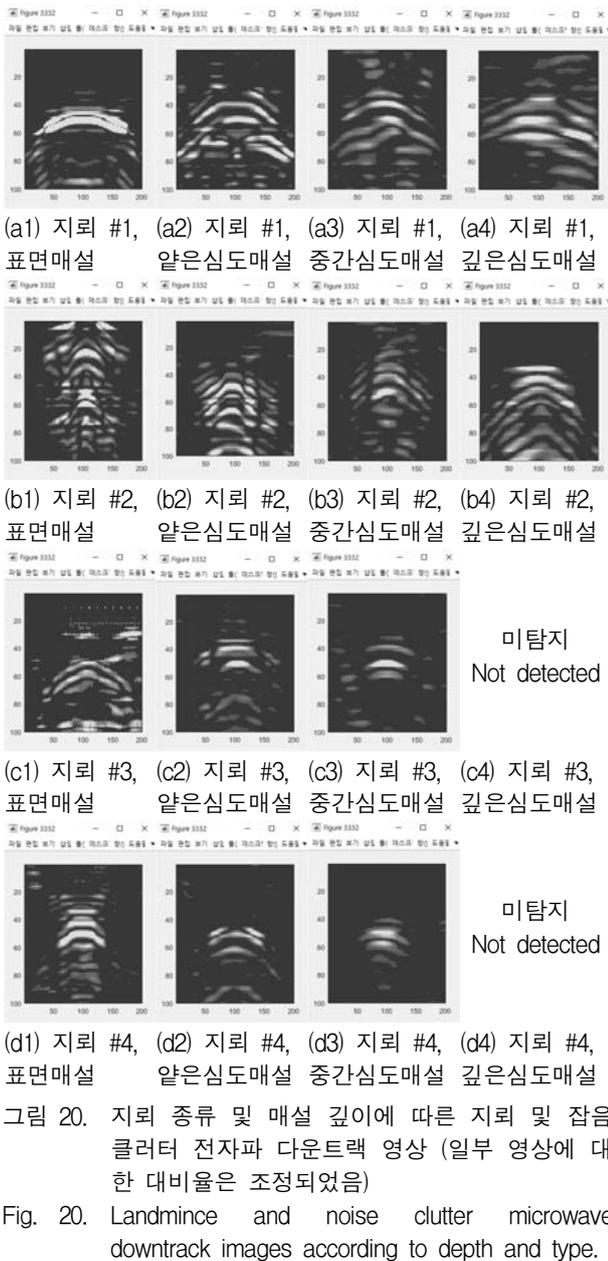
(a1) 지뢰 #1, (a2) 지뢰 #1, (a3) 지뢰 #1, (a4) 지뢰 #1, 표면매설 얇은심도매설 중간심도매설 깊은심도매설
(b1) 지뢰 #2, (b2) 지뢰 #2, (b3) 지뢰 #2, (b4) 지뢰 #2, 표면매설 얇은심도매설 중간심도매설 깊은심도매설
(c1) 지뢰 #3, (c2) 지뢰 #3, (c3) 지뢰 #3, (c4) 지뢰 #3, 표면매설 얇은심도매설 중간심도매설 깊은심도매설
(d1) 지뢰 #4, (d2) 지뢰 #4, (d3) 지뢰 #4, (d4) 지뢰 #4, 표면매설 얇은심도매설 중간심도매설 깊은심도매설

그림 19. 지뢰 종류 및 매설 깊이에 따른 지뢰 및 잡음 클러터 전자파 탐류 영상 (일부 영상에 대한 대비율은 조정되었음)

Fig. 19. Landmine and noise clutter microwave topview images according to depth and type.

다. 한편, 상대적으로 크기가 작은 지뢰 #3 및 지뢰 #4의 경우는 중간 심도 내의 매설된 지뢰까지 탐지되었다. 지뢰탐지 시험은 전용 실내 시험장 환경 조건을 따른다. 환경 조건이 상이할 경우 탐지심도에 영향을 받을 수 있다.

개발된 시스템은 클러터영상과 지뢰영상과의 확연한 차이를 통해 지하 내 매설된 지뢰 의심 물체를 찾는 데 효과적으로 활용할 수 있다. 또한 신호 강도에 의존한 단순 임계치 비교 방식으로 지뢰의 유무를 알려주는 기존 재래식 무기에 비해, 지하 내부를 시각적 정보로 살펴볼 수 있어 내부의 형태 등을 복합적으로 판단할 수 있는 장점을 갖는다.



IV. 결론 및 향후연구

본 논문은 지뢰탐지용 48채널 배열 UWB 임펄스 레이다의 시스템, 하드웨어, 신호처리 및 시험/분석에 관해 기술하였다. 특히 기준 성능을 분석하기 위해 한국 대표 토양을 사용한 전용 실내 시험장 내에서 시험을 수행하였고, 비무장 지대에 매설된 지뢰와 동일한 모형 지뢰를 매설하여, 지뢰 전자파 영상을 획득하였다. 획득 결과 본 논문 시험조건 기준으로 지뢰 #1(대전차/급속)과 지뢰 #2(대전차/비급속)의 경우 깊은 심도까지 탐지되었고, 지뢰 #3(대인/비급속)과 지뢰 #4(대인/급속)의 경우 중간 심도까지 탐지됨을 분석하였다. 또한 채널별

로 획득한 데이터를 처리해 48채널 영상을 합성하고, 합성된 영상을 처리해 지뢰 위치정보를 추정하였다. 추정된 위치 정보를 활용하여 Down-track 방향의 분할된 지뢰 상세 이미지를 제공토록 처리하였다.

