

인체 움직임을 고려한 소형 근접 마이크로파 심박 센서

윤기호

성결대학교 정보통신공학과 교수

Compact Microwave Heartbeat Proximity Sensor Under Human Body Movement

Gi-Ho Yun

Professor, Department of Information Communication Engineering, Sungkyul University

요약 본 논문에서는 저속으로 불규칙하게 움직이는 인체의 심박신호를 감지하기 할 수 있어 웨어러블 디바이스에 적용 가능한 소형 마이크로파 센서를 제안하였다. 이를 위해 2.4 GHz ISM 대역에서 평형 구조를 갖는 마이크로스트립 방사 패치들과 자체발진 검출회로 및 귀환회로가 구성되었다. 이론 전개와 시뮬레이션을 통해 제안된 구조의 타당성을 확인하였고 제작된 시제품을 측정하였다. 회로의 보드는 65mm x 85mm² 의 작은 크기이며, 간단한 고주파 회로구조로 60mW 수준의 작은 전력을 소모한다. 센서와 직선거리 2~30mm, 측면 좌우 거리 ±20mm 범위 내에서 저속(0.5Hz)으로 움직이는 인체로부터 심박신호를 얻을 수 있었다.

주제어 : 심박, 마이크로파, 평형회로, 방사 패치, 근접센서

Abstract In this paper, a small microwave sensor that can be applied to a wearable device is proposed because it can detect the heartbeat signal of a human body moving irregularly at low speed. It consist of balanced microstrip radiation patches in the 2.4 GHz ISM band, self-oscillation detection circuit, and feedback circuit. Based on the theoretical development and simulation, the validity of the proposed structure was confirmed and the manufactured prototype was tested. The board size of the circuit is as small as 65mm x 85mm², and has a low power consumption of 60mW thanks to the simple RF circuit structure. Finally heartbeat signal has been obtained from a human body moving at low speed (0.5Hz) within a linear distance of 2 to 30mm close to the sensor and a lateral distance of ±20mm.

Key Words : Heartbeat, Microwave, Balanced circuit, Radiation patch, Proximity sensor

1. 서론

최근 RF 및 마이크로파 센서는 전통적인 접촉형 유선 센서 기술에 비해 장점 들을 가지고 있어 바이오의학 응용에 서 관심 분야이다. 비 침습 방식으로 생체 신호를 검출할 수 있는 특성은 영유아, 피부 접촉에 취약한 화상 환자들에게 편의를 제공한다. 이를 위해 마이크로파 도플러 레이더 또

는 기존의 RF 수신기 방식을 위한 센서 들이 연구되고 있 다. 특히, 웨어러블(wearable) 장치로 심박 신호를 검출하 기 위해서는 수십mm 부터 인체에 거의 접촉하는 수준의 간격까지 일정한 고주파 성능이 요구된다. 아울러 크기와 소모 전력이 고려되어야 한다. 이런 측면에서 작으면서 간 단한 회로구조의 근접센서가 주목받기 시작하였다. 인체로 부터 근접거리에서 심박신호를 검출하는 연구[1-3]들

*Corresponding Author : Gi-Ho Yun(ghyun@sungkyul.ac.kr)

Received August 26, 2020
Accepted October 20, 2020

Revised October 6, 2020
Published October 28, 2020

통해 근거리 장(field)의 고정위치에서 심박 수 신호 추출 가능성을 제시하였다. 또한, 불규칙한 인체 운동을 고려하는 연구가 시도되어 마이크로파 송수신시스템[4]과 카메라와 마이크로파 센서의 조합[5]을 제안하였으나 구조가 복잡하여 전력 소모가 크고 하드웨어 볼륨이 커 웨어러블 디바이스로서 단점을 가진다. 한편, 마이크로파 센서들이 인체에 접촉할 정도로 근접하거나 움직이는 경우 고주파특성이 크게 변화돼 센서 성능이 제한된다. 연구[6]는 90° 마이크로스트립 하이브리드(hybrid)를 이용한 평형 안테나를 제안한 바 있으며, 안테나에 물체들이 근접하여도 일정한 송신과 수신 분리를 확보함으로써 인체에 근접한 생체신호 검출용 도플러 레이더에 적용 가능성을 보여줬다.

