

7-9 GHz UWB 레이더 IC 기반 안테나 내장형 센서 모듈

7-9 GHz UWB Radar IC Sensor Module Using On-board Antenna

김민기^{*.1)} . 서병재¹⁾ . 박동욱¹⁾ . 김완¹⁾ . 정구²⁾ . 장원일²⁾ . 어윤성¹⁾²⁾

Min-Gi Kim^{*.1)} . Seo-Byung Jae¹⁾ . Dong-Wook Park¹⁾ . Wan Kim¹⁾ . Gu Jung²⁾ . Won-Il Jang²⁾ . Yun-Seong Eo¹⁾²⁾

[초 록]

본 논문에서는 7-9 GHz UWB 레이더 IC기반 안테나 내장형 근거리 레이더 센서 모듈을 제작하였다. UWB 레이더 IC는 등가시간 샘플링 기술과 국부발진기 LO 신호를 믹싱하는 송수신기를 모두 집적하였다. 내장형 안테나는 인셋 급전 단일 패치 안테나로 FR-4 기판을 사용하였고 WiFi Band 대역 간섭을 줄이기 위해 수신 안테나에 notch filter를 추가하였다. 표적은 사람을 기준으로 하였을 때 탐지 범위는 최대 4 m이며 다른 방향으로 2인 이상의 탐지가 가능하다. 칩의 크기는 2.8 x 2 mm²이고, 공급전압이 1.2 V일 때, 96 mW의 전력을 소모한다.

[ABSTRACT]

In this paper, a 7-9 GHz UWB radar IC-based sensor module with on-board antenna is presented. The UWB radar IC employs the equivalent-time sampling technique and LO mixing transceiver. On-board antenna is a inset-fed single patch antenna using FR-4 substrate and a notch filter is also included to reject the Wi-Fi band interference. Human detection range is up to 4 m and two more people can also be detected in the different angle. The chip size is 2.8 x 2 mm² and the current consumption is 96 mW at 1.2V supply voltage

Key Words : 초광대역(UWB, Ultra wide band), 레이더(radar), IC(Integrated Circuit), 센서(Sensor)

1. 서 론

초광대역 (UWB : Ultra Wide-Band) 레이더는 짧은 탐지거리에도 불구하고, 정밀한 거리분해능과 저전력 특성으로 민간용 및 군사용 근거리 레이더로서 활발한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서 설계한 UWB 레이더 송수신기는 7-9 GHz의 주파수 대역에서 동작한다. 3-5 GHz의 낮은 대역과 비교하였을 때 6-10 GHz의 높은 대역은 상용 이동통신 주파수와의 간섭요인이 거의 없고 안테나 및 센서 모듈의 소형화가 가능한 이점을 가지고 있다. 또한, 장애물 투과성 및 침투성이 좋아 은폐 및 은닉 된 물체의 감지에 활용이 가능하다. 본 연구에서는 기존 self-mixing 방식의 수신기에서 이득을 개선하기 위해 변환 이득이 높은 LO를 사용하는 mixer 기반 동기화 방식

의 레이더 수신기를 사용하여 탐지거리를 확보하였다.^[1]

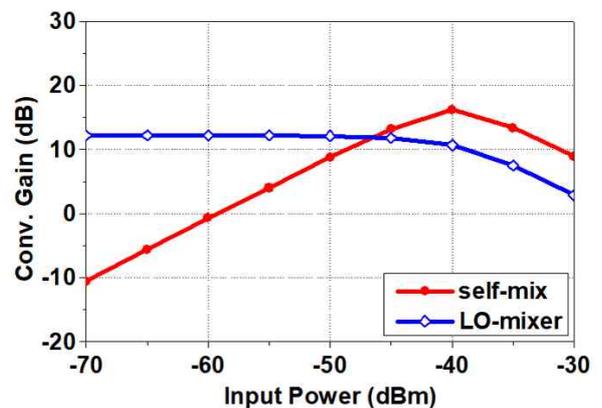


그림 1. 수신기 입력기준 Self-mixing과 LO mixer 구조의 입력전력 대비 변환 이득 비교

Fig 1. Comparison of conversion. gain vs Rx input power of self-mixing and LO mixer topology

수 cm의 고해상도를 달성하기 위해 등가 시간 샘플링(ETS

1) 광운대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University), 2)실리콘 R&D(Silicon R&D)

