

근거리 고해상도 레이더 센서 칩 기술 동향

Short-Range High-Resolution Radar Sensor Chip Technology

박필재 (P. Park) RF/Analog SoC연구실 선임연구원
 김성도 (S. Kim) RF/Analog SoC연구실 책임연구원
 우성철 (S. Woo) RF/Analog SoC연구실 연구원
 김천수 (C. Kim) RF/Analog SoC연구실 실장

임베디드 소프트웨어 & 시스템 반도체 기술 특집

- I. 서론
- II. 레이더 센서 기술소개
- III. 근거리 고해상도 레이더 센서 칩
- IV. ETRI CMOS 레이더 센서 칩
- V. 결론

* 본고에 소개된 한국전자통신연구원의 레이더 칩기술은 민군과제(UM11018RD1) 수행의 결과물임.

본고에서는 의료용, 보안용, 정밀거리 측위 등 다양한 분야에 응용이 가능한 근거리 고해상도 레이더 칩 기술에 대하여 소개한다. 먼저 근거리 고해상도 레이더 칩의 대표적인 구조와 동작원리에 대하여 기술하고 상용제품, 최신 논문에서 발표된 레이더 칩에 대하여 소개하였다. 고해상도를 얻기 위한 짧은 펄스 폭(나노초, 십억분의 1초)을 가지는 펄스를 송신하고 목표물을 맞고 되돌아온 에코 펄스를 고해상도로 수신하여 복원된 펄스로부터 얻어지는 거리정보로부터 신호처리 과정을 거쳐 고도화된 응용 분야에 따른 부가적인 정보를 얻는다. 수신기는 상관(correlation)법에 의한 수신 방식과 샘플링(sampling)에 의한 수신 방식으로 크게 나눌 수 있다. 끝으로 한국전자통신연구원에서 개발 중인 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 기술을 이용한 근거리 레이더 칩의 목표 성능, 구조, 설계 및 측정 결과에 대하여 소개하였다.

I. 서론

적기의 침투나 로켓 발사를 탐지하는 장거리 군사 레이다에서부터 자동차 충돌방지 레이다 시스템, 인체의 활동을 모니터링하는 용도의 레이다에 이르기까지 레이다 센서는 매우 다양한 응용 분야를 가진다. 특히 비약적으로 발전하는 집적회로 제조 기술에 힘입어 레이다 센서를 단일칩의 IC로 구현할 수 있게 되었으며, 복잡한 신호처리를 구현할 수 있는 프로세서 기술과 결합하여 미래의 스마트 센서로서 다양한 분야에 적용될 것으로 기대된다.

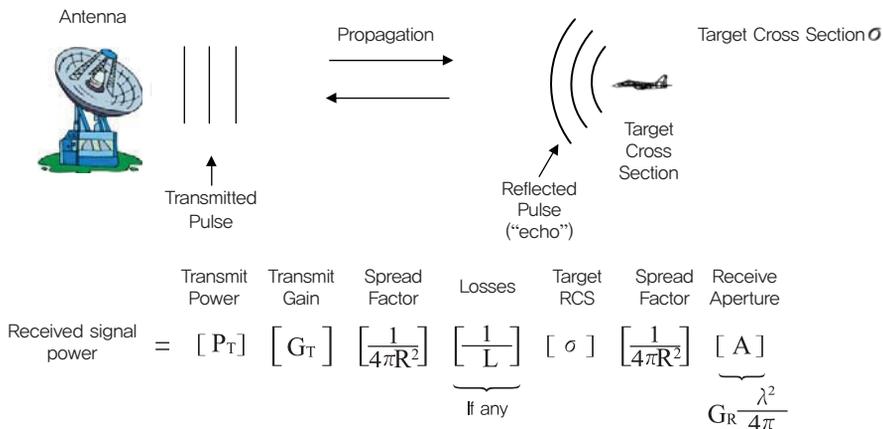
본고에서는 근거리 고해상도 레이다 센서 칩에 대하여 소개한다. 먼저 ‘근거리의’ 라는 공간적인 제한은 사람 중심의 반경으로 본고의 레이다에서는 대개 10m 이내의 거리를 의미하나 응용 분야에 따라 레이다 탐지거리를 늘일 필요가 있는 경우 비교적 어렵지 않게 거리를 늘일 수 있다. 레이다에서 요구되는 고해상도는 레이다가 얻으려는 정보 및 응용 분야와 밀접한 관련이 있다. 예를 들어 근거리 고해상도 레이다 센서 칩을 이용한 사람의 호흡 측정 시스템의 경우 호흡율의 정보를 얻기 위하여 호흡으로 변화하는 흉부의 움직임(수 cm)을 측정해야 하므로 레이다의 해상도가 센티미터 이하여야 한다. 이러한 응용에 이동될 수 있는 고해상도 레이다의