본 연구에서는 인체가 저속으로 불규칙하게 움직일 때 2~30mm 이내의 근접 근거리에서 심박 신호를 검출할 수 있는 소형 마이크로파 센서를 제안한다. 2.4GHz ISM 주파수 대역에서 평형 회로에 연결된 2개의 마이크로스트립 방사 패치(patch)의 상호 독립된 2개의 포트들이 자기 발진 검출기(SOD, self oscillating detector)와 RF 신호 검출 회로로 구성되는 귀환회로에 각기 연결된다. 이들 회로를 이용하여 매우 근접한 인체의 움직임 속에서도 심박 신호를 검출할 수 있는 전체 회로구조와 개별 회로 동작 이론을 제시한다. 시뮬레이션을 통해 설계된 회로를 기반으로 시제품이 제작되고 측정 결과들로부터 마이크로파 심박 센서로서 가능성을 확인한다.

2. 전체 시스템 구성 및 설계

2.1 전체 시스템 동작 개념

Fig. 1에 제안된 마이크로파 심박신호 센서에 대한 개념도를 볼 수 있다. 평형 구조를 갖는 마이크로스트립선로 방사 패치들의 근접장(near field)에 인체가 위치하며, 인체와의 간격(d, distance)이 30mm 이내인 응용에 본 센서가 사용된다고 가정한다. 평형 방사 패치(balanced radiation patch)들은 상호직교특성으로 격리된 2개의 포트(P_1, P_2)를 갖는다. P_1 포트는 결합 커패시터(C_c)를 통해 고주파 트랜지스터(Q1), VD(varactor diode) 및 전원공급 회로들로 구성되는 SOD(self-oscillating detector)와 연결된다. 평형 방사 패치들은 ISM 대역인 2.4GHz에서 SOD의 발진을 위한 공진기 역할을 하는 한편, 근접 장에 놓인 인체와의 간격(d)에 따라 입력 임피던스가 변화된다. 결과적으로 SOD 발진주파수가 달라진다. 동시에 트랜지스터(Q1)의 비선형

성에 기인한 자체 혼합동작에 의해 발진주파수 변화 분에 상응하는 기저대역 신호를 생성시킨다[7,8]. 심박신호를 포함한 인체의 움직임을 반영한 기저대역 신호(V_b)는 데이터 처리장치(data processor)에 의해 심박신호가 최종 출력(V_{out}) 된다. 한편, 평형 방사패치를 통해 공간상에 방사된 고주파 발진신호는 근접 장에 있는 인체와의 거리(d)에 따라 신호 크기가 달라지며, 평형 방사패치의 포트(P_2)를 통해 신호가 수신된다. 이때 포트(P_1)과는 독립적이어야 하며 특히 인체와 거리가 가까울수록 서로 간섭을 주지 않아야 SOD의 성능에 영향을 주지 않는다. 고주파검파기(RF detector)는 수신 신호의 크기에 비례하는 직류전압을 귀환회로(feedback)에 제공하며, 귀환회로에서는 필터링과 신호처리된 제어전압(V_c)을 출력시켜 배랙터다이오드(VD)를 통해 SOD의 발진주파수를 제어한다. 이러한 귀환 제어과정을 통해 SOD가 2.4GHz ISM 대역의 특정 주파수를 중심으로 안정하게 발진하게 함으로써 센서와 매우 근접하게 위치한 인체의 저주파 움직임 속에서 심박신호를 추출할 수 있게 된다.

