

호흡 기반 사람과 사물 구분 가능한 FMCW 레이더 신호처리 프로세서의 설계

Design of FMCW Radar Signal Processor for Human and Objects Classification Based on Respiration Measurement

이윤구 · 윤형석 · 김수연 · 허성욱 · 정운호*
한국항공대학교 항공전자정보공학부

Yungu Lee · Hyeonsek Yun · Suyeon Kim · Seongwook Heo · Yunho Jung*

School of Electronics and Information Eng., Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

[요 약]

보안 시스템에는 다양한 센서가 사용되고 있지만, 사생활 문제가 논란이 됨에 따라 레이더 센서가 대안으로 제시되고 있다. 그 중 PD (Pulse Doppler) 레이더는 짧은 펄스를 사용함으로써 수신부 복잡도가 증가하는 문제가 존재하나, FMCW (Frequency modulated continuous wave) 레이더는 그러한 제한이 적다는 장점이 있다. 그러나, FMCW 레이더는 2D-FFT (2-dimensional fast Fourier transform)를 사용하므로 기존의 센서에 비해서 상대적으로 높은 복잡도를 가지며, 정지해있는 표적에 대해 사람과 사물을 구분하기 어려운 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 1D-FFT와 위상 변화만으로 호흡 여부를 확인하여 사람과 사물을 구분할 수 있는 레이더 신호처리 프로세서의 설계 및 구현 결과를 제시한다. 제안된 신호처리 프로세서는 Verilog-HDL을 기반으로 설계하여 FPGA 디바이스에 기반하여 구현 및 검증하였다. LUT (Look up table) 6,425개, register 4,243개, 12,288개의 memory bit로 구현하여 92.1%의 정확도로 대상의 호흡 여부를 확인할 수 있음을 확인하였다.

[Abstract]

Even though various types of sensors are being used for security applications, radar sensors are being suggested as an alternative due to the privacy issues. Among those radar sensors, PD radar has high-complexity receiver, but, FMCW radar requires fewer resources. However, FMCW has disadvantage from the use of 2D-FFT which increases the complexity, and it is difficult to distinguish people from objects those are stationary. In this paper, we present the design and the implementation results of the radar signal processor (RSP) that can distinguish between people and object by respiration measurement using phase estimation without 2D-FFT. The proposed RSP is designed with Verilog-HDL and is implemented on FPGA device. It was confirmed that the proposed RSP includes 6,425 LUT, 4,243 register, and 12,288 memory bits with 92.1% accuracy for target's breathing status.

Key word : Frequency modulated continuous wave, Phase estimation, Radar, Respiration, Target detection.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.4.305>



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.

Received 3 August 2021; Revised 6 August 2021
Accepted (Publication) 24 August 2021 (30 August 2021)

*Corresponding Author, Yunho Jung

Tel: +82-2-300-0133

E-mail: yjung@kau.ac.kr

1. 서론

최근 기술의 발전에 따라 보안 시스템의 필요성이 증대되고 있으며, 카메라, 적외선 센서, 레이더 (RADAR; radio detection and ranging) 시스템이 대표적이다. 하지만 카메라나 적외선 센서의 경우 주변 환경에 따라 오작동하는 경우가 많다. 특히 카메라의 경우에는 이미지 파일을 활용하기에 높은 연산량을 요구하며, 사생활 침해 문제가 발생할 수 있다는 단점이 있다 [1]-[3]. 또한, 적외선 센서의 경우 LED (Light emitting diode)에서 방사된 적외선이 반사되어 센서로 들어오는 양에 따라 반응하기에 오인식 확률이 높다는 단점이 있다. 하지만, 레이더 센서의 경우 전자기파를 이용하여 표적을 탐지하기에 주변 운용 환경의 영향을 적게 받는다는 장점이 있다. 이러한 장점에 따라 레이더는 국방 및 항공 감시 분야에서 광범위하게 사용되었으며, 소형 및 경량 설계 기술이 발전하면서 실내 가전과 같은 민간 분야로 범위가 확장되고 있다 [4]-[6].

레이더의 경우 송수신 방식에 따라 PD 레이더와 FMCW 레이더로 분류된다 [7]. PD 레이더의 경우, 매우 짧은 펄스를 송신하고 표적에 반사되어 수신된 신호를 이용하므로 장거리 표적 검출 능력이 우수한 반면, 수신단의 높은 연산량과 그에 따른 전력 소모가 큰 문제가 있다. 반면, FMCW 레이더의 경우, 선형 변조된 연속적인 전파를 활용하므로 근거리 표적 검출에 유리하며, PD 레이더에 비해 상대적으로 낮은 연산량으로 인해 전력 소모가 적은 장점이 있다.