동작원리로 짧은 펄스 폭(나노초, 십억분의 1초)을 가지는 펄스를 송신하고 목표물을 맞고 되돌아온 에코 펄스를 고해상도로 수신하여 복원된 펄스로부터 얻어진 거리정보로부터 신호처리 과정을 거쳐 응용 분야에 따른 부가적인 정보를 얻는다. 수신기의 원리는 상관관계(correlation)에 의한 수신 방식과 샘플링(sampling)에 의한 수신 방식으로 크게 나눌 수 있다.

먼저 레이다 센서 기술에 대한 전반적인 소개를 하고 상용제품과 최신 논문에 발표된 레이다를 소개한다. 한국전자통신연구원(ETRI)에서 개발 중인 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 레이다 칩에 대하여 구조, 성능 등을 소개하고자 한다.

II. 레이다 센서 기술 소개

레이더 센서 기술은 전자기파를 송신하여 목표물로부터 반사되어 온 에코 신호를 수신하여 목표물의 정보를 얻는 기술이다. 레이다(Radio Detection And Ranging: RADAR)는 그 용어 자체가 의미하듯이 목표물까지의 거리(range), 고도, 방위 및 속도 등의 정보를 얻을 수 있다. 1900년 초에 원리가 탐구되었고 1940년대 세계 2차 대전을 거치며 비약적인 기술의 진보가 있



(그림 1) 레이다의 원리와 레이다 방정식

있다[2]. 레이더의 원리는 레이더 방정식에 의해 잘 이해될 수 있다. (그림 1)은 레이더 방정식과 이를 도시한 그림이다. 송신기가 지향성(directivity)을 가지는 송신 안테나로 목표물이 있는 방향으로 송신전력 P_T 를 가지는 전자기파를 방사하면 거리 R 떨어진 목표물을 맞고서 안테나 방향으로 다시 에너지를 방사하게 된다. 입사파에 대한 반사파의 비로 정의한 RCS(Radar Cross Section)값을 곱하면 방사 에너지를 얻을 수 있다. 이 방사된 에코파는 수신기에 안테나에 수신되며 이때 수신전력이 위에 열거한 파라미터에 의하여 결정된다.

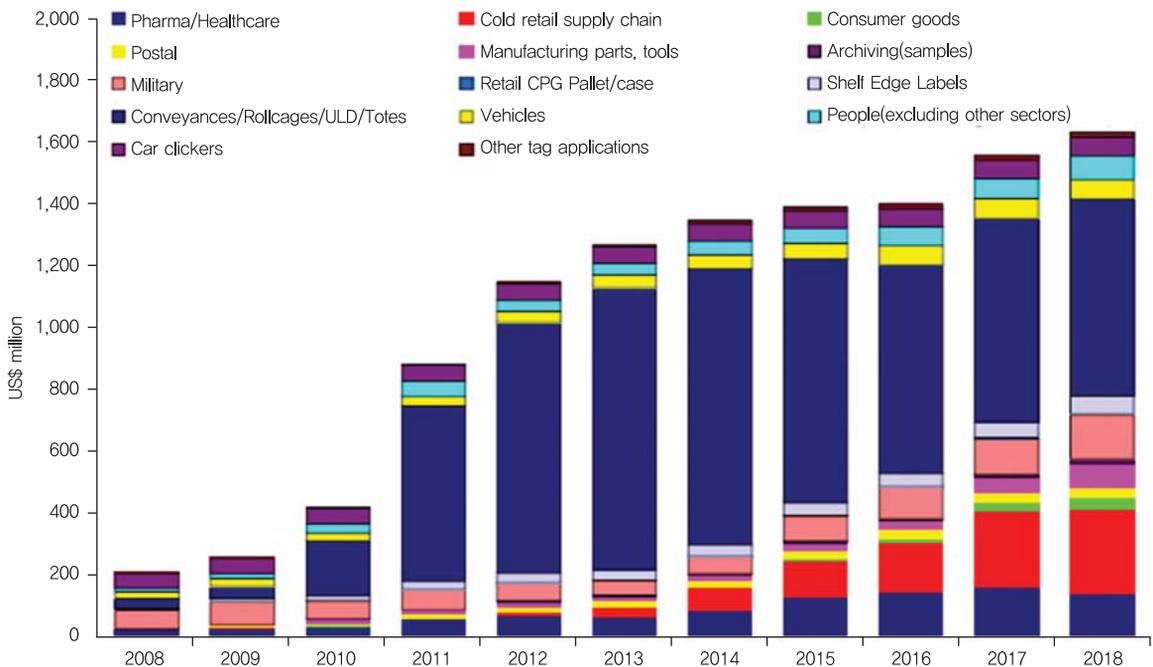
레이더 센서 칩 기술은 레이더 구현에 관한 기술로 집적회로 설계 기술을 이용하여 레이더를 칩으로 구현하는 기술이다. 큰 전력이 필요한 장거리 레이더의 경우 TWI(Traveling Wave Tube)에 의존하여 반도체 기술을 이용하는 데 한계가 있지만 최근 고전력 반도체(예: GaN)가 개발되고 파운드리 서비스를 제공함(예: TriQuint)에 따라 비교적 저전력(수 W)의 경우 반도체를 이용한 송

