

연속파 신호를 이용한 근거리 레이더 센서 시스템

Short-Range Radar Sensor System Using Continuous Wave Signals

박재현 · 김주연 · 장세영 · 지현준 · 심재용 · 양종렬

Jae-Hyun Park · Ju-Yeon Kim · Se-Young Jang · Hyun-Jun Ji · Jae Young Sim · Jong-Ryul Yang

요 약

수 GHz 대역 연속파 신호를 이용한 원격 생체신호 검출용 근거리 레이더 센서 시스템을 제안한다. 제안하는 레이더 센서 시스템은 1 m 이하 근거리에서 위치한 사람의 호흡과 심박수 변화를 모니터링하기 위해, GHz 협대역 주파수 신호를 연속적으로 송수신한다. 인체 레이어 모델 기반 경로 손실 계산에 근거하여, 915 MHz와 2.45 GHz 동작 주파수에서 고감도 레이더 센서를 설계하였으며, 소형화 안테나와 수동소자 및 저잡음 증폭기 등을 이용하여 레이더 모듈을 제작하였다. 1 Hz 주변 낮은 주파수 대역에 존재하는 호흡 및 심박수 측정에 필요한 데이터 샘플링수를 줄이기 위한 Wavelet 변환 기반 신호처리 기법과 시간 영역 심박 신호에서 피크수를 정확하게 감지할 수 있는 가변 문턱전압 기반 신호처리 기법을 제안하였다. 피검자 6명의 분당 심박수 측정 결과는 제안하는 레이더 센서가 상용 ECG 센서 대비 95% 이상 정확도를 가짐을 보여준다.

Abstract

A short-range radar sensor was proposed and developed for remote vital signal detection using GHz-band continuous wave (CW) signals. The proposed radar sensor system transmits and receives narrow-band CW signals for monitoring variations in respiration and heartbeat rates at a distance of less than 1 m. Based on the path loss calculation using a human layer model, each radar module, operating at 915 MHz and 2.45 GHz, is implemented with miniaturized antennas, passive components, and a low-noise amplifier integrated circuit. Signal processing algorithms based on a wavelet transform and variable threshold voltages are proposed to accurately detect vital signs in the frequency band at approximately 1 Hz from time-domain raw data. The measurement results from six subjects demonstrate that the proposed radar sensor can detect vital signs with an accuracy exceeding 95% as compared to commercial electrocardiogram sensors.

Key words: Continuous-wave Radar, Doppler Radar, Vital Sign Detection, Radar Sensor System, Heart-Rate Variability

I. 서 론

연속파(continuous-wave, CW) 신호를 이용한 레이더 센서는 단일 주파수 신호를 연속적으로 송수신하고, 측정

대상에 의한 수신 신호의 주파수 특성 변화를 이용하여 정보를 획득하는 시스템이다. 협대역 하드웨어 구조로 간단히 시스템 구성을 할 수 있다는 장점이 있으며, 기존 상용 시스템용 칩셋/컴포넌트를 활용하여 초소형 모듈 구현

「이 연구는 2019년도 산학협동제단의 지원을 받아 수행되었음(과제명: 운전자 및 동승자 모니터링용 레이더센서 및 전자기파 특성연구).」
영남대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Yeungnam University)

· Manuscript received October 28, 2019 ; Revised December 16, 2019 ; Accepted February 12, 2020. (ID No. 20191028-111)

· Corresponding Author: Jong-Ryul Yang (e-mail: jryang@yu.ac.kr)

이 쉽다^[1]. CW 신호로부터 획득 가능한 대표적인 정보는 측정 대상 움직임에 의해 발생하는 도플러 변이이며, 이는 레이더 센서로부터 전파 송신 방향에 대한 측정 대상의 속도로 직접 변환이 가능하다^{[1][2]}. 도플러 변이를 이용하면 주기적으로 변화하는 움직임, 변위와 같은 측정 대상에 대한 다양한 정보를 파악할 수 있어, 모션 센서나 속도계, 실내 위치 파악, 도난 방지 센서 등 다양한 매크로 환경에서의 움직임 감지는 물론 손가락 제스처 인식, 원격 생체신호 검출 등과 같이 작은 움직임을 효과적으로 인식하는데 활용할 수 있다^{[2]~[4]}. 또한 미약한 도플러 신호 변화로부터 호흡과 심장 박동 움직임을 측정하는 원격 생체신호 검출 기술은 기존 접촉 센서와 달리 대상의 분당 호흡 및 심박 수를 비 개입적, 지속적으로 검출할 수 있는 장점이 있다.

원격으로 호흡과 심박수를 모니터링하는 연구는 운동량 파악과 같은 일상 활동 상태확인 뿐만 아니라, 갑작스러운 심정지에 의한 위급 상황인지 및 재난 상황에서 구출 대상의 위치 파악 등 다양한 응용시스템으로 확장 가능한 분야이다^{[1][3]}. 이를 위해 다양한 기술 방식에 기반을 둔 레이더 센서 연구가 진행되고 있으나, 일상 활동과 같은 큰 움직임이 존재하는 환경에서 인체 내부 장기의 미세 움직임에 의한 특성 변화를 효과적으로 인식하는데 필요한 넓은 동적 영역과 낮은 민감도 특성 확보, 그리고 주변 클러터에 의한 동적 DC 오프셋 전압 효과 제거 등 안정적인 동작 구현에 많은 어려움이 있어 상용화 가능 수준 결과는 아직 제시하지 못하였다^[5].