FMCW 레이더의 경우 표적과의 거리와 표적의 속도 변화를 검출하기 위해 RDM (Range Doppler map)을 사용하며, 이를 산출하기 위해 2D FFT 연산 과정을 거치게 된다 [8]. 이는 큰 메모리와 많은 연산량을 요구하여 낮은 가격과 효율을 중시하는 실내 응용 분야에서의 활용을 어렵게 한다 [9]. 실내 응용의 경우 임베디드 시스템 형태의 설계 구현이 필수적이나 대상의 위치와 행동이 중시되기에 대상의 정확한 속도 추정이 필요하지 않다는 특징이 있다. 또한, 실내에서는 사람이 멈춰있는 경우가 잦은데 반해 기존의 FMCW 신호처리 시스템으로는 멈춰있는 대상이 사람인지 물체인지 구분하기 어려운 문제가 있다. 따라서, 본 논문에서는 속도의 변화에 대한 연산 없이 멈춰있는 대상의 호흡 변화 여부를 측정함으로써 사람과 사물의 구분이 가능한 신호처리 프로세서를 제안한다. 2D FFT 없이 1D FFT와

위상의 변화만으로 대상의 호흡 여부를 감지하기에 복잡도가 낮으며, 위상을 추정하여 호흡 여부 측정이 가능하기에 사람과 사물이 구분 가능하다는 특징을 갖는다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 시스템의 개요 및 알고리즘에 대해 다루며, 3장에서는 본 논문에서 설계한 신호처리 하드웨어 프로세서 구조에 대해서 다룬다. 4장에서는 구현 결과에 대해서 다루며, 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 레이더 시스템 개요 및 알고리즘

2-1 레이더 시스템 개요

그림 1은 제안된 FMCW 레이더 신호처리 시스템의 개요를 도시한다. ADC (Analog-to-digital converter)를 거쳐 입력된 신호의 DC 성분을 제거하고, FIR 필터 과정을 통해 잡음을 최소화한다. 이후 해밍 (Hamming) 윈도우를 통해 FFT 후 발생할 수 있는 오차를 줄인다. 전처리가 완료된 데이터는 Range-FFT 연산을 통해 주파수 영역으로 변환되고, 변환된 데이터를 프레임 단위로 더하여 시간 내 오차를 줄인다. 연산 과정이 마무리되면 프레임 단위 magnitude의 절댓값을 구하고 CFAR 과정을 거쳐 대상의 위치를 파악한다. 간소화된 아크 탄젠트 함수와 나눗셈 함수를 활용하여 대상별 위상값의 변화를 구함으로써 호흡 여부를 확인하게 된다.

2-2 호흡 여부 확인 알고리즘

호흡 여부 확인 알고리즘은 FMCW 레이더의 특성에 기반하고 있다. FMCW 레이더는 선형 주파수 변조한 파장을 연속적으로 방사하고 대상에 충돌해 돌아온 주파수를 이용하는 비트 주파수를 활용하는데, 식 (1)과 같이 비트 주파수(F)와 거리(R)는 비례하는 것을 확인할 수 있다. B 는 대역폭, c 는 파장의 속도, T 는 한 칩 (chirp)의 시간을 나타낸다.

$$R = \frac{cT}{2B} \times F \tag{1}$$

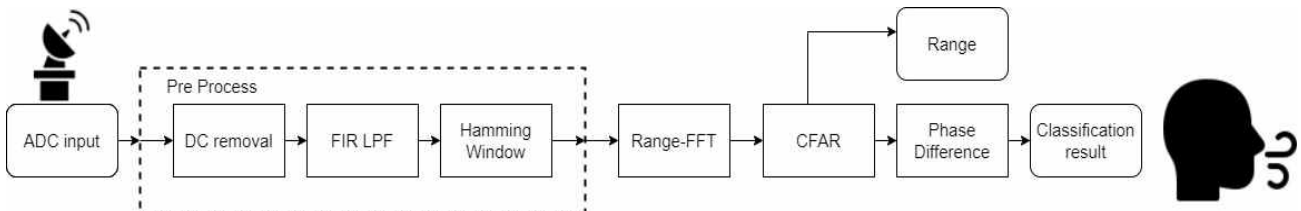


그림 1. FMCW 레이더 신호처리 시스템 개요
 Fig. 1. Overview of FMCW radar signal processor.