* Corresponding author, E-mail: qdpwer1@naver.com

Copyright © The Korean Institute of Defense Technology

Received: November 4, 2019

Revised:

Accepted: November 26, 2019

: equivalent time sampling) 기법을 채택하였다. 등가 시간 샘플링 기술을 이용하여 10 MHz의 샘플링 클록을 이용하여 6-bit flash 아날로그-디지털 변환기로 고속의 샘플링 데이터를 얻는다. 펄스 반복 간격 (PRI : pulse-repetition interval)과 등가 시간 샘플링의 시간 간격은 각각 100 ns와 0.5 ns로 15 m의 최대 탐지 거리와 7.5 cm의 분해능에 해당한다. 송신기 구조는 수신기와 VCO (voltage controlled oscillator)를 공유하는 반송파 기반 송신기이다. DLL (delay locked loop) 회로에서 10 MHz의 기준 클록을 공급 받아 짧은 펄스를 생성하는 pulse generator와 side-lobe rejection을 위해 펄스의 모양을 변형하는 pulse shaper를 포함한다. 수신기의 구조는 direct conversion 수신기 구조를 채택하였다. 송신기와 동일한 국부 발진기를 사용함으로써 이전 self-mixing 방식의 수신기와 비교하였을 때, 위상 정보뿐만 아니라 개선된 수신기의 변환 이득과 확장된 탐지거리를 얻을 수 있다.

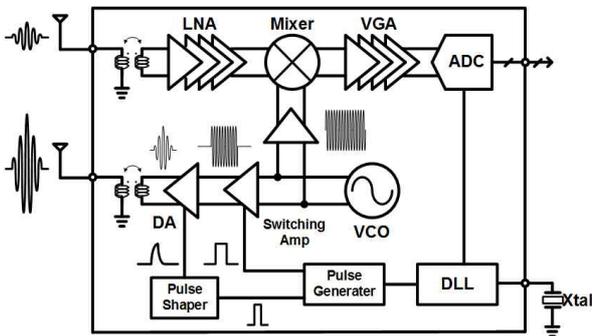


그림 2. UWB 레이더 IC의 블록도

Fig 2. Proposed block diagram of UWB sensor IC

UWB용 내장형 안테나는 인셋 급전 형태의 단일 패치 안테나로 유전율 4.4를 갖는 FR-4 기판을 사용하여 설계하였다. 인셋 급전 구조를 사용함으로써 보다 쉬운 입력 임피던스 매칭이 가능하며 안테나의 대역폭과 이득 개선과 안테나의 소형화를 가능하게 한다. 인셋의 폭, 길이와 안테나 면적을 조절하여 안테나 특성을 최적화하였다. 또한 수신 안테나에 Wi-Fi band rejection을 위한 π 구조인 노치 필터를 추가하여 Wi-Fi band 대역의 간섭으로 인한 UWB 레이더의 성능 저하를 방지하였다. 레이더 센서 모듈에 내장된 MCU (micro controller unit) 를 이용하여 6-bit flash 아날로그-디지털 변환기에서 출력 되는 디지털 신호를 신호처리 알고리즘을 통해 탐지거리 및 신호크기의 정보를 GUI (graphical user interface) 를 통해 검출한다. 신호처리 알고리즘 기법으로는 클러터 등 주변 잡음으로 인한 검출 오류를 최소화하기 위한 지수 평균 기법 (exponential averaging)과 CA-CFAR (cell average -constant false alarm rate detection) 알고리즘을 사용하였다. 최종적으로 CA-CFAR 알고리즘에서 검출된 파형의 무게중심을 추적하는 tracking data 알고리즘을 적용하여 타깃 검출 결과를 도출한다.

2. UWB 레이더 IC 송수신기 설계

그림 1은 본 논문에서 제안하는 7-9 GHz UWB 레이더 IC의 구조를 보여준다. 송신기는 수신기와 VCO를 공유하는 반송파 기반 구조이다. 송신 펄스와 수신 LO 신호 간의 차이가 거의 없을 만큼 송수신 사이의 시간 간격이 100 ns 미만으로 매우 짧기 때문에 PLL (pulse locked loop)을 포함하지 않은 VCO를 사용하여도 주파수 하향 변환기의 LO 신호의 위상 잡음이나 jitter에 의한 거리오차는 매우 적다. 따라서 최종 수신 파형이 시간에 따라 변하게 되는 현상을 막을 수 있고 높은 변환 이득과 정확한 거리 탐지성능을 얻는데 문제가 없다.