이러한 레이더 센서 특성 한계 영향은 움직임이 제한적인 차량 내에서는 줄어 들 수 있으므로, 최근에는 차량 내 탑승자 모니터링을 위한 레이더 센서 기술 연구가 활발하게 진행 중이다^[6]. 운전자 졸음운전이나 후방 탑승자의 존재 여부를 확인하기 위한 용도로 초광대역 신호를 이용한 UWB(ultra-wideband) 레이더와 거리 측정을 위해 송신 신호 주파수를 변조시킨 FMCW(frequency-modulated CW) 및 SFCW(steped-frequency CW) 레이더 기술 기반 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 시스템 하드웨어 구현 복잡성과 신호 획득을 위한 알고리즘 복잡도 및 많은 계산량 등으로 상용화에 어려움이 있다^{[7][8]}. 이에 비해 CW 신호기반 레이더 센서는 앞서 언급한 시스템 하드웨어

복잡도가 낮고 초소형 모듈 구현이 쉽다는 장점 외에도 응용 분야에서 필요한 생체신호 정보를 획득하고 모니터링하는데 필요한 시스템 제어와 신호처리 계산에 상대적으로 많은 부하가 요구되지 않아, 최종 시스템 구성 가격을 크게 낮출 수 있는 장점이 있다^{[9][10]}.

본 논문에서는 1 m 이하 근거리에서 위치한 정지 대상의 호흡과 심박 신호를 원격으로 검출하는 CW 레이더 센서 시스템을 제안한다. 제안하는 레이더 센서 시스템은 고유 동작 주파수 신호를 송수신하기 위한 GHz 대역 고감도 센서 모듈과 준 실시간으로 생체신호를 검출하고, 변화량을 모니터링하기 위한 신호처리 기법으로 구현되어 있다. 심장의 전기적 활동을 기록한 ECG(Electrocardiogram) 센서를 기준 센서로 활용하여 6명 이상 피검자를 대상으로 측정을 진행한 결과, 제안하는 레이더 센서가 95% 이상 검출 정확도를 가지고 분당 호흡수와 심박수를 모니터링할 수 있음을 나타내었다. II 장에서는 제안하는 레이더 센서 기본 구조와 CW 레이더 센서를 이용하여 호흡과 심장 박동수를 인식하는 원리를 설명한다. III 장에서는 레이더 센서 하드웨어 모듈 구현과 저주파 대역 생체신호를 효과적으로 인식하는 신호처리 기법을 설명한다. IV 장에서는 다수 피검자에게서 측정된 생체신호 검출 결과를 통해, 제안하는 레이더 센서가 효과적으로 생체신호를 모니터링할 수 있음을 보인다. 또한, 레이더 센서에서 획득한 생체정보를 이용하여 심박변이도 분석(Heart Rate Variability, HRV)을 수행한 결과를 제시한다. V 장은 결론으로 CW를 이용한 레이더 센서 한계와 연구 발전 방향에 대해 언급한다.

II. 생체신호 검출용 연속파기반 레이더 센서

레이더 센서는 원거리에 위치한 대상체에 의해 발생하는 송수신 신호의 주파수, 시간, 위상 등 차이를 인식하여 정보를 획득한다. 제안하는 CW 레이더 센서는 그림 1과 같이, 연속파를 송수신하여 생체신호에 의한 인체 움직임 변화를 인식한다. 생체신호 움직임 방향에 의한 영향을 최소화하기 위해 원형편파 안테나를 사용하였으며, 전력 소모 감소와 간단한 시스템 구성을 위해 전압제어발진기에서 생성된 신호를 주파수 혼합기에서 비교하는 구조이

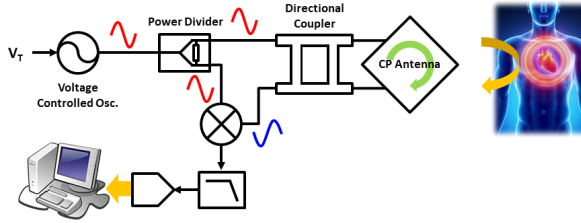


그림 1. 연속파 기반 레이더 센서 구성도

Fig. 1. Block diagram of the radar sensor using CW signals.

다. 연속파 주파수 f 파장이 생체신호에 의한 움직임 $\Delta x(t)$ 보다 긴 경우, $\Delta x(t)$ 는 송수신 신호 위상차 $\Delta\phi(t)$ 에 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta x(t) = \frac{c}{4\pi f} \Delta\phi(t) \quad (1)$$

송신 신호 S_{Tx} 는 발진기 위상잡음 $\theta(t)$ 을 고려하여 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{Tx} = A_{Tx} \cos(2\pi f t + \theta(t)) \quad (2)$$

센서에서 인체까지 거리를 d , 호흡과 위상에 의한 움직임을 각각 $\Delta r(t)$, $\Delta h(t)$ 라 할 때, 수신 신호 S_{Rx} 는 다음 식 (3)으로 나타난다.

$$S_{Rx} = A_R \cos\left(2\pi f t - \frac{4\pi}{\lambda} (d + \Delta r(t)) + \theta\left(t - \frac{2d}{c}\right)\right) + A_H \cos\left(2\pi f t - \frac{4\pi}{\lambda} (d + \Delta h(t)) + \theta\left(t - \frac{2d}{c}\right)\right) \quad (3)$$

송수신 신호 간 전압제어발진기에서 생성된 위상잡음의 차이를 무시할 수 있다면, 주파수 혼합기 이후 저역통과 필터를 통과한 기저대역 신호는 다음과 같다.