식 (1)과 같이 range-FFT를 통해 대상과의 거리를 구할 수 있지만, 거리 해상도 미만의 움직임을 보이는 호흡 변화는 확인할 수 없다. 반면 대상의 호흡 변화와 같은 미세한 움직임에도 비트 주파수의 위상은 변하기 때문에 이를 이용한다면 호흡 여부를 판단할 수 있다. 하지만 선례의 경우 기준값 없이 짧은 시간에 해당하는 칩 간의 차이를 연속적으로 배열하여 대상의 위상 변화를 인식하지 못하는 경우가 있었다 [10]. 따라서, 본 논문에서는 오작동률을 낮추고, 오차를 줄이기 위해 식 (2)와 같이 첫 번째 프레임의 FFT peak의 위상 평균값 I_{start} 를 기준으로 두고 다음 프레임의 위상 평균값인 $I_{next[n]}$ 와 I_{start} 와의 차이를 확인하여 호흡 여부를 확인한다.

$$P[n] = I_{start} - I_{next[n]} \quad (n \geq 2) \quad (2)$$

III. FMCW 신호처리 프로세서 설계

그림 2는 호흡 여부 확인용 FMCW 레이더 신호 처리 프로세서의 하드웨어 구조를 도시한다. 제안된 레이더 신호처리 프로세서는 DRU (DC removal unit), LPF (Low pass filter), HWU (Hamming window unit), FFT, AU (Accumulation unit), CU (CFAR unit), PU (Phase unit) 순으로 구성되어 있으며 100 MHz의 clock을 사용하여 설계를 진행하였다. DRU에서는 ADC 이후 unsigned 16bit 형태로 메모리에 저장된 데이터를 읽어 데이터에 대한 평균을 구하여 DC 성분을 제거한다. LPF에서는 DC가 제거된 데이터에 10차 FIR 필터를 적용하여 이후 CFAR 과정에서 생길 수 있는 오차를 최소화한다. HWU에서는 FIR의 output data를 입력받아 해밍 윈도우의 파라미터를 승산한다. FFT에서는 저장된 데이터를 BF (Butterfly) 구조에 따라 연산하고, 프레임 단위로 누적한다. 누적이 완료되면 CFAR 모듈로 시작 신호를 전달한다. CU에서는 전달된 값의 절댓값에 CFAR를 적용하여 대상의 위치를 확인하고, 각 값을 PU로 전달한다. PU에서는 위치별 위상값을 계산하고 위상 변화를 확인한다.

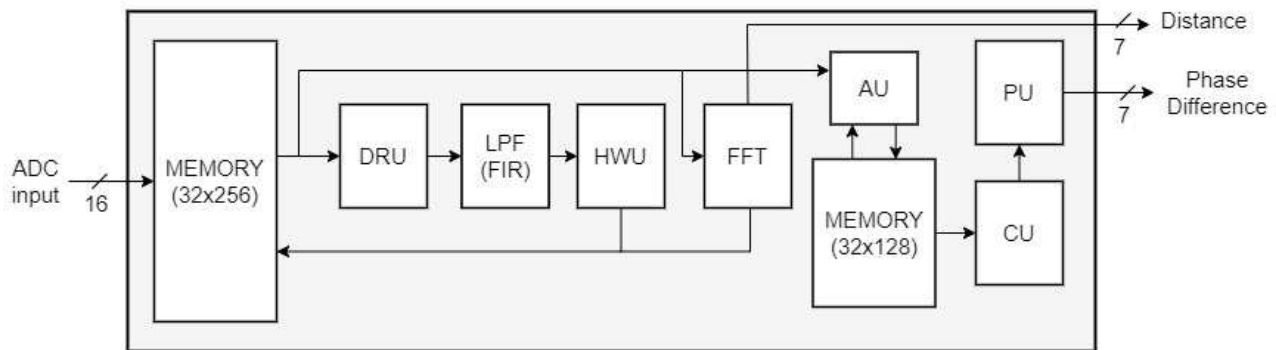


그림 2. 제안된 레이더 신호처리 프로세서의 하드웨어 구조
Fig. 2. Hardware architecture of the proposed radar signal.

3-1 전처리 하드웨어 구조

그림 3은 DRU, LPF, HWU 모듈이 통합된 전처리 프로세서의 하드웨어 구조이다. 우선 DRU에서는 레이더를 통해 들어온 신호에 대해 한 칩에 대한 합을 계산한다. 256개의 데이터가 더해지면 EN 신호를 이용하여 8bit를 shift 해주어 평균을 계산하고 입력값과의 차이를 계산한다. DC 제거가 완료된 데이터는 LPF (low pass filter) 모듈에서 차수만큼 delay를 주어 각각 계수와 곱한 후 합산해준다. 합산된 결과를 HWU로 값을 넘겨주어 LUT 형태로 저장된 해밍 윈도우 파라미터와 승산한다.