신기를 구현할 수 있다. 또한 고전력이 요구되지 않는 분야의 경우 화합물(예: GaAs) 반도체에서 집적화에 우수한 실리콘 기반의 반도체에서도 레이더를 구현하는 추세이다. 이러한 레이더를 적용하여 능동형 RF 태그를 구현할 수 있는데 이 시장 전망 예측치를 (그림 2)에서 보여주고 있다.

III. 근거리 고해상도 레이더 센서 칩

1. CMOS 레이더 칩 및 구조

근거리 고해상도 레이더 칩이 최근에 CMOS 기술로 개발되기 시작하였다[3]-[5]. 이들 레이더의 송신기는 수 나노초(10억분의 1초)에서 나노 이하의 펄스 폭을 가지는 짧은 펄스를 반복 송신하는 송신기를 포함하고 있다. 이들은 주파수 영역에서 관찰하면 특정전송 주파수에 넓은 대역폭을 가지는 신호 특성을 보여준다. 따라서

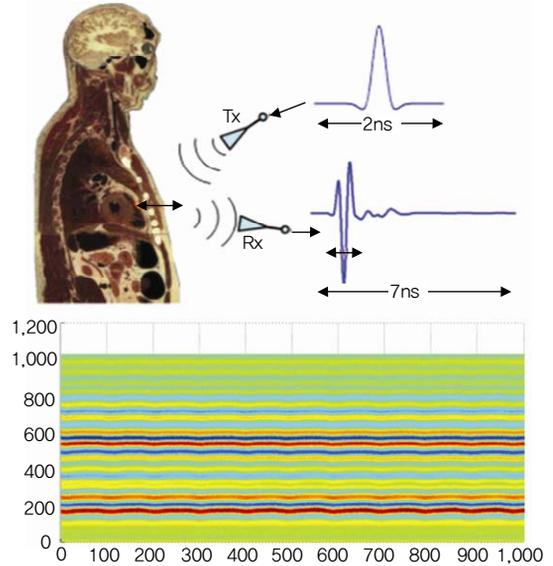


<자료>: IDTechEx Ltd, "Active RFID and Sensor Networks," 2008.

(그림 2) UWB 기술 이용 가능한 능동형 RF 태그 시장 전망

UWB(Ultra-Wideband) 레이더라 지칭하기도 한다[6]. 짧은 펄스를 발생하는 방식은 크게 디지털 로직 게이트(logic gate)의 지연 특성을 이용하여 이들 지연을 조절하여 원하는 펄스 형태를 만드는 방식이 있다[7]. 이 방식은 디지털로 파형을 재구성할 수 있는 특징이 있다. 또 다른 펄스 생성 방식으로는 특정 주파수로 발진하는 전압제어 발진기에 구형파를 곱하여 레이더의 송신 펄스를 생성할 수 있다. 전압제어 발진기와 구형파를 조절하여 원하는 펄스 형태를 만들 수 있으며, 스펙트럼 마스크 내로 PSD(Power Spectral Density)를 조절할 수 있는 장점이 있다[8]. 수신기는 나노초 이하의 짧은 펄스를 복원하여야 하므로 나이퀴스트(Nyquist) 샘플링 이론에 따라 수 GHz 이상의 고속 ADC(Analog Digital Converter)가 필요하게 된다. 예컨대, 해상도가 높아져 약 100psec의 시간 간격(cm의 해상도)으로 샘플링이 필요할 경우 10GHz 이상의 샘플링이 요구되어 전력소모 등을 고려하면 집적회로 기술로 쉽게 구현하기가 힘들다. 임의의 비트 스트림(bit stream)을 복원하는 통신 방식에 비하여 레이더 기술은 항상 일정한 간격인 PRF(Pulse Repetition Frequency)로 펄스가 송신되고 있고 목표물의 움직임이 PRF에 비하여 매우 느린 특징이 있다. 이러한 특징을 이용하여 고속의 나이퀴스트 샘플링하지 않고 레이더의 에코 펄스를 복원하는 방식이 적용되고 있다[3],[4],[8]. 이들 샘플링 방식의 수신기는 목표물을 맞고 돌아온 에코 펄스를 복원함에 있어서 여러 번의 송신 펄스를 송신하여 이 수신 결과로부터 에코 펄스를 복원하는 방식을 사용하고 있다.