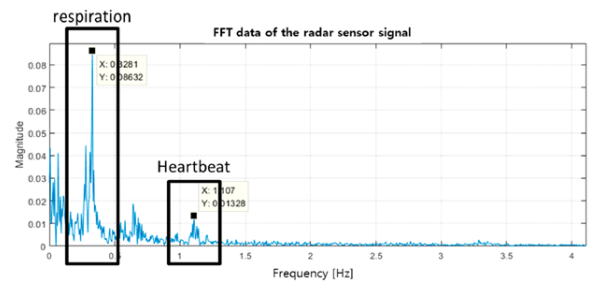
$$S_{BB} = A_R' \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} (d + \Delta r(t))\right) + A_H' \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} (d + \Delta h(t))\right) \quad (4)$$

호흡과 심박에 의한 움직임이 동작 주파수 신호 파장에 비해 작다고 가정할 수 있다면, 삼각함수를 근사하여 식 (4)는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{BB} = (A_R' + A_H') \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} d\right) - \frac{4\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} d\right) (A_R' \Delta r(t) + A_H' \Delta h(t)) \quad (5)$$

레이더 센서에서 대상까지 거리가 사용한 주파수 파장의 정수배가 아니라면, 호흡과 심박 움직임은 기저대역 신호에 고유 주기성과 크기로 나타난다. 여기서 A_R' 와 A_H' 은 호흡과 심박에 의한 반사 신호 크기와 수신 이득을 곱한 형태로, 인체 표면에서 반사되는 신호가 지배적인 특성을 갖는다면 같은 크기로 근사할 수 있으므로 폐와 심장 자체 움직임 크기 차이 비가 기저대역 출력에 나타난다고 볼 수 있다. 이 때문에 호흡 파형이 심박 파형에 비해 레이더 센서 출력 원 신호에서 잘 나타나게 된다.

호흡수와 심박수는 신체 상태에 따라 변이를 가지므로, 특정 시간 동안 레이더 센서를 이용하여 측정된 원신호 데이터를 주파수 대역으로 표시하면 그림 2와 같이 일정 구간에서 퍼져있는 형태가 된다. 분당 호흡수와 심박수 측정은 호흡과 심박수에 의해 나타나는 주파수 대역이 이미 잘 알려져 있으므로, 해당 대역에서 피크 값으로 대표하여 나타낸다. 낮은 주파수에서는 체내로 침투 및 반사되는 신호 영향 증가와 인체 체적 대비 긴 파장으로 인해 거리 d 가 파장의 정수배가 되어 신호를 감지하지 못하는 측정 감도 열화 영향, 소위 **null point problem**이 줄어든다. 이를 고려하여 제안하는 레이더 센서는 상용 부품을 쉽게 구할 수 있는 ISM 밴드 2.45 GHz 주파수에서, 그림 3과 같이 가로 11.5 cm, 세로 9 cm로 FR4 PCB에 설계 및 제작하였다^[9].


 그림 2. 연속파기반 레이더 센서에서 수집된 생체신호
Fig. 2. Vital signals obtained from the CW radar sensor.

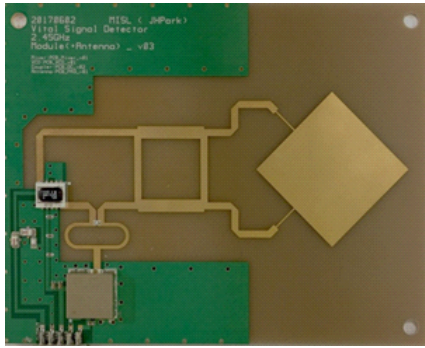


그림 3. 2.45 GHz 연속파 레이더 센서 모듈
Fig. 3. 2.45 GHz CW radar sensor module.

III. 생체신호 검출용 CW 레이더 센서 시스템

3-1 CW 레이더 센서 모듈

식 (5)에서 확인한 것과 같이 작은 심장 박동 움직임은 레이더 센서 출력에서 심박 검출을 어렵게 하는 요인이다. 그러나 보다 많은 신호가 체내에 침투하여 심장 박동에 의해 반사된다면, 수신 신호에 체내 침투한 신호 성분이 많아져 레이더 센서 민감도를 높일 수 있으므로, 레이더 센서 동작 주파수를 변경하여 신호 대 잡음비(Signal-to-noise ratio, SNR) 향상이 가능한지 확인하였다^[10]. 2.45 GHz 기존 모듈과 특성을 비교하기 위해 모듈 제작이 용이한 915 MHz를 선택하여 다음 그림 4와 같이 체내 신호 전달 및 반사 특성을 계산하였다^[10]. 0 dBm 신호가 동일하게 체내에 인가된 상황에서 인체 레이어 모델을 적용

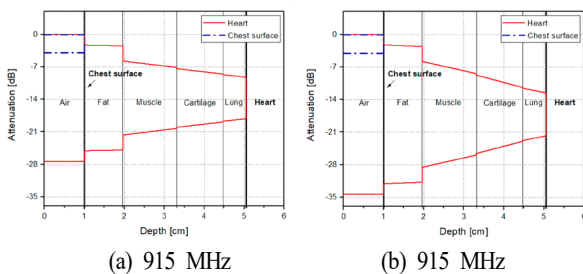


그림 4. 심장까지 도달하여 반사된 신호에 대한 체내 경로 손실 계산 결과
Fig. 4. Path-loss calculation of the signals reflected by the heart.

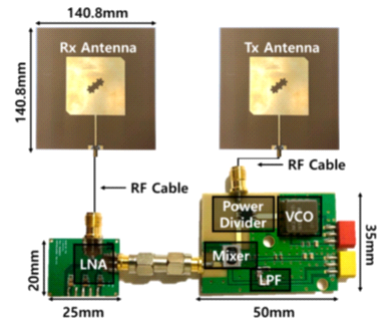


그림 5. 915-MHz 레이더 센서 모듈^[10]
Fig. 5. 915-MHz radar sensor module^[10].