3-2 FFT 프로세서와 AU의 하드웨어 구조

그림 4은 FFT 프로세서와 AU의 하드웨어 구조로 낮은 복잡도를 갖는 radix-2 single butterfly 구조로 설계되었다 [11]. FFT는 8개의 스테이지로 구성되어 있으며, 스테이지별로 데이터를 읽고 연산 후 메모리에 저장하는 구조로 구현되었다. FFT 연산을 마무리하면 accumulation 연산이 진행된다. 프레임의 칩 개수만큼 FFT 결과를 합하고 right arithmetic shift 연산을 진행하는 구조로 평균값을 계산한다.

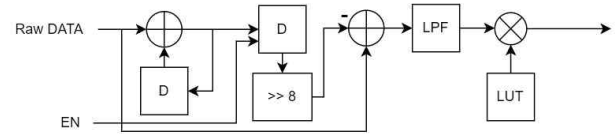


그림 3. 전처리 하드웨어 구조
Fig. 3. Hardware Architecture of Preprocessing.

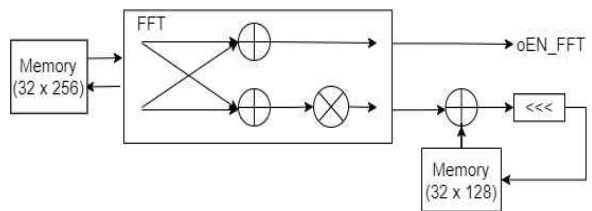


그림 4. FFT와 AU의 하드웨어 구조
Fig. 4. Hardware architecture of FFT and AU.

3-3 CU의 하드웨어 구조

주파수 성분에 대해 표적 여부를 검사할 때 일반적으로 신호 세기가 일정 임계값보다 큰 경우 이를 탐지하게 된다 [12]. 이때 고정된 임계값을 사용하는 경우 임계값보다 신호가 약한 표적을 검출하지 못하거나 클러터가 임계값 보다 클 때 표적으로 오검출하는 경우가 있다. 따라서 오경보율(false alarm rate)이 일정 비율이 되도록 CFAR(constant false alarm rate) 알고리즘을 사용하여 임계값을 계산한다 [13].

1) CA CFAR

CA CFAR (cell average constant false alarm rate) 알고리즘의 기본적인 동작을 그림 5에 나타냈다. 양쪽에 n 개의 참조 셀(reference cell)과 보호 셀(guard cell)로 이루어져 있으며, 판단하게 되는 신호는 중앙의 CUT (cell under test)라고 명명한다. CA CFAR는 양쪽의 참조 셀의 평균을 임계값으로 두어 CUT와 비교하게 된다. CA CFAR는 단순히 평균만을 계산하므로, 연산량이 적으나, 다중 표적이 존재하는 환경이나 클러터 또는 잡음이 발생하는 경우 참조 셀의 평균값이 높아져 탐지 확률이 낮아지는 문제가 있다 [14].

2) OS CFAR

OS CFAR (ordered statistic constant false alarm rate)는 다중 표적이거나 클러터가 존재하는 비균질 환경에서도 낮은 오경보율을 지원 가능하다. 그림 6는 OS CFAR의 기본적인 동작을 도시한다. OS CFAR는 양쪽 참조 셀의 값들을 오름차순으로 정렬하고, 정렬된 참조 셀 중에서 k 번째의 값을 임계값으로 설정하여 이를 CUT와 비교하게 된다. 상수 k 는 참조 셀의 개수의 3/4 번째 값으로 선택하게 된다 [15].

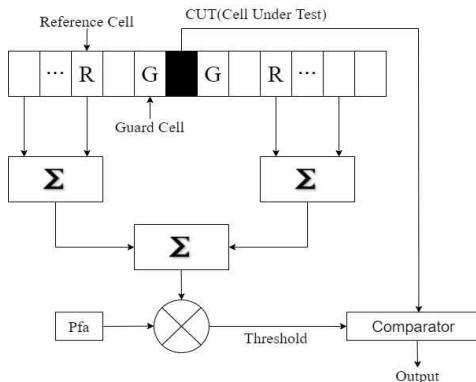


그림 5. CA-CFAR 알고리즘
Fig. 5. CA-CFAR Algorithm.