이러한 방식 외의 수신 방식으로 상관관계에 의한 수신 방식을 들 수 있다. 즉, 수신기가 송신기의 펄스 모양을 알고 있으므로 이 기준값(template)을 이용하여 에코 펄스의 상관관계 값을 구하여 이 값이 최대가 되는 지점으로부터 목표물의 거리를 추정하는 방법이다[5]. 하지만 이러한 방식의 구현은 고해상도 수신기를 구현하기에 단점이 있다. 첫째로 송신기에서 발생하는 펄스는



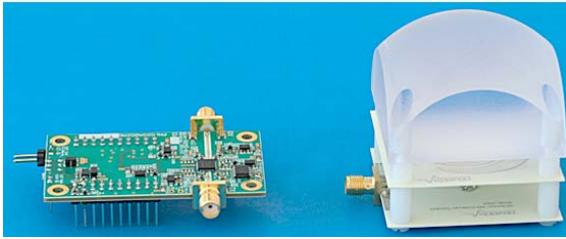
(그림 3) 근거리 고해상도 레이더 칩을 이용한 인체신호 측정의 예

칩, 패키지, PCB 보드, 안테나 등의 불연속 지점을 거치면서 펄스가 왜곡이 된다. 아울러 안테나는 시간 영역에서 미분기의 전달함수(transfer function)의 특징을 가져 파형을 또 다시 왜곡시킨다. 또한 목표물의 구성 물질이 매질 특성이 다른 물질이 층으로 되어 있을 경우(예: 인체의 경우 피부, 피하지방, 근육, 뼈 등으로 구성) 따라 각층에서 반사/투과되는 펄스의 총합으로 반사파가 결정되어 상관관계의 기준펄스와는 매우 다른 에코 펄스를 예상할 수 있다(그림 3) 참조. 따라서 이러한 방식을 적용하는 레이더 펄스의 경우 비교적 제한된 응용 분야를 가지게 되며 고해상도 구현에 어려움이 있다.

2. 상용 레이더 칩 및 방식

본고에서는 두 가지 근거리 고해상도 레이더 상용 칩 기술의 특징에 대하여 소개하고자 한다.

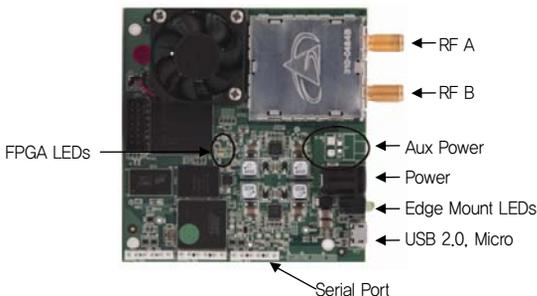
90nm CMOS 기술로 개발된 N사의 제품은 좁은 시간 간격으로 에코 펄스를 샘플링하여 높은 해상도(30Gs/s)의 수신기를 특징으로 한다[9]. (그림 4)는 N사의 레이더 제품을 보여준다. 송신기는 디지털 재구성이 가능한



(그림 4) 90nm CMOS 레이더 칩을 이용한 상용 레이더 센서 보드 및 안테나[8]

디지털 로직게이트를 이용한 방식으로 알려져있다. 인버터 체인으로 구성된 지연 라인을 이용하여 좁은 간격의 샘플링 클록을 수신기에 이용하였으며 비교기의 기준전압을 이동하면서 고정 레인지에서 반복 수신하여 정확도를 높였다. 다양한 응용 분야를 소개하고 있는데, 호흡/심박 측정, 눈 두께 관측 등의 예를 볼 수 있다.