향후 시스템 성능 안정화를 위해, 많은 수의 시험 데이터를 획득할 예정이며, 패턴인식 기반 분류알고리즘을 적용해 Down-track 방향의 지뢰 상세 이미지를 분류처리토록 개발할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문의 신호처리 및 분석에 대한 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업 (10063267)의 지원에 의해 이루어졌음.

REFERENCES

- [1] Korea Legislation Research Institute, A Study on Making Law on Landmine Removal Project for Private Businesses, 2007
- [2] Gooneratne, C. P., S. C. Mukhopahyay, and G. Sen Gupta. "A review of sensing technologies for landmine detection: Unmanned vehicle based approach." Proceedings of the 2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents, Palmerston North, New Zealand. 2004.
- [3] Siegel, Rob. "Land mine detection." Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE 5.4, pp. 22-28, 2002
- [4] MacDonald, Jacqueline, et al., *Alternatives for landmine detection*, No. RAND/MR-1608-OSTP. RAND CORP SANTA MONICA CA, 2003.
- [5] Ivashov, S. I., et al. "A review of the remote sensing laboratory's techniques for humanitarian demining." Proceedings of the International Conference on Requirements and Technologies for Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, Brussels, Belgium. Vol. 1. 2003.
- [6] Daniels, David J., *Ground penetrating radar*, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [7] Yarovoy, Alexander G., et al. "UWB array-based sensor for near-field imaging." Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on 55.6, pp. 1288-1295, 2007
- [8] Yarovoy, Alexander, et al. "UWB array-based radar for landmine detection." Radar Conference, 2006. EuRAD, 2006.

[9] González-Huici, María A., Ilaria Catapano, and Francesco Soldovieri. "A comparative study of GPR reconstruction approaches for landmine detection." *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of 7.12*, pp. 4869-4878, 2014

[10] Ji-Hoon Kwon, Dong-Hyun Kim, Seung-Hoon Han, "Research to synthesize landmine GPR

image using UWB impulse signal", *IEIE Conference 2014*, pp. 466-467, 2014.6

[11] Savelyev, Timofey, Alexander Yarovoy, and Leo Ligthart. "Experimental evaluation of an array GPR for landmine detection." *Microwave Conference, 2007. European. IEEE, 2007.*

[12] Jol, Harry M., ed. *Ground penetrating radar theory and applications*. elsevier, 2008.

저 자 소 개



권 지 훈(정회원)
 2004년 충남대학교 정보통신공학부
 전기전자전과 학사 졸업
 2007년 광주과학기술원 기전공학과
 석사 졸업
 2015년~현재 서울대학교 융합과
 학기술대학원(지능형 융
 합시스템) 박사 과정

2007년~현재 한화시스템 레이더연구소 근무
 <주관심분야 : 레이더시스템, 인지형 레이더, 머
 신러닝 및 패턴인식>



한 승 훈(정회원)
 1999년 경희대학교 전자공학과 졸업
 2001년 경희대학교 전자공학과 석사
 졸업
 2201년~현재 한화시스템 레이더
 연구소 전문연구원

<주관심분야 : 레이더 시스템, 영상 레이더 신호
 처리>



박 노 준(정회원)
 1997년 서울대학교 전기컴퓨터공학
 학사 졸업
 1999년 서울대학교 전기컴퓨터공
 학부 석사 졸업
 2003년 서울대학교 전기컴퓨터공
 학부 박사 졸업

2006년 9월~2007년 2월: 서울대학교 정보기술사
 업단 BK조교수
 2007년 3월~2013년 8월: 아주대학교 전자공학부
 조/부교수
 2013년 9월~현재: 서울대학교 융합과학기술대학
 원 부교수
 <주관심분야 : 패턴인식, 머신러닝, 컴퓨터비전>



윤 여 선(정회원)
 1995년 연세대학교 전기공학과
 학사 졸업
 1997년 University of Michigan
 전기공학과 석사 졸업
 2004년 Georgia Tech
 전기공학과 박사 졸업

<주관심분야 : 배열 신호처리, 레이더 신호처리
 UWB 신호처리>



하 성 재(정회원)
 2001년 광운대학교 대학원 전파
 공학과 졸업(공학석사)
 2006년 광운대학교 대학원 전파
 공학과 졸업(공학박사)
 2006년~2009년 삼성탈레스(주)
 전문연구원

2010년~2011년 VMASC(미국) 초빙연구원
 2011년~2014년 (주)엘아이씨티 기술이사
 2014년~현재 한국폴리텍대학정보통신시스템
 조교수
 <주관심분야 : 레이더 시스템, M/W 고출력>



양 동 원(정회원)
 2001년 서울대학교 전기공학부
 학사 졸업
 2003년 서울대학교 전기·컴퓨터공
 학부 석사 졸업
 2016년 한국과학기술원(KAIST)
 전기및전자공학부 박사 졸업

<주관심분야 : 영상 신호처리, 레이더 신호처리,
 패턴인식>