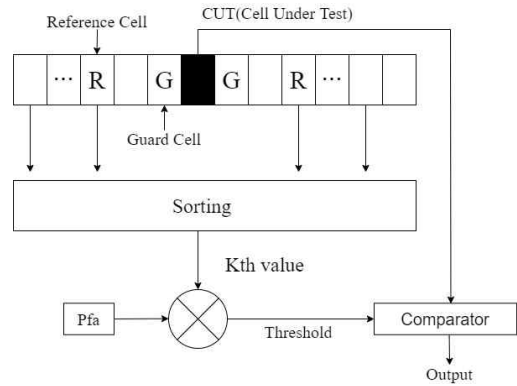


그림 6. OS-CFAR 알고리즘
Fig. 6. OS-CFAR Algorithm.

OS CFAR는 CA CFAR에 비해 다양한 환경에서 우수한 성능의 오경보율을 지원 가능하지만, 참조 셀을 정렬하는 과정을 거쳐야 하기에 연산량이 크며, 하드웨어 면적이 증가하는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해, 정렬하는 과정을 생략하고 k 번째 값만을 계산하는 알고리즘이 [16]에 제안되었다. 본 논문에서는 [16]의 알고리즘을 참조하여 OS CFAR 하드웨어 블록을 설계하였다.

3) CFAR Unit 하드웨어 블록도

그림 7은 CU의 하드웨어 구조를 보여준다. 실수 정보와 허수 정보가 각각 16비트로 입력되어 슬라이딩 윈도우를 따라 이동하게 된다. 위쪽 구조는 CA CFAR를 아래쪽 구조는 OS CFAR의 결과를 출력하게 된다. 단일 하드웨어에서 필요환경에 따라 선택적으로 구동 가능하도록 설계되었다. MUX를 통하여 원하는 CFAR의 결과를 출력할 수 있다. CA CFAR의 경우 균질환경에서 평균을 계산하여 이 값을 CUT와 비교하여 표적 여부를 탐지하고, OS CFAR의 경우 비균질 환경에서 표적 여부를 탐지한다. OS CFAR는 앞서 소개된 k th 알고리즘을 사용하여 비교기만을 통해 빠른 속도로 연산하도록 설계되었다.

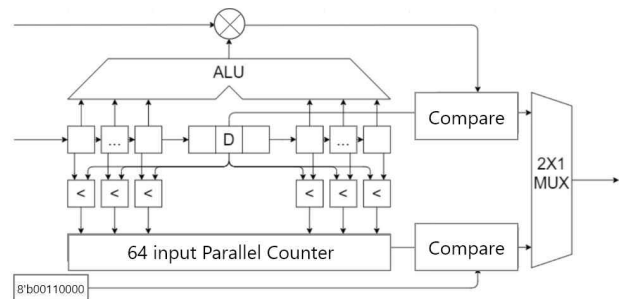


그림 7. CFAR Unit 하드웨어 구조
Fig. 7. Hardware architecture of CFAR Unit.

3-4 PU의 하드웨어 구조

신호의 위상을 구하고자 할 때 일반적으로 역탄젠트를 계산하여 위상값을 추출한다. 그러나 신호가 signed 형식인 복소수로 입력되면 각 사분면의 위상값을 추출하기 위해 4사분면 역탄젠트를 계산한다. 디지털 신호처리 과정에서 4사분면 역탄젠트를 계산하는 방식에 대한 많은 연구가 진행되었다. 예를 들어 LUT 참조 및 다항식 전개와 같은 몇 가지 기술이 잘 알려져 있다.

일반적인 4사분면 역탄젠트의 floating-point 연산에는 식 (3)과 같은 나눗셈 연산이 포함된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (3)$$

그러나 fixed-point 연산에서 나눗셈은 [-1,1)의 fixed-point 범위를 벗어나는 값을 초래할 수 있다. 위와 같은 연산 방식은 높은 복잡도를 가지며 본 논문이 목적으로 하는 낮은 복잡도의 신호처리 시스템에 적합하지 않다. 따라서, 본 논문에서는 복소수가 위치한 사분면에 따라 자체 정규화 비율을 계산하는 낮은 복잡도의 4사분면 역탄젠트의 방법을 사용한다 [17]. 사용된 4사분면 역탄젠트 알고리즘의 의사코드는 그림 8과 같다.