T사의 제품은 UWB 통신과 레이더 기술을 같이 구현하고 있다. 거리를 찾는 방식도 단일 레이더 센서로 구성된 송수신기에서 펄스를 송신하고 목표물로부터 되돌아온 에코 신호를 수신하는 방식과, 2-way 방식을 사용하여 송신단에서 요청(request)하면 이로부터 반응(respond)하는 수신단의 쌍으로 송신단과 수신단 사이의 거리를 전파의 time of flight로부터 얻을 수 있는 다양한 방법을 제공한다[10]. (그림 5)는 T사의 레이더 제품을 보여준다. BiCMOS 기술을 적용하여 칩을 개발하는 것으로 알려져 있다. 거리를 측정하는 기본적인 레이더의 응용에서부터 칩 간의 통신이 가능한 장점을 이용



(그림 5) T사의 레이더 센서 보드[9]

하여 전자 울타리를 구성하여 보안용에 적용이 가능하도록 하였다. 특히 고전력 방사(FCC 규정 미적용)의 경우 80m까지의 거리를 얻을 수 있다고 한다.

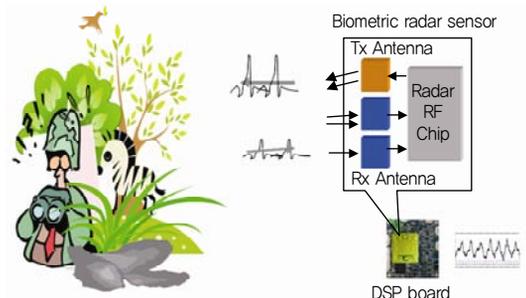
IV. ETRI CMOS 레이더 센서 칩

1. 개발목표

한국전자통신연구원에서 개발하는 CMOS 레이더 센서는 임펄스 방식을 사용하여 인체 및 생체에 의해 반사된 미약한 전파 신호의 파형을 탐지하여 이로부터 기인한 위치 변화를 검출하는 방식을 사용하고 있다. 레이더 센서의 주요 구성은 송/수신기와 검출된 신호에서 표적을 탐지 및 식별하기 위한 신호처리용 DSP 등으로 구성된다.

주요 연구내용은 초광대역/저전력의 매우 좁은 펄스를 송신하고 정밀한 해상도로 수신 펄스 신호를 복원하기 위한 임펄스 레이더용 RF 송수신 칩셋 개발과 수신된 레이더 신호로부터 클러스터 제거, 움직이는 물체에 대한 특징 수집(속도), 자세 추정(걸음걸이) 그리고 정지한 물체의 특성(호흡) 등을 추정하는 레이더 신호처리 알고리즘 개발이 이루어지고 있다.

(그림 6)은 ETRI에서 개발 중인 레이더 센서 칩을 이용한 시스템 응용 예를 보여준다. 군용으로 개발 중인 감시정찰 센서 네트워크의 레이더 센서로 활용하여 야



(그림 6) ETRI CMOS 레이더 칩을 이용한 시스템 군용 감시 정찰망

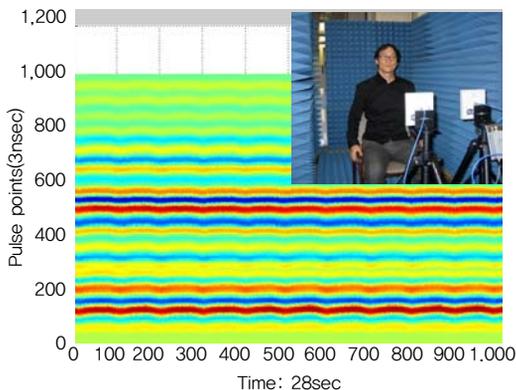
간 및 안개 등의 상황에서 감지 대상물에 대한 정보를 제공할 수 있다[11].