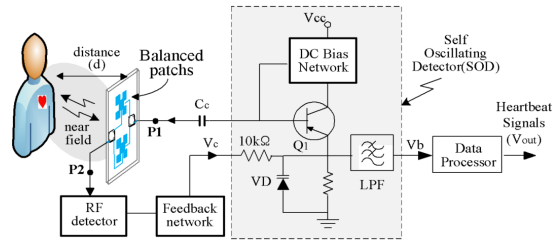


Fig. 1. Overall structure of the proposed heartbeat sensor

2.2 평형 방사패치의 구성 및 설계

Fig. 1의 좌측에 있는 평형 방사패치의 상세 구조는 Fig. 2(a)와 같다. 평형 패치들(Balanced patches)에서 인체 방향으로 방사된 고주파 신호는 인체에서 반사되고 거리(d)에 따라 선형적으로 포트(P_2)에 수신된다. 그러나 거리(d)가 2mm 근처까지 줄어들고 좌우로 이동하는 경우에 각 패치의 입력 임피던스 정합 상태가 달라져 원거리에서 확보했던 분리도가 급격히 떨어지며, SOD의 특성에 영향을 준다. 이를 해결하기 위해 제안된 Fig. 2(a) 구조는 포트(P_1)와 포트(P_2) 사이에 2개의 90° 3dB hybrid와 방사 패치들을 이용하여 평형회로를 구성한다. Fig. 2(b)처럼 소형화된 구조로 FR4 보드위에 설계[9]된 각 방사패치는 급진점(P_1', P_2')의 이중급진 구조를 가지며 이들은 상호직교 특성을 나타낸다. 포트(P_1)와 포트

(P_2) 사이에 회로들이 평형구조를 갖기 때문에 방사패치 A로 연결되는 상향경로와 방사패치 B로 연결되는 하향 경로가 동일한 전기적 특성을 갖기만 하면 2개의 포트들 사이에 높은 분리도를 얻어낼 수 있다[6,9]. 특히 방사패치에 인체가 가깝게 접근하여 개별 방사패치의 격리도가 악화되어도 전체적인 평형회로의 격리도를 높은 수준에서 확보할 수 있다.

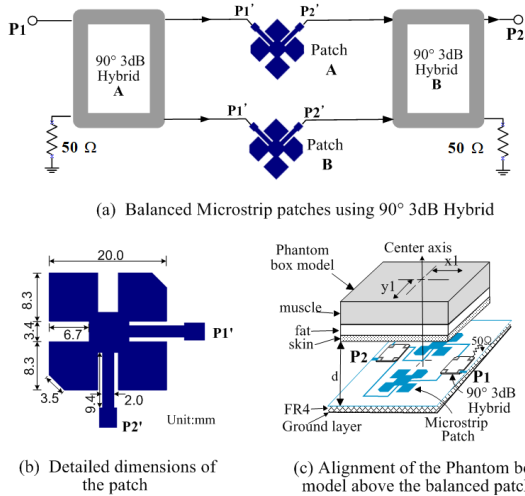


Fig. 2. The structure of the balanced Microstrip patches using 90° 3dB hybrid

Fig. 2(c)에서 평형 방사패치 위에 인체 가슴 부위의 조직들을 모델링한 팬텀박스(Phantom box)를 올려놓고 그 위치(d, x_1, y_1)를 변화시켜 포트(P_1)와 포트(P_2) 사이에 격리도($dB(S_{21})$)를 조사하였다. 가슴 부위는 피부(skin)나 지방(fat)층보다는 근육조직(muscle)이 대부분을 차지하는 것으로 가정하고 유전율과 전도도를 연구[10,11]를 참고하여 Table 1에 나열하였다. ANSYS HFSS를 이용한 시뮬레이션 결과를 Fig. 3에서 볼 수 있다. 원거리($d=30\text{mm}$)에서는 격리도를 2.45GHz 부근에서 -35dB 이상을 확보하고 있으나, 거리가 가까울수록 격리도가 악화하는 현상을 볼 수 있다. 이는 인체가 근접함에 따라 급전 포트들 사이에 유전체에 의한 용량성 커패시턴스가 증가하여 각 입력 임피던스에 영향을 줌으로써 포트들 사이를 전자기 결합하는 것으로 판단된다. 직선거리(d)가 2mm까지 근접하고 좌우(x_1, y_1) 간격이 $\pm 20\text{mm}$ 까지 벌어져도 20dB의 격리특성을 보이는 결과를 얻었다. 본 연구에서는 이들 결과를 토대로 직선거리 (d) 2~30mm, 좌우(x_1, y_1) $\pm 20\text{mm}$ 범위에서 저속으

로 인체 또는 센서의 움직임에 대한 심박신호 검출 가능성을 점검한다.