그림 9는 PU의 하드웨어 구조이다. 실수 데이터와 허수 데이터가 각각 16비트로 입력되고 DIV에서 나눗셈을 실행한 뒤 위상값이 출력된다. 나눗셈을 실행하는 DIV는 피제수에서 제수를 감산하는 것을 반복하는 방법으로 구현되었다. 이는 한 프레임당 주기가 100ms로 시간이 충분하다는 특징에 기반하였다. 또한 호흡 여부 측정을 위해 정확한 위상값 계산이 아닌 위상의 변화만을 측정하면 되므로, 연산을 단순화하여 구현함으로써 복잡도 감소를 유도하였다. 또한 입력 데이터의 비트 수를 C0 만큼 조절함으로써 DIV의 연산량이 기존 대비 93.6% 감소하였음을 확인하였다.

```

Phase Algorithm

Input : I, Q
Output : phase

1: coefficient = pi / 4;
2: abs_Q = abs(Q);
3: if (I > 0)
4:   ratio = (I - abs_Q) / (I + abs_Q);
5:   phase = coefficient * (1 - ratio);
6: else
7:   ratio = (I + abs_Q) / (abs_Q - I);
8:   phase = coefficient * (3 - ratio);
9: if (Q < 0)
10:  return(-phase);
11: else
12:  return(phase);
    
```

그림 8. PU의 의사코드
Fig. 8. Pseudocode of PU.

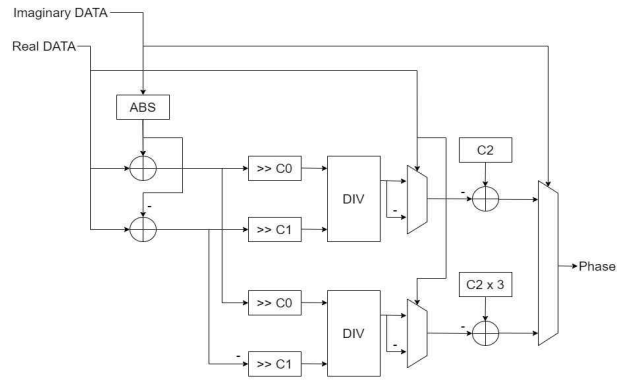


그림 9. PU의 하드웨어 구조
Fig. 9. Hardware architecture of PU.

IV. 하드웨어 구현 결과 및 검토

제안된 레이더 신호처리 프로세서는 Verilog-HDL을 이용하여 RTL 설계 후, Zynq-7000 FPGA 디바이스를 이용하여 구현 및 검증되었다 [18]. 검증 과정에는 FMCW 레이더를 사용하여 얻은 실제 데이터가 사용되었으며, 실험에 사용된 fast-ramp FMCW 레이더의 parameter는 표 1과 같다. 23.8GHz 대역에서 940MHz 대역폭을 갖는 FMCW 신호를 활용하였으며, 거리 해상도는 0.157 m이다. 한 프레임의 시간은 100ms이며, 프레임당 256개의 첵, 첵 당 256개의 샘플을 갖는다.

실험 환경은 그림 10와 같이 구성되었으며, 사람과 물체를 대상으로 실험을 진행하였다. 사람의 경우, 빠른 호흡, 느린 호흡 등 여러 호흡 상태를 대상으로 남성 2명, 여성 1명에 대해 총 164회의 실험이 진행되었다. 표 2는 실험 데이터의 호흡 여부를 분석한 결과로 평균 92.1%의 정확도를 확인할 수 있다. 그림 11은 사람과 사물을 다른 거리에 배치하여 range-FFT를 적용한 결과로 사람과 사물의 위치를 모두 확인할 수 있다. 그림 12는 사람과 사물을 대상으로 위상 변화를 확인한 결과이다. 그림 12-(a)의 경우 크게 위상 변화가 발생하여 사람이 호흡하고 있다는 것을 알 수 있으며, 그림 12-(b)의 경우 위상 변화가 없어 대상이 사물이라는 것을 확인할 수 있다.

표 3은 각 블록의 합성 결과를 제시하고 있으며, 설계된 프로세서는 6,425개의 logic element, 4,243개의 register, 12,288 bits memory로 구현되는 것을 확인하였다. 표 4는 제안된 레이더 신호처리 프로세서의 논리 합성 결과와 RDM을 활용한 기존 레이더 신호처리 프로세서의 논리 합성 결과를 비교하여 도시한다 [19]. 레이더 시스템의 응용 분야가 상이하여 정확한 비교는 어려우나, 제안된 레이더 신호처리 프로세서의 경우 실내에서의 활용을 목표로 하고 있으며, 2D FFT 연산을 이용하지 않고 1D FFT 연산만을 이용하여 사람과 사물 간의 구분이 가능하도록 설계되었고, 이에 RDM을 활용한 레이더 신호처리 프로세서 대비 logic elements는 67%, register는 56% 감소 가능한 것을

확인할 수 있다.

표 1. FMCW 레이더 파라미터

Table 1. FMCW radar parameter

Parameter	Value
Center Frequency	23.8 GHz
Bandwidth	940 MHz
Chirps of Frame	256 chirps
Samples of Chirp	256 samples
Frame Time	100 ms
FFT Point	256-point
Range Resolution	0.157m



그림 10. 실험 환경

Fig. 10. Experimental environment.