하여 심장에 도달 후 반사되어 레이더 센서로 돌아오는 신호 크기를 비교한 결과, 915 MHz에서 2.45 GHz보다 7 dB 작은 손실을 얻을 수 있음을 경로 손실 계산을 통해 확인하였다.

동작 주파수에 의한 생체신호수집 성능 향상을 검증하기 위해, 그림 5와 같이 915-MHz 레이더 센서를 설계 및 제작하였다. 낮은 동작 주파수로 인해 증가된 안테나 물리적 크기를 줄이기 위해 코호 눈송이 패턴을 패치 안테나에 추가하는 소형화 기법을 제안하였으며, 이로 인해 변화하는 안테나 입력 임피던스를 보상하기 위한 저잡음 증폭기 IC를 설계하여 구성하였다^{[10]~[12]}. 제작한 모듈은 안테나와 저잡음 증폭기를 제외하고 가로 5 cm, 세로 3.5 cm 크기로 FR4 PCB에 설계 및 제작되었다^[10].

3-2 생체신호 검출용 신호처리 기법

일정 시간 동안 레이더 센서에서 수집된 신호는 일반적으로 FFT(Fast-Fourier Transform)를 거쳐 주파수 형태로 표시되며, 알려진 분당 심박수 및 호흡수는 1분당 각각 50~90회, 12~48회이다. 이를 주파수 대역으로 변환하여 심박은 0.8~1.5 Hz, 호흡은 0.2~0.8 Hz 사이 주파수 대역에서 나타나는 신호의 최대 피크값으로 대표하여 나타내었다^{[11],[13],[10]}. 이러한 종래 방법은 FFT가 갖는 특성으로 인하여 주기성을 갖는 데이터 수가 많아질수록 정확한 피크를 나타내지만, 사람 심박수는 인체 특이성을 포함하고 있어 특성과 상태에 따라 완전한 주기성을 갖지 못하므로 단일 피크로 나타내는데 한계가 존재한다. 특히, 시간

에 따라 달라지는 생체신호 변이 정보 획득은 교감-부교감 신경 활성화에 따른 지표로 분당 심박수보다 더 많은 인체 정보를 포함하고 있으므로, 레이더 센서에서 획득한 신호를 이용하여 ECG와 같은 수준으로 활용하기 위해서는 레이더 센서 출력을 시간 영역에서 처리하여 생체신호 특성을 획득하는 것이 필요하다^[13].

레이더 센서로 수집한 시간 영역 원신호에서 생체신호를 획득하는 방법으로, 이산 Wavelet 변환 시 얻어지는 scaling 함수에 기반을 둔 신호처리 기법을 그림 6과 같이 제안하였다^[14]. 일반적으로 알려진 분당 심박수에 해당하는 주파수 영역이 정해져 있으므로, Wavelet 변환 범위와 scaling 함수로 표현되는 주파수 영역을 심박 신호가 위치한 주파수 영역과 유사하게 설정하여 기존 방법보다 작은 샘플링 수를 사용해도 정확한 생체신호 추출이 가능하다.

레이더 센서 원신호에서 정확한 피크를 추출하는 것은 분당 심박수를 시간 영역에서 정확하게 측정하는데 중요한 요소이다. 원신호에서 피크수를 정확하게 찾는 방법으로, 그림 7과 같이 원신호 크기에 따라 문턱 전압을 가변하여 외부 잡음에 의한 피크수 검출 오류를 줄일 수 있는

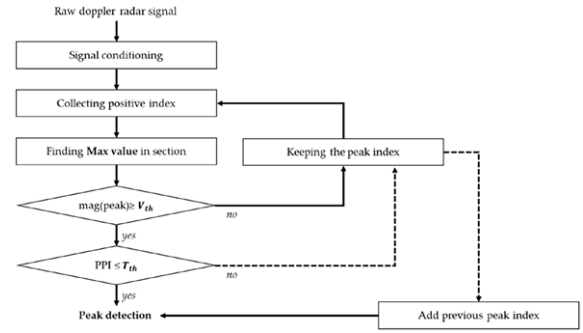


그림 7. 가변 문턱 전압이 적용된 영교차법 기반 피크 검출 알고리즘

Fig. 7. Peak detection algorithm based on zero-crossing method with an adaptive threshold voltage.

신호처리 기법을 제안하였다^[13]. 레이더 센서 원신호에서 DC 오프셋 전압을 제거한 파형은 한 주기 내에서 음에서 양으로 변화하는 수가 분당 심박수와 유사하게 나타난다. 그러나 측정 대상 주변 환경에서 유입되는 잡음으로 인해 원신호 왜곡이 발생하는 경우, 기존 전압이 고정된 종래방법은 분당 심박수 검출에 큰 오차가 나타난다. 수집된 전압으로부터 문턱 전압을 연속적으로 가변하는 제안 방법은 이러한 오차 발생을 줄여, 생체신호 검출 정확도와 처리 시간을 모두 높이는 방법이다^[13].