2. ETRI CMOS 센서 레이더 칩

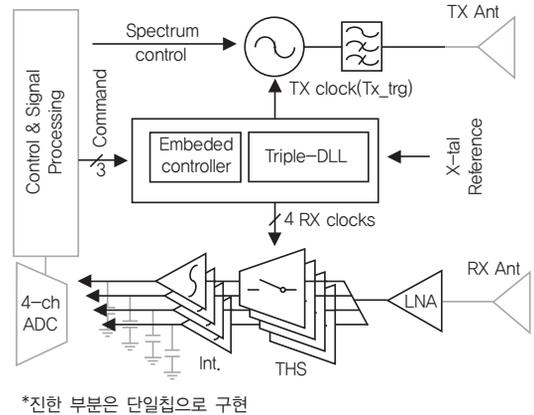
레이더 센서 칩 개발을 위하여 환경에 대한 민감성 CMOS로 구현 시 레이더 블록의 요구 규격 및 신호처리 기술 평가를 위하여 상용제품을 기반으로 적합성(feasibility) 연구가 선행되었다. (그림 7)은 실내 전파차단 환경에서 사람에 대한 측정 결과를 보여준다. 약 28초 동안의 펄스를 1,000개 수집하였으며 각각의 펄스는 3ns를 1,024개의 단위로 나누어 수신하였다. (그림 7)에서 보이는 물결파형은 목표물인 사람의 흉부 및 복부의 움직임에 기인한 결과이다. 따라서 이 정보로부터 호흡을 구하는 것이 가능하며 비교적 근거리 측정(1미터 이내)에서는 심장박동의 결과를 같이 얻을 수 있었다. 이는 펄스의 투과성에 기인한 것으로 설명된다.

ETRI에서 개발된 CMOS 레이더의 구조는 (그림 8)과 같다. 130nm의 CMOS 기술을 이용하여 제작되었으며 단일칩으로 송신기, 수신기 및 레이더 제어를 위한 디지털 로직이 온칩(on-chip)으로 구현되었다.

레이더의 동작원리는 앞서 설명한 샘플링 방식을 적

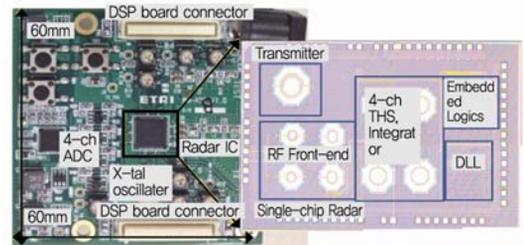


(그림 7) 상용 임펄스 레이더를 사용하여 인체 특성을 측정된 결과

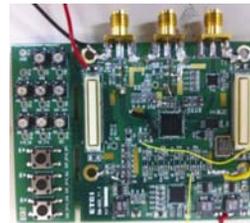


*진한 부분은 단일칩으로 구현

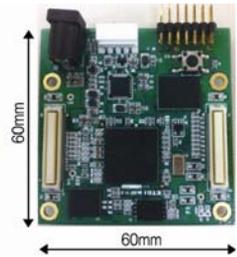
(a)



(b)



(c)

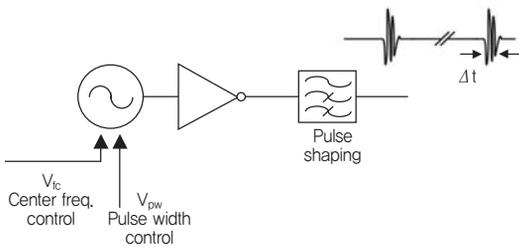


(d)

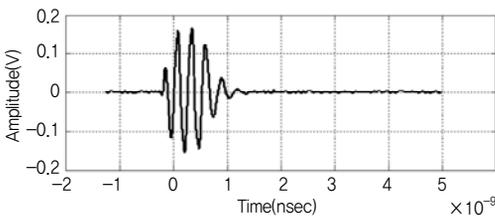
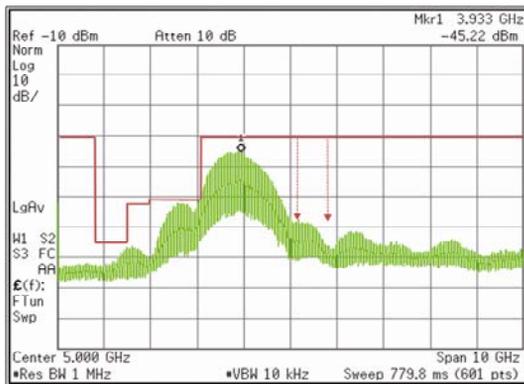
(그림 8) 레이더 송신기의 구조(a)와 제작된 ETRI 레이더 센서 칩을 이용한 레이더 보드(b) 군용 센서 노드에 적용하기 위한 레이더 보드(c)와 신호처리 보드(d)