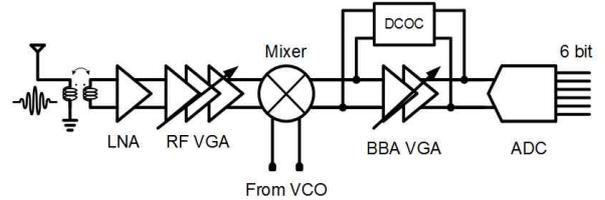


그림 3. UWB 레이더 IC의 수신기 구조

Fig 3. UWB radar IC receiver architecture

2.1 UWB 레이더 IC의 수신기 설계

그림 3은 LO mixer 기반 UWB 레이더 IC의 수신기 구조를 보여준다. 이 수신기는 저잡음 증폭기, 3-stage RF 가변이득 증폭기, 주파수 하향 변환기, 4-stage BBA (base band analog) 가변 이득 증폭기, 6-bit flash 아날로그-디지털 변환기로 구성된다. 수신된 single ended 신호는 내부 집적된 balun을 통해 노이즈에 강한 차동신호로 변환되어 저잡음 증폭기에 들어오게 된다.

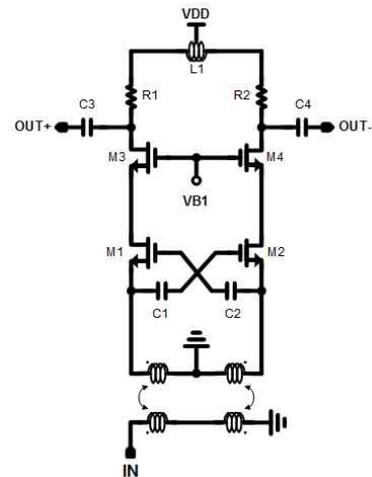


그림 4. Capacitive cross coupled 방식의 저잡음 증폭기 회로도

Fig 4. Low-noise amplifier circuit using Capacitive cross coupled technique

그림 4는 저잡음 증폭기의 회로도이다. Capacitive cross coupled 방식을 이용한 공통 게이트 증폭기의 구조로 일반적인 공통 소스 증폭기보다 낮은 입력 임피던스와 큰 트랜스컨덕턴스로 쉬운 입력 정합과 큰 전압 이득을 갖는다. 또한 capacitive cross coupled 방식으로 이론상 C1,C2의 크기

에 따라 최대 2배의 트랜스컨덕턴스를 가질 수 있으며 차동 신호의 진폭 및 위상 부정합을 감소시킬 수 있다. 광대역 신호를 증폭하기 위하여 inductive shunt peaking topology를 이용하였다. 광대역 특성을 위한 캐스코드 구조의 RF 가변 이득 증폭기는 RF 부에서 신호가 포화되는 것을 막기 위하여 공통 소스 출력단에 병렬스위치를 포함시켰다. 저잡음 증폭기를 포함한 RF 가변 이득 증폭기의 이득 가변 범위는 7.9~36.3 dB이며 이득을 가변해도 입력 반사계수는 동작주파수에서 -10 dB의 값을 갖는다. 주파수 하향 변환기는 double balanced Gilbert cell 구조이며 주파수 하향 변환기의 출력은 TIA (trans-impedance amplifier)를 통해 21.8 dB의 변환 이득을 갖는다. VCO 버퍼를 통해 LO 신호를 제공 받을 때 주파수 하향 변환기 자체의 기생성분에 의해 LO 신호가 RF 입력으로 들어가 self mixing으로 인하여 DC 오프셋 현상이 나타날 수 있다. 이를 방지하기 위하여 TIA를 이용한 low pass filtering 및 신호 증폭, DCOC (DC offset cancellation) 회로를 추가하였다. 4-stage BBA 가변 이득 증폭기는 공통 소스 구조를 사용하였다. 신호의 포화를 막기 위하여 이득 가변 기능을 추가하였고 주파수 하향 변환기와 마찬가지로 DC 오프셋 제거를 위한 DCOC 회로를 추가하였다. 4-stage BBA 가변 이득 증폭기는 0.2~23.5 dB의 가변 범위를 가지며 최대 ± 320 mV의 DC 오프셋을 제거할 수 있다. 6-bit flash 아날로그-디지털 변환기는 칩에 집적되어 있으므로 외부 소자를 최소화 하며 전체 모듈 크기를 소형화 하였다.