2.3 SOD 회로설계

SOD(self-oscillating detector)는 하나의 트랜지스터를 이용하여 고주파 발진, 주파수 혼합, 검출을 동시에 수행하는 회로이며 주로 근접거리 고주파 수신기의 전위단 (front end)에 사용된다. 수신회로 구조가 간단하여 회로 크기가 작고 적은 전력소모가 필요한 응용에 사용된다[7,8]. Fig. 4에 평형 방사 패치회로를 포함한 SOD 회로 구성을 볼 수 있다. 평형 방사 패치는 발진회로의 공진기 역할을 한다. Q_1 으로 표시된 BJT(Bipolar Junction Transistor) 이미터 단자의 임피던스를 직렬 귀환시켜 발진조건이 만족되며 평형 방사패치의 공진주파수가 발진주파수를 결정한다. 또한, BJT 이미터 단자에 연결된 배랙터 다이오드(VD)에 제어전압(V_c)을 인가하여 발진주파수를 이동시키는 VCO (Voltage controlled oscillator) 특성을 나타낸다.

Table 1. Dielectric characteristic of human chest tissue

Tissue	Thickness	Relative Permittivity	Conductivity(S/m)
Skin(dry)	0.5mm	44.6	1.7
Fat	0.5mm	4.4	0.08
Muscle	30mm	54	2.2

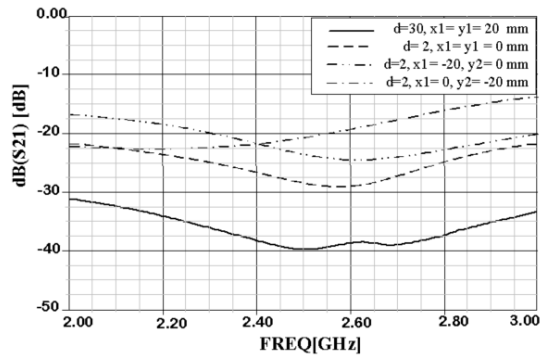


Fig. 3. Simulation results of the balanced Microstrip patches using 90° 3dB hybrid

평형 방사패치는 마이크로스트립선로 구조로서 팬텀 박스와 사이의 간격(d)에 따라 포트(P)에서 입력 임피던스 변화가 발생하고 Fig. 5(a)처럼 SOD 발진주파수가 이동한다. 발진 상태에서 BJT의 베이스(Base)와 이미터

(Emitter) 접합 다이오드의 비선형 특성에 의해 자체 혼합효과를 얻을 수 있으며, 이를 위해 적절한 DC 바이어스(R2) 및 주변 회로가 설계된다[7,8]. 즉, 인체 움직임에 따른 주파수 변화를 자체혼합 효과에 의해 SOD는 발진 주파수 변이만을 검출해낸다. Fig. 4 오른쪽 아래처럼 BJT의 이미터 단자의 출력신호는 LPF(lowpass filter)를 통과하여 최종 기저 대역 신호(baseband signal(Vb))를 출력시킨다. LPF는 발진주파수를 포함하는 고주파 신호 신호들을 제거한다. 출력전압(Vb)은 인체의 움직임을 나타내는 저주파 신호와 심장박동 신호들이 포함된다.