용하였다. 송신기가 나노 이하의 폭을 가지는 임펄스를 송신하고 광대역 고속 샘플러를 채용한 수신기는 샘플링 클럭을 이용하여 입력 펄스를 수신 및 복원하게 된다. 이때 송신기를 트리거(trigger)하여 송신 펄스를 발생시키고 목표물로부터 에코 신호가 수신기에 수신되는 시간 간격에 의하여 레이더와 목표물 간의 거리(레이더 레인지)가 결정된다. 따라서 송신 펄스를 송신하는 송신

트리거 펄스와 수신기를 동작시키는 샘플링 클럭 간의 간격을 조절함으로써 레이더 레인지를 선택하여 수신할 수 있다. 이를 위하여 레이더는 DLL(Delay-Locked Loop)을 이용하여 레이더 동작에 필요한 클럭을 생성한다. DLL은 외부 기준 신호원(reference clock)의 입력으로부터 약 100psec 간격의 클럭을 생성할 수 있다. 수신기에 집적화된 로직블록으로부터 DLL의 클럭 중 수신기의 샘플링 클럭을 선택하여 레이더는 원하는 특정 범위의 수신 및 넓은 범위의 수신 및 반복 수신 등의 여러 가지 모드로 동작하게 된다.



(a)

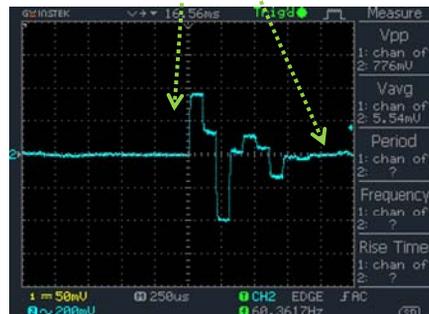
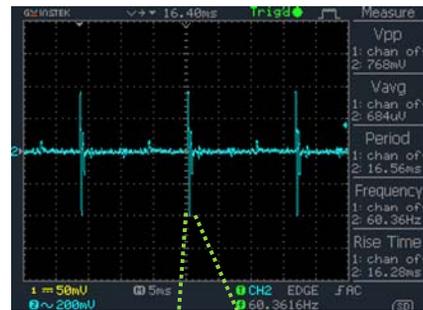


(b)

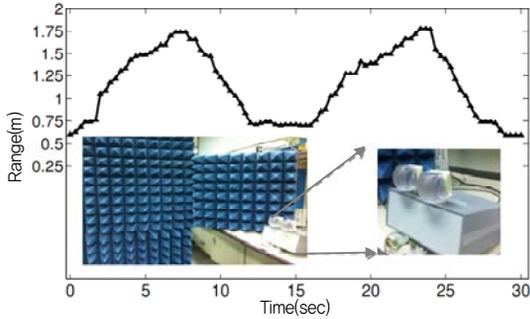
(그림 9) 레이더 송신기의 구조(a)와 시간 영역 및 주파수 영역 측정 결과(b) (패키지 상태 측정, PCB 및 cable의 손실 포함)

레이더 송신기는 입력 트리거 클럭을 받아 이 신호로부터 나노 단위의 펄스 폭을 가지는 임펄스 신호를 발생시킨다. 송신기의 임펄스는 펄스 폭 및 중심 주파수를 변경할 수 있는 구조로 되어 있어 원하는 스펙트럼 마스크(spectrum mask)에 위치할 수 있도록 할 수 있다. 송신기의 신호의 중심 주파수는 2.8~4.3GHz까지 변경시킬 수 있으며 펄스 폭은 수십 MHz~2GHz로 변화시킬 수 있다.

(그림 9)는 측정된 송신기 신호를 시간 영역과 주파수 영역에서 보여준다. 수신기는 저잡음 증폭단을 포함하는 프론트단과 이로부터 입력된 차동신호(differential)를 샘플링하기 위한 광대역 고속 샘플러(Track and Hold Sampler: THS), 클럭 생성기 및 적분기로 구성된다. 단일 프론트단으로부터 입력 신호를 4채널로 분리하여 수신하는 4-ch 구조를 가지고 있으며 각 채널에 약 100psec의 시차가 나는 클럭을 공급하여 각 채널 간에 센티미터의 레인지 차이가 나는 신호를 수신하였다.