2.1 UWB 레이더 IC의 송신기 설계

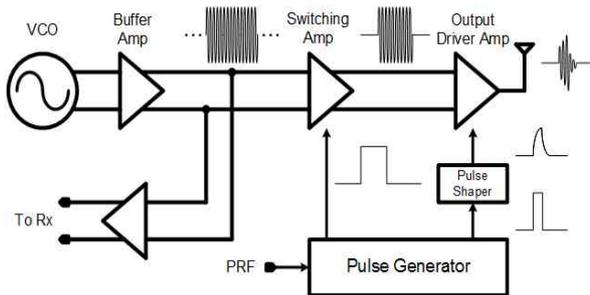


그림 5. UWB 레이더 IC의 송신기 구조
Fig 5. UWB radar IC transmitter architecture

그림 5는 UWB 레이더 IC의 송신기 구조이다. 송신기의 구성회로는 LC VCO, buffer amplifier, switching amplifier, driver amplifier, pulse generator, pulse shaper로 구성되어 있다. Phase noise 특성과 주파수 영역에서 안정적인 특성을 고려하여 LC VCO를 채택하였다. LC VCO의 공진 core 회로는 CMOS cross coupled pair 구조로 설계하였고 varactor를 이용한 주파수의 가변과 동시에 capacitor bank를 이용한 스위칭 방식으로 주파수 가변이 될 수 있도록 설계하였다. VCO 다음 단의 buffer amplifier는 스위칭 증폭기와 격리도를 높이고 VCO의 공진특성이나 주파수가 안정적으로 나올 수 있도록 설계되었다. 스위칭 증폭기는 제어용 pulse generator의 제어 신호에 의해 10 ns 미만의 짧은 시간 동안

만 동작하도록 캐스코드 상단 트랜지스터의 게이트 바이어스를 스위칭하여 불필요한 시간동안에 낭비되는 전력소모를 줄여 저전력 특성을 얻을 수 있게 한다. Pulse generator에서 생성하는 출력 드라이버 증폭기의 스위칭 펄스는 pulse shaper를 통해 rectangular pulse를 triangular pulse로 변형하고 출력 드라이버 증폭기를 거쳐 최종 증폭된 UWB 출력 신호를 생성한다. 출력 드라이버 증폭기의 제어 신호를 triangular pulse로 변형함으로써 최종 UWB 출력 신호의 side-lobe 크기를 약 10 dBc 이상 줄일 수 있었다. 펄스 shaping 방식은 MOSFET gate의 기생 커패시턴스와 저항을 이용하여 펄스의 rising time과 falling time을 조절하는 방식이다. 제어용 pulse generator는 DLL에서 받은 10 MHz의 clock을 받아서 스위칭 증폭기와 출력 드라이버 증폭기에 제어신호를 제공하는 역할을 한다. pulse generator의 회로는 가변 전압제어 지연 라인 (VCDL : voltage controled delay line) 과 4 : 1 MUX를 이용하여 인버터 체인의 수를 조정하여 제어 신호를 가변 할 수 있도록 설계 되어 있다. 인버터 체인의 바이어스를 조절하여 지연 시간을 조절하도록 설계되었고, 바이어스 전압에 따라서 0.05 ~ 1.6 ns의 가변 지연 시간을 갖는다.

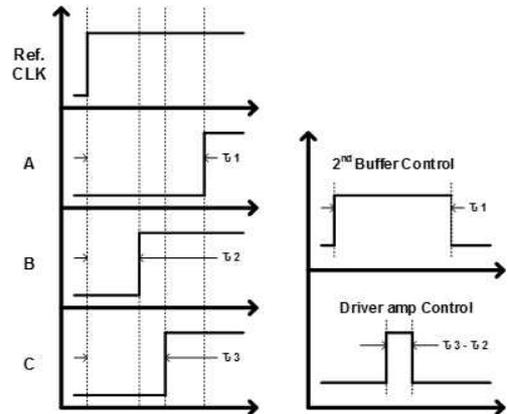


그림 6. Pulse generator 타이밍 다이어그램
Fig 6. Pulse generator timing diagram

그림 6은 pulse generator 입출력 타이밍 다이어그램을 나타낸다. 지연된 신호 A, B, C를 이용하여 τ_1 의 펄스폭을 갖는 스위칭 증폭기의 제어 신호와 $\tau_3 - \tau_2$ 의 펄스폭을 갖는 출력 드라이버 증폭기의 제어신호를 생성한다. UWB 출력 신호의 대역폭을 가변하기 위해 출력 드라이버 증폭기 제어신호의 펄스폭은 0.5 ~ 2 ns 범위에서 가변이 가능하며, 이는 UWB 출력 신호의 대역폭을 2 ~ 0.5 GHz로 가변이 가능하다는 것을 의미한다.