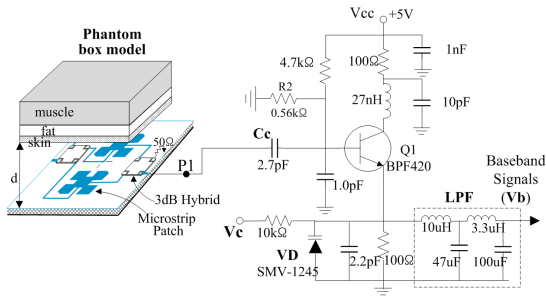


Fig. 4. Schematic diagram of the Self-Oscillating Detector (SOD) connected with balanced patches

한편, 인체와의 거리(2~30mm)에 따른 발진주파수 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 5(a)에서 볼 수 있다. 시뮬레이터는 ANSYS DESIGNER가 이용되었다. 거리가 증가할수록 주파수가 감소하고 최대 17MHz 주파수 변화 값을 보인다. 좌우(x1,y1) 축의 변화도 중심(0,0)에서 멀어질수록 유사한 주파수 변화를 나타낸다. 또한 Fig. 5(b)는 인체로부터 특정 위치(d=10, x1=y1=0mm)에서, SOD의 VCO 특성에서 제어전압(Vc)에 따른 주파수 변화를 나타낸다. 2.490GHz 부근에서 평균 10MHz/V의 이득은 인체의 위치변동을 추적할 수 있는 능력을 SOD에 제공한다.

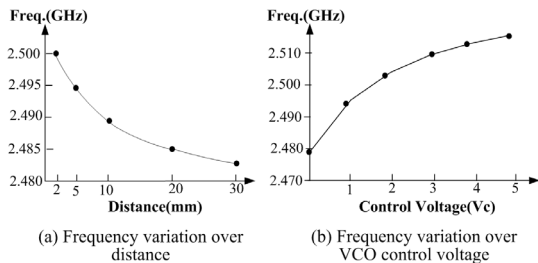


Fig. 5. Frequency variation characteristic of the VCO

2.4 귀환회로 설계

심장 박동의 작은 변위에 따라 SOD 회로는 발진주파수를 중심으로 작은 주파수 변화가 발생한다. 심박의 변위는 일반적으로 0.5~1mm[12,13] 범위를 갖는다. 2.4GHz ISM 대역에서 고주파 발진주파수를 이용하여 고정위치에서 심박신호를 관찰한 종전 연구[3,14] 들에 따르면, 심장 박동의 1mm 변위 폭에서 약 200KHz 주파수 변화를 나타냈다. 그러나 인체가 운동 중이거나 이동상황에서는 센서와의 거리변동 폭이 커지므로 발진 주파수 변화도 커지며, 심할 경우 신호처리 범위에서 벗어나 심박신호를 검출할 수 없게 된다. 이때 SOD를 구성하는 VCO(voltage controlled oscillator)에 인가되는 전압(Vc)을 귀환회로를 통해 제어함으로써 심박신호를 검출 가능한 범위 내로 가져올 수 있다. 본 연구에서는 이의 타당성을 확인하기 위해 인체의 움직임을 나타내는 주파수로 0.5Hz로, 전형적인 일반인의 안정 상태를 나타내는 심장 박동 주파수로 1.3Hz로 설정[15]하였다. 또한 인체와 센서 사이의 직선거리(d)를 2~30mm 그리고 좌우 거리(x1,y1)를 ±20mm 이내로 움직임의 범위를 가 정하여 귀환회로를 설계한다.

한편, Fig. 3에서 보는 바와 같이 평형 방사 패치의 2개의 포트(P1,P2)은 전기적으로 격리돼 있다. 포트(P1)에서 공간상에 방사된 고주파 신호는 인체의 움직임 정보를 가지고 반사된다. 포트(P2)에서는 포트(P1)에 연결된 SOD 회로에 영향을 주지 않고 반사된 신호를 수신한다. Fig. 6에서 귀환 회로들의 구성을 볼 수 있다. 포트(P2)에 들어온 신호는 RF 검파기(AnalogDevice사의 AD8312)에 입력된다. 검파기는 고주파 신호전력 크기에 비례하여 직류전압(Vdo)을 출력한다. 거리가 멀수록 포트 간 격리도(dB(S21))가 커지므로 검파기의 출력전압은 작다. 이어 반전 증폭기(inverting amplifier)에서 위상이 180도 반전되고 가변저항(Rvar)을 이용하여 적정 크기로 증폭된다. 증폭된 신호는 기저대역(baseband) LPF를 통과한다. LPF는 0.6Hz의 차단주파수를 가지며, 1.3Hz 부근 심박신호를 20dB 이상 제거되도록 설계된다. 따라서 LPF 출력신호는 인체의 저주파 움직임 신호를 나타내며, VCO 제어 전압(Vc)으로 사용된다. 전압(Vc)의 첨두치 간 크기 범위와 중심전압을 인체의 움직임에 맞춰 설계한다.