IV. 제안 레이더 센서를 이용한 심박수 측정

4-1 CW 레이더 센서를 이용한 원격 생체신호 검출

레이더 센서에서 수집된 생체신호 정확성을 검증하기 위해, 그림 8과 같이 접촉식 ECG 센서와 호흡 벨트를 기준 센서로 측정 셋업을 구성하여 제안한 915 MHz CW 레이더 센서에서 수집된 원격 생체신호와의 특성을 비교하였다. 일반적인 FFT 방식으로 신호 처리된 그림 9의 측정 결과에서, 제안하는 레이더 센서를 이용하여 0.8 m 떨어진 거리에서 수집한 생체신호는 접촉식 기준 센서에서 측정한 결과와 96.5% 이상 일치함을 확인할 수 있다^[10]. 거리에 따른 생체신호 측정 결과는 표 1에서 알 수 있듯이 제안하는 레이더 센서가 충분한 SNR이 얻어지는 거리 내에서는 일정한 검출 특성을 가지며, SNR 저하로 인해

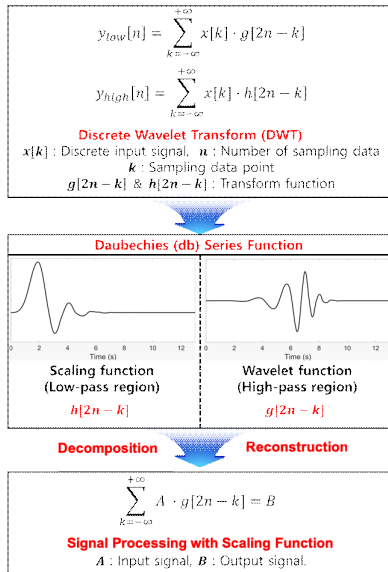


그림 6. Wavelet 변환기반 심박검출 알고리즘

Fig. 6. Heartbeat detection algorithm based on wavelet transform.

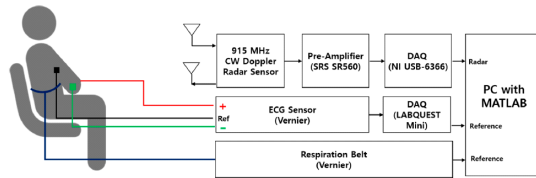


그림 8. 915 MHz CW 레이더 센서를 이용한 원격 생체 신호 검출 테스트 셋업

Fig. 8. Test setup for vital signal detection using the proposed CW radar sensor operating at 915 MHz.

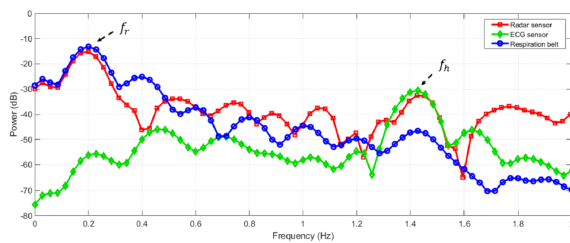


그림 9. 제안하는 레이더 센서와 기준 센서에서 획득한 생체신호 주파수 스펙트럼

Fig. 9. Vital-signs spectra measured by the proposed 915-MHz CW radar sensor and the reference sensors.

표 1. 측정 거리에 따라 레이더 센서를 이용하여 검출된 생체신호 정확도

Table 1. Detection accuracy of vital signs depending on measurement distances by using the radar sensor.

Distance (cm)	Respiration			Heart rate		
	Radar (BPM)	Reference (BPM)	Error (%)	Radar (BPM)	Reference (BPM)	Error (%)
20	13.67	13.69	-0.13	75.24	72.00	4.50
40	13.67	13.69	-0.13	70.08	70.02	0.09
60	15.38	15.41	-0.16	66.66	66.84	-0.27
80	13.67	14.06	-2.77	64.98	65.16	-0.28
100	17.09	17.11	-0.09	64.98	65.16	-0.28
120	17.09	15.48	10.43	64.98	66.84	-2.78
140	N/A	13.69	N/A	N/A	66.84	N/A

특정 거리 이상에서 급격한 오차 증가를 보여준다.

표 2에서 나타난 피검자 6명에 대한 생체신호 측정 결과는 SNR이 낮은 심박 신호 검출에서 개인차가 크게 나타남을 보여준다. 이러한 특성은 심박 신호 검출이 미

표 2. 피검자 6명에 대해 915-MHz CW 레이더 센서를 이용하여 측정된 생체신호 정확도

Table 2. Detection accuracy of vital signs for six subjects by using the radar sensor.

Subject	Respiration			Heart rate		
	Radar (BPM)	Reference (BPM)	Error (%)	Radar (BPM)	Reference (BPM)	Error (%)
A	11.96	11.99	-0.25	85.50	85.68	-0.21
B	13.67	13.71	-0.26	76.92	73.68	4.40
C	15.38	15.43	-0.27	88.86	90.84	-2.18
D	10.25	10.28	-0.29	71.82	70.26	2.22
E	18.80	18.85	-0.25	70.08	73.68	-4.89
F	10.25	10.28	-0.29	86.08	85.68	0.47
Mean error rate	-	-	0.27	-	-	2.39

미한 심장 박동 움직임을 감지하는 것이므로, 성별 차이에 의한 피하조직 구성 차이와 측정 당시 의복 재질 및 두께 등 다양한 개인별 요소가 측정 결과에 영향을 주는 것으로 이해할 수 있다.

4.2 시간영역 신호처리 기법을 통한 심박수 측정

Wavelet 변환 과정에서 획득한 scaling 함수를 사용하여 측정된 원격 생체신호 검출 결과는 표 3에 나타난 것과 같이 2.45 GHz 레이더 센서 모듈에 시간영역 생체신호 검출에 사용하는 단순 피크 검출기법 및 자기상관(auto-correlation) 기법을 적용한 결과와 비교하여 가장 낮은 평균 오차율을 나타내었다^[4]. 제안하는 방법은 기존 방법 대비 30% 적은 샘플수만으로 표 3과 같은 심박 신호를 얻어낼 수 있으므로, 제안하는 방법이 샘플링 속도가 동일한 환경에서 기존 방법보다 실시간에 가까운 동작 특성을 얻을 수 있다고 할 수 있다.