3. 안테나 내장형 레이더 모듈 설계

3.1 PCB 내장형 패치 안테나 설계

마이크로스트립 패치 안테나는 안테나의 소형화 및 경량화 특성이 좋고 대량생산의 장점이 있다. 하지만 좁은 대역폭과 낮은 이득을 갖는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위

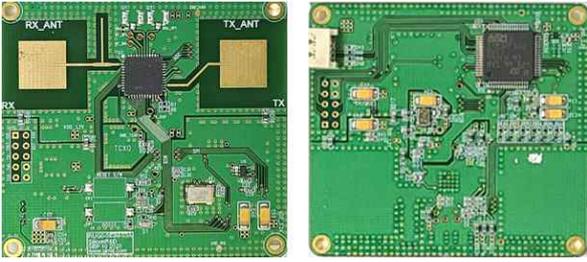
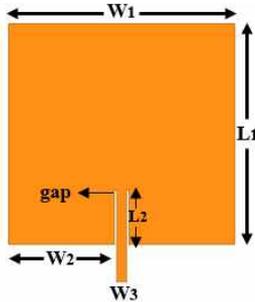


그림 7. 제작된 안테나 내장형 UWB 레이더 IC 모듈
Fig 7. UWB radar IC module on board antenna

해 본 논문에서는 인셋 급전 형태의 마이크로스트립 패치 안테나를 채택하였다. 인셋 급전 방식은 신호를 안테나 중심 근처에 공급하고 높은 입력 임피던스 특성으로 마이크로스트립 패치 안테나의 단점을 보완할 수 있다. 안테나 기판의 유전율과 두께가 커질수록 안테나의 소형화와 높은 이득이 가능하다. 따라서 4.0 이상의 유전율을 가지며 비교적 비용이 저렴한 FR-4 기판을 사용하였다.



Parameter	Values (mm)
W1	9
W2	4.21
W3	0.38
L1	8.9
L2	2.2
gap	0.1

그림 8. 인셋 급전 마이크로스트립 패치 안테나
Fig 8. Inset-fed microstrip patch antenna

그림 8은 인셋 급전 마이크로스트립 패치 안테나의 모습이 다. 패치 안테나의 길이와 폭은 L1, W1, 유전체의 두께 1.5mm, 유전율은 4.4이다. 인셋 급전 선로와 패치 안테나 사이의 임피던스 정합을 위한 인셋 길이와 폭은 L2, gap이다. 설계 목표 공진주파수를 위해 안테나 면적을 조절하였고 인셋 급전 선로의 길이 및 패치 안테나 사이의 gap을 조절하며 패치 안테나의 임피던스 특성 및 대역폭을 최적화하였다. 그림 9는 설계한 인셋 급전 패치 안테나의 입력 반사계수를 나타낸다. 측정 결과 7.75 GHz에서 반사손실이 -29.8 dB 이며 대역폭 280MHz, 안테나 이득 3.75 dBi의 성능이 측정 되었다. 위와 같이 설계 된 인셋 급전 형태의 마이크로스트립 패치 안테나를 UWB radar 센서 모듈과 동일보드에 내장하여 이동체 탐지 성능을 확인하였다.

3.2 레이더 모듈 설계 및 RF 필터 설계

그림 7은 0.13μm CMOS 공정을 사용하여 제작된 7-9 GHz 안테나 내장형 UWB 레이더 IC 및 측정 모듈의 모습이다.모듈

뒷면에는 SM electronics 사의 MCU가 위치하고 있다. 타겟에 반사되어 유입 된 정보를 갖고 있는 수신 신호는 레이더 IC 내부에 집적되어 있는 아날로그-디지털 변환기를 통해서 디지털 신호로 변환되어 MCU에 입력된다. 입력 된 디지털 신호는 MCU에 저장되어 있는 신호처리 알고리즘을 통해 탐지거리 및 신호 크기의 정보로 처리 된 후 GUI를 통해 최종적으로 검출된다. 레이더 IC의 크기는 정전기 방지 패드 및 와이어 본딩 패드를 포함한 2.8 x 2 mm²이고, 측정 모듈의 크기는 5.5 x 4.9 mm² 이다.