(그림 10) 제작된 ETRI CMOS 레이더 칩의 수신기 측정 결과



(그림 11) ETRI CMOS 레이더를 이용한 실내 사람보행 움직임 측정 결과

(그림 10)은 송신 펄스를 수신하여 측정된 결과를 보여 준다. 그림 하단에서 계단파형처럼 보이는 것은 동일 레인지(송신 클럭과 수신 샘플링 클럭 간 동일한 시간 간격)에서 반복 수신 후 다음 레인지 수신으로 변경하였기 때문이다. 이렇게 함으로써 칩 내부에서 발생하는 랜덤 노이즈(random noise)를 억제하여 수신할 수 있다. (그림 11)은 실내환경에서 앞뒤로 움직이는 사람의 움직임을 추적한 궤적을 보여준다. 측정을 위하여 앞서 소개한 ETRI의 레이더 보드와 신호처리 보드가 실시간으로 동작으로 신호처리한 결과를 도시하였다.

V. 결론

본고에서는 다양한 분야에 적용이 가능한 근거리 고해상도 레이더 칩 기술의 최신 동향에 대하여 소개하였다. 근거리 고해상도 레이더 칩의 대표적인 구조와 동작 원리에 대하여 발표된 논문을 참조로 하여 설명하였으며, 대표적인 상용제품을 소개하여 시장에서 실제 사용되고 있는 레이더 칩을 소개하여 그 구조 및 특징에 대하여 비교 하였다.

한국전자통신연구원에서 개발 중인 CMOS 기술을 이용한 근거리 레이더 칩의 목표 성능, 구조, 설계 및 측정 결과에 대하여 소개하였다. 고해상도를 얻기 위한 짧

은 펄스 폭(수 나노초, 십억분의 1초)을 가지는 펄스를 송신하고 목표물을 맞고 되돌아온 에코 펄스를 고해상도로 수신하여 복원된 펄스로부터 얻어진 거리정보로부터 신호처리 과정을 거쳐 고도화된 응용 분야에 따른 부가적인 정보를 얻는다. 수신기는 상관(correlation)법에 의한 수신 방식과 샘플링(sampling)에 의한 수신 방식으로 크게 나눌 수 있다.

용어해설

레이더(radar) Radio detection and ranging 전자기파를 방출하여 목표물로부터의 에코를 수신하여 목표물을 검출하고 목표물까지의 거리 등의 정보를 얻는 전자기 센서

UWB 레이더 95%의 신호 에너지를 점유하는 대역폭이 전송 주파수와 비교하여 25% 이상을 차지하는 신호를 방사하는 레이더[5]

안테나 지향성(directionality) 안테나에서 방사되는 빔의 물리적 지향성을 의미하며 사방으로 동일하게 방사되는 전력에 대한 안테나를 통한 특정 방향의 방사전력의 비로 정의 됨. 안테나 이득을 효율로 나누어 구할 수도 있음.

약어 정리

ADC	Analog Digital Converter
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DLL	Delay-locked loop
GaN	Gallium Nitride
PSD	Power Spectral Density
RADAR	Radio Detection And Ranging
RCS	Radar Cross Section
THS	Track and Hold Sampler
TWT	Traveling Wave Tube
UWB	Ultra-wideband

참고문헌

- [1] R. M. O'Donnell, "Introduction to Radar Systems," MIT Open Course Ware(OCW).
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Radar>
- [3] T.-S. Chu et al., "A Short-Range UWB Impulse-

- Radio CMOS Sensor for Human Feature Detection,” *IEEE Int. Solid-State Circuit Conf Digest Tech. Pap.*, Feb. 2011, pp. 294-296.
- [4] D.T. Wisland et al., “A CMOS Nanoscale Impulse Radar Utilized in 2-Dimensional ISAR Imaging System,” *IEEE Radar Conf.*, May 2012, pp. 714-719.
- [5] D. Zito et al., “SoC CMOS UWB Pulse Radar Sensor for Contactless Respiratory Rate Monitoring,” *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 5, no. 2, Dec. 2012, pp. 503-510.
- [6] *Ultra-Wideband Radar Technology*, James D. Taylor, ed., CRC Press, 2001.
- [7] H. Xie et al., “A Varying Pulse Width 5th-Derivative Gaussian Pulse Generator for UWB Transceivers in CMOS,” *IEEE Radio Wireless Symp.*, 2008.
- [8] P. Park et al., “A High-Resolution Short-Range CMOS Impulse Radar for Human Walk Tracking,” *Submitted to IEEE Radio Frequency Circuits Conf.*, June 2013.
- [9] <https://www.novelda.no/content/application-ideas>
- [10] <http://www.timedomain.com/p400.php>
- [11] 창원 국방과학연구소, “감시정찰 센서 네트워크 개발,” 민·군겸용기술산업 성과발표회, 2012.