915 MHz 레이더 센서에서 측정된 생체신호 검출 특성과 2.45 GHz 레이더 센서를 이용한 측정 결과는 SNR이 충분한 측정 환경에서 기준 센서 대비 거의 같은 정확도를 갖는 것으로 나타났다. 2.45 GHz 레이더 센서 모듈을 이용하여 6명 피검자를 대상으로 20분 동안 측정된 분당 심박수 검출 정확도는 ECG 센서 대비 평균 96.78%로 나타

표 3. Wavelet 변환기반 알고리즘을 적용하여 측정된 피검자 10명의 생체신호 비교

Table 3. Comparison of vital signals of 10 subjects measured with the proposed algorithm based on the wavelet transform.

Subject	Contact sensor 〈Reference〉	Radar sensor		
		Peak detection	Auto- correlation	Proposed method
Male A	75	82	75	70
Male B	80	88	67	79
Male C	72	84	66	69
Male D	64	74	60	65
Male E	65	76	72	65
Female A	66	70	67	64
Female B	70	84	75	72
Female C	66	78	60	69
Female D	62	76	75	67
Female E	70	78	60	65
MER (%)	-	14.3	9.4	3.9
SD%	-	3.1	7.6	3.2

났다^[13]. 20분 동안 변화한 심박수 측정 결과는 그림 10과 11에서와 같이 신호처리 윈도우 크기와 무관하게 분당 심박수와 이에 대한 표준편차 모두 기준 센서의 변화와 동일한 형태로 측정되었다. 특히 피검자가 졸음을 인식했다고 답한 그림 10과 11의 화살표 이후 시간에서, 졸음이

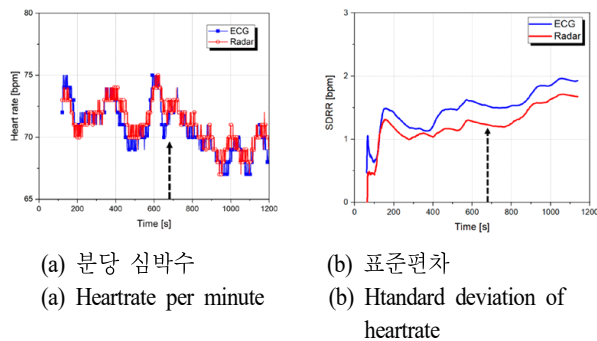


그림 10. 20분간 측정된 데이터에 60초 윈도우 크기를 적용한 심박수 모니터링 측정 결과

Fig. 10. Heartrate monitoring with a window size of 60 seconds measuring for 20 minutes.

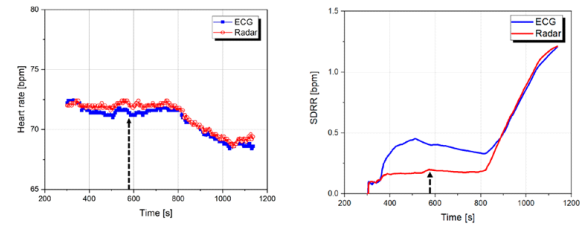


그림 11. 20분간 측정된 데이터에 300초 윈도우 크기를 적용한 심박수 모니터링 측정 결과

Fig. 11. Heartrate monitoring with a window size of 300 seconds measuring for 20 minutes.

나타날 때 알려진 ECG 신호의 심박수 저하 특성이 레이더 센서에서도 동일하게 나타나고 있다는 점에서, 제안하는 CW 레이더 센서가 단순한 분당 심박수 정확도를 확인하는 수준에서 발전해 시간에 따른 심박수 변화를 인식할 수 있다는 것을 보여준다고 할 수 있다.

4.3 CW 레이더 센서를 이용한 심박변이도 분석

그림 10과 11에서 제시된 심박수 변화에 대한 모니터링 가능성을 발전시켜, ECG에서 생체신호 특이점 분석에 활용하는 심박변이도(heart rate variability: HRV) 분석을 레이더 센서에서 획득한 생체신호를 이용하여 수행하였다^[13]. ECG 기반 HRV 분석은 일상 상태와 졸음 상태를 구분하는데 활용할 수 있으며, 졸음 상태가 되는 경우 분당 심박수 저하와 심박피크 표준편차 및 실효값 표준편차가 늘어나는 것으로 알려져 있다^[15]. 6명 피검자를 대상으로 ECG 센서와 CW 레이더 센서를 이용하여 측정분당 심박수(mHR), 피크 위치별 표준편차(SDNN) 및 실효값 표준편차(RMSSD)에 대한 HRV 분석결과는 표 4~6과 같다.

졸음 상태 여부 판단은 접촉식 뇌파센서 출력 변이와 피검자 문답지 내용, 눈 깜박임 횟수 관찰 결과 등 졸음 발생 징후를 모두 고려하여 판단하였다. 표 4는 졸음 상태에 따른 분당 심박수 변화가 센서 종류에 관계없이 유의미하게 변화하지 않음을 보여준다. 이 결과는 분당 심

표 4. CW 레이더 센서와 ECG 센서를 이용하여 측정된 분당 심박수(mHR)에 대하여 졸음 상태에 따른 심박변이도 분석 결과

Table 4. HRV analysis of the mHR in the wake-drowsiness states from the measured data by using ECG and CW radar sensors.

Subject	Heart rate by 60 s window (BPM)				Heart rate by 300 s window (BPM)			
	ECG		Radar		ECG		Radar	
	Wake	Drowsiness	Wake	Drowsiness	Wake	Drowsiness	Wake	Drowsiness
1	67.00	66.10	67.00	65.19	68.60	65.73	68.40	65.93
2	81.12	82.35	74.44	74.02	81.32	81.48	76.10	74.60
3	84.09	73.85	81.17	73.29	84.72	75.67	81.31	75.26
4	86.23	84.08	76.83	79.60	87.00	83.65	79.00	80.04
5	71.87	69.05	72.04	69.57	71.69	69.94	72.02	70.24
6	75.32	63.63	75.41	63.85	73.80	64.79	73.20	64.87

표 5. CW 레이더 센서와 ECG 센서를 이용하여 측정된 피크 위치별 표준편차(SDNN)에 대한 졸음 상태별 심박변이도 분석 결과

Table 5. HRV analysis of the SDNN in the wake-drowsiness states from the measured data by using ECG and CW radar sensors.