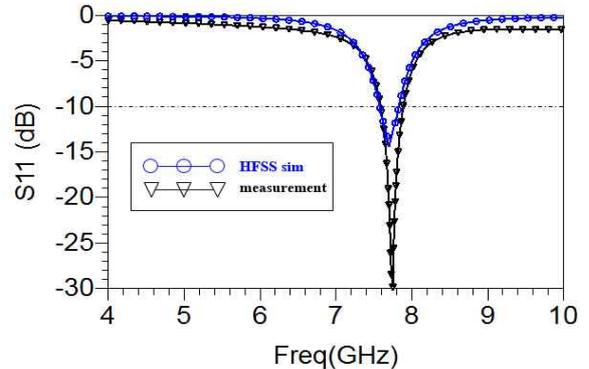
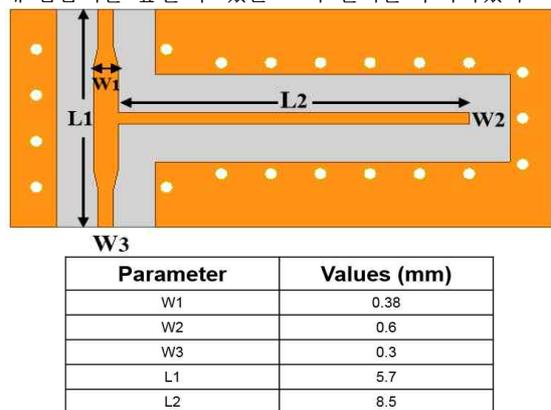


그림 9. 입력 반사계수 결과
Fig 9. The result of input return loss

모듈 앞면에는 레이더 IC와 좌우측에 인셋 급전 구조의 패치 안테나가 위치하고 있으며 single stub를 이용한 노치 필터가 추가된 수신 안테나를 확인 할 수 있다. 스마트 기기의 보급과 함께 5 GHz ISM 대역의 WiFi와 같은 간섭요인을 피할 수 없게 되었다. 5 GHz 대역의 강력한 WiFi 신호가 타겟의 정보를 갖고 있는 수신 신호와 함께 유입이 되면 신호간의 간섭으로 인하여 정확한 데이터를 검출해 낼 수 없게 된다. 그만큼 인접 주파수 대역의 간섭 신호는 레이더 성능에 직접적인 영향을 주기 때문에 간섭 신호를 제거하여 수신 된 신호의 신호대 잡음비를 높일 수 있는 노치 필터를 추가하였다.



Parameter	Values (mm)
W1	0.38
W2	0.6
W3	0.3
L1	5.7
L2	8.5

그림 10. Wi-Fi 대역 간섭 제거를 위한 notch 필터
Fig10. Wi-Fi Band rejection notch filter

그림 10은 설계한 마이크로스트립 노치 필터의 모습이다. 레이더 모듈 전체 크기에 대한 영향을 줄이기 위해 open stub의 길이와 폭(L2,W2)을 조절하여 노치 필터의 삽입 손실을 최적화 하였다.

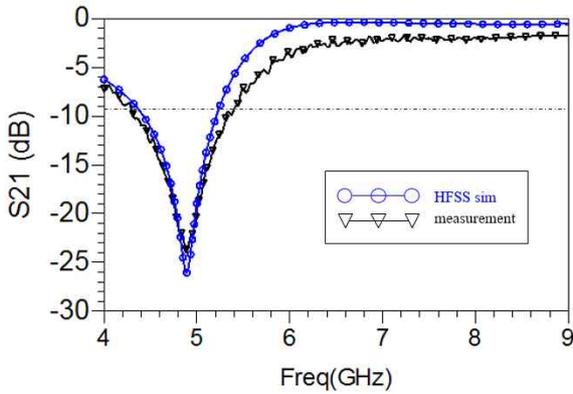


그림 11. 노치 필터 삽입 손실 측정 결과

Fig 11. The measurement result of insertion loss

그림 11은 노치필터의 삽입 손실 측정 결과를 나타낸다. 5 GHz에서 18.9 dB이며 10dB rejection 대역폭은 1 GHz로 측정되었다. 7-9 GHz에서의 삽입 손실이 2 dB로 측정 되었지만 측정을 위해 제작된 노치필터의 feeding 라인이 안테나에 적용되는 필터의 feeding 라인보다 17 mm 길게 제작되어 추가된 삽입 손실이 1 dB 이다. 따라서 안테나에 적용된 노치 필터의 삽입 손실은 1 dB 내외라고 할 수 있다.