표 2. 호흡 여부 측정 정확도

Table 2. Accuracy for respiration measurement.

	Success	Fail	Total
Male	134	11	145
Female	17	2	19
Total	151	13	164

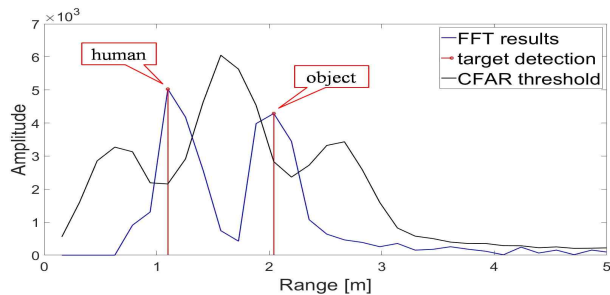


그림 11. 사람과 사물의 거리 추정

Fig. 11. Range estimation for human and object.

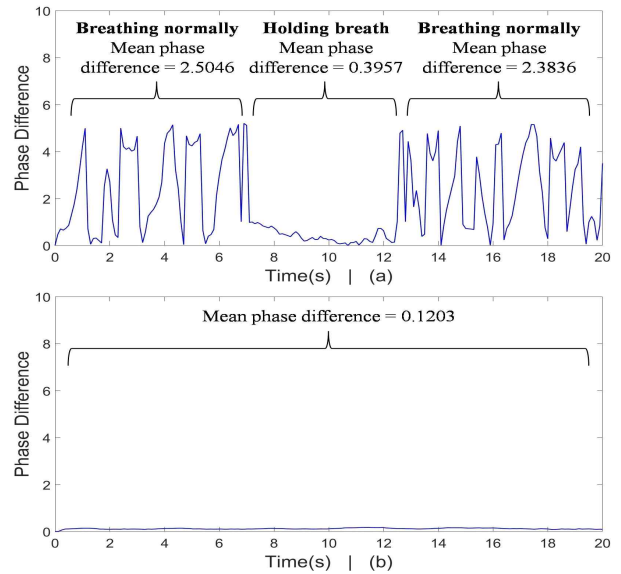


그림 12. 사람과 사물의 위상 변화

Fig. 12. Phase difference of human and object.

표 3. FPGA 기반 구현 결과

Table 3. FPGA implementation results.

	Logic elements	Register	Memory(bits)
DRU	208	111	0
LPF	438	1,100	0
HWU	985	124	0
FFT	628	439	0
Memory (32X256)	0	0	8,192
AU	141	76	0
CU	1,235	1,084	0
PU	2,790	1,309	0
Memory (16X256)	0	0	4,096
Top Block	6,425	4,243	12,288

표 4. 제안된 신호처리 프로세서와 기존 신호처리 프로세서의 논리 합성 결과

Table 4. Logic synthesis results of the proposed signal processor and conventional signal processor.

	Logic elements	Register	Memory(bits)
Proposed	6,425	4,243	12,288
[19]	19,623	9,759	25,190,400

V. 결 론

본 논문에서는 호흡 여부를 통해 정지한 사람과 사물을 구분하는 레이더 신호처리 프로세서의 설계 및 구현 결과를 제시하였다. 제안된 신호처리 프로세서는 대상과의 거리와 속도 정보를 얻을 수 있는 2D FFT 대신 연산량이 적은 1D FFT와 프레임

간의 위상 차이 연산을 활용하였다. 이에 따라 대상의 호흡 여부를 분간할 수 있어 정지한 사람과 사물을 구분할 수 있도록 설계되었다. 또한, 제안된 신호처리 프로세서는 기존 신호처리 프로세서에 비교했을 때 logic elements는 67%, register는 56% 감소함을 확인하였다.

Acknowledgments

본 논문은 2021년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행되었으며 (No. 2019-0-00056, 2020-0-00201), CAD tool은 IDEC에 의해 지원되었음.