Subject	SDNN by 60 s window (ms)				SDNN by 300 s window (ms)			
	ECG		Radar		ECG		Radar	
	Wake	Drowsiness	Wake	Drowsiness	Wake	Drowsiness	Wake	Drowsiness
1	63.96	80.74	92.10	293.10	55.32	86.20	80.17	276.33
2	45.67	48.24	282.66	284.73	53.80	67.25	230.69	260.10
3	48.91	64.03	157.02	296.04	45.79	67.02	160.97	242.32
4	25.38	32.32	222.52	195.04	34.85	37.40	240.13	207.84
5	51.38	60.55	125.68	201.96	52.05	66.48	122.68	203.76
6	37.60	50.80	114.41	94.15	51.81	54.98	149.19	103.00

표 6. CW 레이더 센서와 ECG 센서를 이용하여 측정된 실효값 표준편차(RMSSD)에 대한 졸음 상태별 심박변이도 분석 결과

Table 6. HRV analysis of the RMSSD in the wake-drowsiness states from the measured data by using ECG and CW radar sensors.

Subject	RMSSD by 60 s window (ms)				RMSSD by 300 s window (ms)			
	ECG		Radar		ECG		Radar	
	Wake	Drowsiness	Wake	Drowsiness	Wake	Drowsiness	Wake	Drowsiness
1	87.77	88.42	122.80	484.09	65.75	91.06	112.69	456.19
2	57.74	54.98	436.97	451.69	45.47	61.82	369.81	425.13
3	41.43	59.67	235.31	498.14	36.94	60.59	243.03	394.42
4	15.64	28.31	357.80	319.81	38.53	29.12	380.74	326.17
5	57.62	66.45	204.09	319.75	49.92	67.50	199.46	322.03
6	34.87	57.53	392.29	378.55	36.94	60.95	243.03	162.50

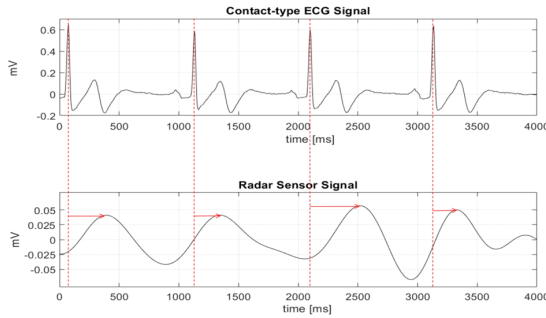


그림 12. 시간 영역에서 측정된 ECG 신호 파형과 레이더 신호 파형

Fig. 12. Signal waveforms of the ECG and the CW radar sensor in time-domain.

박수만으로 HRV 분석을 하는 것이 의미를 갖지 못하기에, 레이더 센서를 이용한 생체신호 분석에서 분당 심박수 획득이 중요한 지표가 아님을 보여준다. 표 5와 6은 심박 신호 피크가 발생하는 시간에 따른 특성 변화를 통계적으로 보여주는 지표인 SDNN과 RMSSD에 대한 결과로서, ECG에서는 줄음 상태에 따른 변화가 확인되는 반면, CW 레이더 센서에서는 피검자에 따라 일관성을 갖지 못함을 보여준다. 그림 12와 같이 레이더 센서는 다양한 위치에서 반사된 모든 신호가 수신되므로 심장의 전기적 활동을 전기 신호를 직접 측정하는 ECG 대비 주기성은 동일하게 나타나지만 피크 위치는 다르게 검출된다. 레이더 센서는 분당 심박수와 같이 신호 주기성에 근거한 데이터는 정확하게 측정이 가능하나, 레이더 센서 원신호를 이용하여 시간에 따른 피크 위치의 통계적 변화를 보여주는 SDNN과 RMSSD를 이용한 HRV 분석으로는 ECG와 신호발생 근원이 다르므로 특이점 분석에 한계가 있다. 따라서 레이더 센서를 이용한 HRV 분석을 위해서는 분당 심박수 정확도를 높이기 위한 일반적인 신호처리 기법과는 별개로, 시간 영역에서 변화하는 피크 위치를 ECG 수준으로 정확하게 측정할 수 있는 레이더 센서 신호처리 방법이 필요하다.

V. 결 론

간단한 하드웨어 구성만으로 원격 생체신호를 측정할 수 있는 GHz 대역 CW 레이더 센서 시스템을 제안한다.

제안하는 레이더 센서 시스템은 동작 주파수 특성에 따른 체내 전파 감쇄 특성을 고려하여, 상용 칩셋과 평면형 수동소자, 안테나 등을 사용하여 RF Front-end 모듈을 개발하였으며, 시간영역에서 생체신호 정보 획득을 위한 고감도 신호처리 알고리즘을 적용하였다. 피검자 6명에 대한 비교 측정을 통해, 제안하는 센서가 기존 접촉식 센서 대비 95% 이상의 분당 심박수 측정 정확도를 나타냄을 확인하였다. 레이더 센서 원신호가 가진 특성으로 인하여 추가적인 정보 획득이 가능한 HRV 분석은 ECG 수준으로 확보하기 어려우나, 추후 제시한 알고리즘에 기반을 둔 발전된 신호처리 기법을 적용하여 레이더 센서를 이용한 HRV 분석이 가능할 것이다.