4. UWB 레이더 신호처리 알고리즘 설계

레이더에서 송신된 신호는 타겟에 반사되어 타겟의 정보를 갖는 신호로 수신된다. MCU에는 수신된 신호를 신호처리하기 위한 알고리즘이 저장되어 있는데 신호처리 알고리즘을 통하여 타겟 탐지 거리, 신호의 크기 같은 정보로 GUI상에 도출되어 사용자가 실시간으로 확인이 가능하다. 움직이는 타겟의 위치 탐지와 추적을 위한 신호처리는 그림 12와 같은 과정을 통해 데이터를 처리한다.^[3]

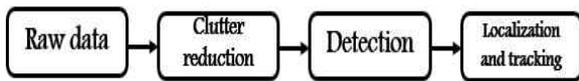


그림 12. 이동체 탐지 및 추적을 위한 신호처리 과정

Fig 12. Signal processing for localizing and tracking a moving object

UWB 레이더를 통하여 수집된 데이터는 주변 환경에 의한 Clutter 등 잡음 제거 알고리즘에서 처리되기 위해 외부 파라미터로 결정된 횡수만큼 적분된다. Clutter reduction 단계에서는 저장된 신호의 정보에서 타겟에 의해 반사된 신호를 제외한 나머지 Clutter 및 잡음 성분들을 최대한 없애는 것을 목표로 한다. 이를 위해 본 연구에서는 지수 평균법(exponential averaging)을 적용하여 시간에 따라 변하지 않는 고정된 clutter 등 주변 환경의 잡음을 최대한 제거하였다. 지수 평균법을 적용함으로써 오래된 측정치의 영향을 기하급수적으로 낮게 설정하여 이동체 변화의 민감도 및 clutter 제거 성능을 최적화할 수 있다. 다음 단계에서는 타겟을 탐지하기 위해 CA-CFAR (cell average - constant false alarm

rate detection) 알고리즘을 적용하여 클러터 등 주변 잡음으로 인한 검출 오류를 최소화 하여 타겟의 정보를 가진 신호만을 도출한다.

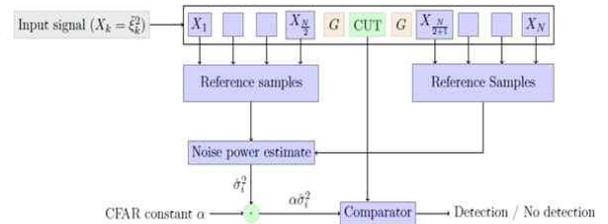
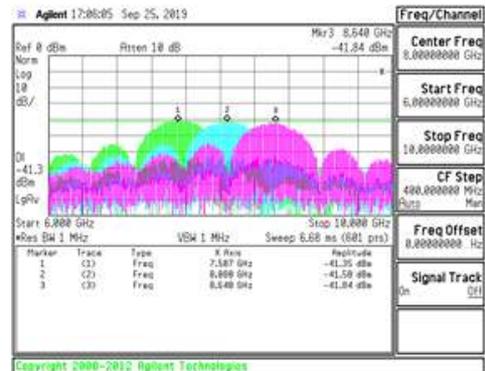