References

- [1] T. Lukáč, J. Půčík, and L. Chrenko, "Contactless Recognition of Respiration Phases Using Web Camera," in 2014 24th International Conference Radioelektronika, Bratislava: Slovakia, pp. 1-4, Apr. 2014.
- [2] O. Bodilovskyi, and A. Popov, "Estimation of Time Domain Parameters for Camera Based Respiration Monitoring," in 2017 Signal Processing Symposium(SPSymo), Jachranka: Poland, pp. 1-4, Oct. 2017.
- [3] J. G. Park, and H. W. Kim, "A study on the Effective Identification of IP Cameras," KSCI Review, Vol. 26, No. 2, pp. 1-7, Dec. 2018.
- [4] D. J. Woo, S. J. Kim, and T. K. Lee, "Design and Noise Figure Analysis of Coherent Transceiver for Airborne Radar," Journal of Advanced Navigation Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 38-48, Jun. 2004.
- [5] J. W. Kim, T. H. Cho, S. B. Choi, and H. D. Park, "Network Modeling and Analysis of Multi Radar Data Fusion for Efficient Detection of Aircraft Position," Journal of Advanced Navigation Technology, Vol. 18, No. 1, pp. 29-34, Feb. 2014.
- [6] C. Li, V. M. Lubecke, O. Boric-Lubecke, and J. Lin, "A Review on Recent Advances in Doppler Radar Sensors for Noncontact Healthcare Monitoring," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 61, No. 5, pp. 2046-2060, May. 2013.
- [7] M. H. Cha, and D. W. Kim, "Comparison of Signal for Radio Frequency Sensing based Sensors using mmWave," in Proceedings of KIIT Conference, Daejeon, pp. 63-65, Jun. 2019.
- [8] J. Park, D. Jung, K. Bae, and S. Park, "Range-Doppler Map Improvement in FMCW Radar for Small Moving Drone Detection Using the Stationary Point Concentration Technique," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 68, No. 5, pp. 1858-1871, May. 2020.
- [9] Y. S. Jin, E. G. Hy, S. D. Kim, B. S. Kim, and J. H. Lee, "Low Complexity FMCW Surveillance Radar Algorithm Using Phase Difference of Dual Chirps," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, Vol. 12, No. 2, pp.71-77, Apr. 2017.
- [10] T. Kiuru et al., "Movement and respiration detection using statistical properties of the FMCW radar signal," in 2016 Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM) & ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications, Espoo: Finland, pp. 1-4, Jun. 2016.
- [11] B. Y. Choi, K. W. Shin, J. K. Yoo, C. B. Lim, and M. K. Lee, "Design of RADIX-2 BUTTERFLY Arithmetic Unit," *Proceedings of Symposium of the Korean institute of communications and Information Sciences*, Vol. 5, No. 5, pp. 177-180, Jan. 1986.
- [12] Rohling H, "Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations," *IEEE Transaction on Aerospace and Electronics System*, Vol. AES-19, No. 4, pp. 608-620, July. 1983.
- [13] S. J. Shin, "A study of efficient CFAR algorithm," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 25, No. 8, pp. 849-856, Aug. 2014.
- [14] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab*, 2nd ed. CRC Press, 2000.
- [15] B. Magaz, A. Belouchrani, and M. Hamadouche, "Automatic threshold selection in OS-CFAR radar detection using information theoretic criteria," *Progress in Electromagnetics Research B*, Vol. 30, pp. 157-175, May. 2011.
- [16] M. R. Bales, T. Benson, R. Dickerson, D. Campbell, R. Hersey, and E. Culpepper, "Real-time implementations of ordered-statistic CFAR," in 2012 IEEE Radar Conference, Atlanta: GA, pp. 896-901, May. 2012.
- [17] Iowegian International Corporation. DSP Trick: Fixed-Point Atan2 With Self Normalization [Internet]. Available: <https://dspguru.com/dsp/tricks/fixed-point-atan2-with-self-normalization/>.
- [18] Xilinx. Zynq-7000 SoC Device [Internet]. Available: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/zynq-7000.html>.
- [19] S. H. Lee, Y. C. Jung, and Y. H. Jung, "Design of Multi-Mode Radar Signal Processor for UAV Detection," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 23, No. 2, pp. 134-141, Apr. 2019.



이 윤 구 (Yun-Gu Lee)

2015년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 학사
※관심분야 : 무선 통신 시스템, SoC 설계



윤 형 석 (Hyeongseok Yun)

2016년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 학사
※관심분야 : 무선 통신 시스템, SoC 설계



김 수 연 (Suyeon Kim)

2018년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 학사
※관심분야 : 무선 통신 시스템, SoC 설계



허 성 욱 (Seongwook Heo)

2015년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 학사
※관심분야 : 무선 통신 시스템, SoC 설계



정 윤 호 (Yunho Jung)

1998년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2005년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2005년 ~ 2007년 : 삼성전자 책임연구원
2007년 ~ 2008년 : 연세대학교 연구교수
2008년 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수
※관심분야 : 무선 통신 시스템, 항공통신 시스템, 레이더 시스템, SoC 설계