References

- [1] N. Van Thi Phnouc, L. Tang, V. Demir, S. F. Hasan, N. Duc Minh, and S. Mukhopadhyay, "Microwave radar sensing systems for search and rescue purposes," *Sensors*, vol. 19, no. 13, p. 2879, Jun. 2019.
- [2] T. Fan, C. Ma, Z. Gu, Q. Lv, J. Chen, and D. Ye, et al., "Wireless hand gesture recognition based on continuous-wave Doppler radar sensors," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 11, pp. 4012-4020, Nov. 2016.
- [3] H. Lee, B. H. Kim, J. K. Park, and J. G. Yook, "A novel vital-sign sensing algorithm for multiple subjects based on 24-GHz FMCW Doppler radar," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 10, p. 1237, May 2019.
- [4] K. J. Baik, B. J. Jang, "Distance sensing of moving target with frequency control of 2.4 GHz Doppler radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 2, pp. 152-159, Feb. 2019.
- [5] C. Li, M. R. Tofighi, D. Schreurs, and T. S. J. Horng, *Principles and Applications of RF/Microwave in Healthcare and Biosensing*, Boston, MA, Elsevier, pp. 243-294, 2017.
- [6] E. Hyun, Y. S. Jin, J. H. Park, and J. R. Yang, "Passenger recognition based on Doppler radar," in *2019 The*

- Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (KIEES) Summer Conference*, Jeju, Korea, Aug. 2019, p. 571.
- [7] E. Schires, P. Georgiou, and T. S. Lande, "Vital sign monitoring through the back using an UWB impulse radar with body coupled antennas," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 292-302, Apr. 2018.
- [8] R. Chae, A. Wang, and C. Li, "FMCW radar driver head motion monitoring based on Doppler spectrogram and range-Doppler evolution," in *2019 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiS-Net)*, Orlando, FL, Jan. 2019, pp. 1-4.
- [9] J. H. Park, J. Y. Kim, S. Y. Jang, B. Y. Yoo, J. H. Son, H. N. Lee, and J. R. Yang, "A 2.45-GHz Doppler radar sensor for vital signs detection," in *2017 The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (KIEES) Summer Conference*, Jeju, Korea, Aug. 2017, p. 246.
- [10] J. H. Park, Y. J. Jeong, G. E. Lee, J. T. Oh, and J. R. Yang, "915-MHz continuous-wave Doppler radar sensor for detection of vital signs," *Electronics*, vol. 8, no. 8, p. 855, May. 2019.
- [11] G. E. Lee, J. H. Son, U. G. Choi, J. H. Park, and J. R. Yang, "Minimized method of the 915-MHz circularly polarized patch antenna using Koch-snowflake patterns," in *2018 The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (KIEES) Summer Conference*, Jeju, Korea, Aug. 2018, p. 264.
- [12] Y. J. Jeong, B. Y. Yoo, and J. R. Yang, "A 915-MHz low-noise amplifier using 2-stage cascade inverters," in *2018 The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (KIEES) Summer Conference*, Jeju, Korea, Aug. 2018, p. 242.
- [13] J. Y. Kim, J. H. Park, S. Y. Jang, and J. R. Yang, "Peak detection algorithm for vital signs detection using Doppler radar sensor," *Sensors*, vol. 19, no. 7, p. 1575, Apr. 2019.
- [14] C. H. Choi, J. H. Park, H. N. Lee, and J. R. Yang, "Heartbeat detection using a Doppler radar sensor based on the scaling function of wavelet transform," *Micro-wave and Optical Technology Letters*, vol. 61, no. 7, pp. 1792-1796, Jul. 2019.
- [15] H. G. Kim, E. J. Cheon, D. S. Bai, Y. H. Lee, and B. H. Koo, "Stress and heart rate variability: A meta-analysis and review of the literature," *Psychiatry Investigation*, vol. 15, no. 3, pp. 235-245, Feb. 2018.

박 재 현 [영남대학교 전자공학과 / 석사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-0840-5443>



2019년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)

2019년 3월~현재: 영남대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] 초소형 레이더센서, 원격 생체신호 검출/분석 시스템 등

김 주 연 [영남대학교 전자공학과 / 석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-9305-036X>



2018년 8월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)

2018년 9월~현재: 영남대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] 생체신호 검출 알고리즘, 머신러닝 응용 생체신호 처리/분석 등

장 세 영 [영남대학교 전자공학과 / 석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1060-0267>



2019년 8월: 영남대학교 생명과학과 (이학사)

2019년 9월~현재: 영남대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] 전자기파 인체 영향 분석, 생체신호 검출 특성 해석 등

심 재 용 [영남대학교 전자공학과 / 학사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6749-2148>



2015년 3월~현재: 영남대학교 전자공학과 학사과정

[주 관심분야] FSK 레이더 센서, 생체신호 검출용 레이더 센서 등

지 현 준 [영남대학교 전자공학과 / 학사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-5930-096X>



2015년 3월~현재: 영남대학교 전자공학과 학사과정

[주 관심분야] 레이더 센서 기반 심박 변이도 분석기법, 초소형 레이더 센서 모듈 등

양 종 렬 [영남대학교 전자공학과 / 조교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4939-3274>



2003년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2009년 1월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)

2011년 10월: 삼성전자 S.LSI사업부 책임연구원

2016년 8월: 한국전기연구원 첨단의료기 기연구본부 선임연구원

2016년 9월~현재: 영남대학교 전자공학과 조교수

[주 관심분야] 초소형 레이더센서, 원격 생체신호 검출/분석 시스템, 테라헤르츠 영상시스템, RF/mmW/THz Front-end IC 등