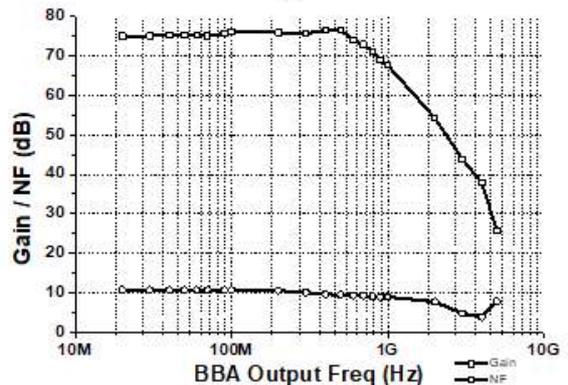
그림 13. CA-CFAR 알고리즘 구조

Fig 13. Schematic of CA-CFAR algorithm

그림 13은 CA-CFAR 알고리즘의 구조이다. guard cell(G) 밖에 있는 N/2개씩의 test cell들을 noise reference로 간주하고 이를 이용하여 문턱전압 레벨을 계산한다. 그리고 CUT cell의 데이터와 비교하여 타겟 여부를 판단한다. 이와 같은 연산은 모든 cell에 적용되며 CUT cell, guard cell, test cell의 개수는 외부 파라미터로 제어가 가능하다. 마지막으로 검출된 파형의 중심을 추적하는 Tracking data 알고리즘을 적용하여 타겟을 최종 검출한다.



(a)



(b)

그림 14. (a) 측정된 송신기 출력 중심 주파수 제어 및 (b) 측정된 전체 수신기 변환 이득 및 NF

Fig 14. (a) Measured transmitter output center frequency control (b) Measured full-chian Conv. gain and NF

5. 측정 결과

그림 14는 측정된 송신기 출력의 중심주파수 제어와 전체 수신기의 최대 이득 및 잡음 지수이다. 송신기 출력 신호는 PSA(power spectrum analyzer, Agilent E4403A)로 측정하였으며 중심 주파수 가변 제어 범위는 7.5 GHz ~ 8.6 GHz 이다. 전체 수신기의 최대 이득은 flat 영역에서 75 dB이며, 대역폭은 700 MHz, 잡음 지수는 10.6 dB로 측정 되었다.

이다 송수신기”, 한국전자파학회저널, 903-910, 2019.

[2] B.J Seo, J.Y Yoo, S.G Kim, Y.S Eo, “A 7-9GHz UWB Radar Sensor Module with Single Chip Radar IC and on-Board Antenna”, Asia-Pacific Microwave Conference(APMC), 1244-1246, 2018.
 [3] 2016, Andreas Ostman, "Detection and Tracking of Human Targets using Ultra-Wideband Radar"

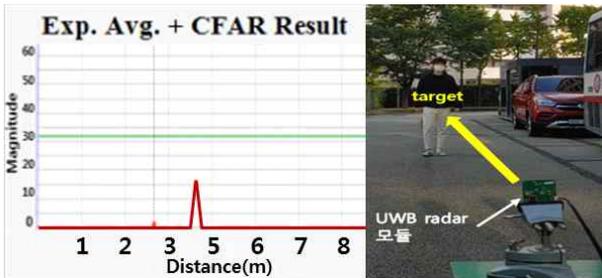


그림 15. 이동체 탐지 성능 측정 결과

Fig 15. Measurement result of moving target detection performance

그림 15는 본 논문에서 설계한 안테나 내장형 UWB 레이더 IC 센서 모듈의 이동체 탐지 성능을 보여준다. GUI를 통해 획득된 탐지 데이터를 토대로 제시된 신호처리 과정을 거쳐 최종적으로 나타난 측정결과이며 X축은 레이더에서 이동체까지의 거리, Y축은 신호의 크기를 의미한다. 이동체는 사람을 기준으로 측정 하였으며 이득 등 파라미터를 제어하여 탐지 성능을 최적화 하였다. 측정 된 레이더 모듈의 최대 탐지 거리는 4 m이며 최대 탐지 거리 이내의 방향이 다른 2명 이상의 사람도 탐지가 가능하다.

6. 결 론

본 논문에서는 0.13µm CMOS 7-9 GHz 저전력 UWB 레이더 IC 기반 안테나 내장형 센서 모듈을 제작하였다. 1.2 V의 공급 전압에서 96 mW의 전력을 소모하며 사람 탐지 기준으로 최대 탐지거리는 최대 4m이며 단일 패치 안테나로 근거리 레이더 센서로 사용이 가능하며 self-mixng 방식에 비해 최대 탐지 거리가 확장 되었다.

Acknowledge

본 연구의 결과는 민·군기술협력사업(Civil-Military Technology Cooperation Program)의 지원하에 수행되었습니다.

References

[1] 유준영, 박병규, 김상균, 정승환, 어윤성, “이동체 탐지를 위한 동기화 구조의 7~9 GHz CMOS UWB 레