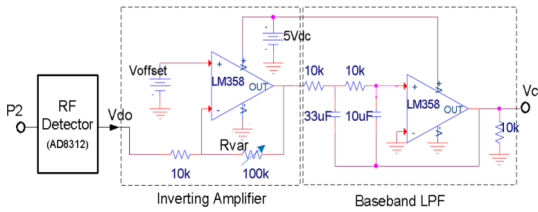


Fig. 6. Block diagram of the feedback circuitry

Fig. 7은 인체와 센서 간의 거리(직선 또는 사선)가 2~40mm 사이를 인체가 움직일 때 RF 검출기(detector)의 출력전압(Vdo)과 VCO 제어전압(Vc)신호를 동시에 보여준다. 거리에 따라 직류전압(Vdo)의 첨두치 간 범위는 약 60mV를 갖는다. 거리가 40mm보다 늘어나는 경우 Vdo는 20mV보다 작으며, SOD 발진주파수도 감소한다. 거리가 더욱 벌어질 경우 귀환회로의 제어범위를 벗어날 수 있으며, 반대로 간격이 2mm보다 더욱 좁아질 때도 마찬가지이다. 직류전압(Vdo) 신호는 반전증폭기에서 증폭되고, 오프셋 전압(Voffset)을 통해 중심전압이 조정된다. 이때 Fig. 5(b)처럼 2.495GHz를 중심으로 30MHz 주파수범위를 가지며 SOD 회로에서 심박신호를 검출할 수 있게 한다.

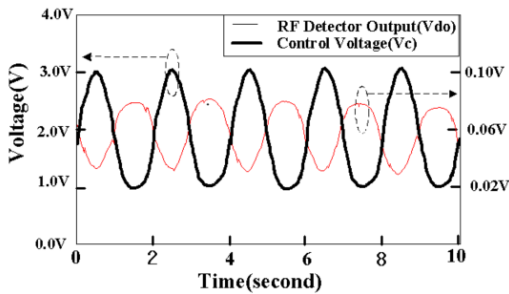


Fig. 7. Transfer characteristic of the feedback network

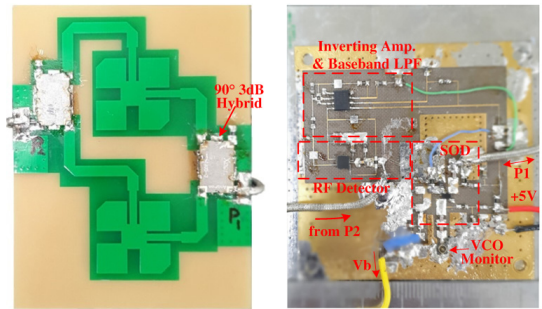
3. 실험 및 결과분석

Fig. 8에서 제작된 시제품 사진을 볼 수 있다. Fig. 8(a)에 ISM 대역에서 소형화 된 마이크로스트립 평형 방사패치들과 90° 3dB 하이브리드(Anaren사의 1305-3) 들을 연결하였고 2개의 포트(P1,P2)에서 입출력되는 회로가 FR4 인쇄기판(높이 1.6mm) 위에 구현되었다. Fig. 8(b)에는 Fig. 1에 있는 SOD, 귀환회로, RF 검파기들이 높이 0.76mm를 갖는 테프론(Teflon) 보드에 분포

되었다. 공급된 직류전압은 +5V으로 12mA의 전류가 소모된다. VCO 모니터(monitor) 단자에서 SOD의 VCO 특성을 확인한다. 이들 보드 각각의 접지면은 공유되고 마주하여 부착된 상태에서 심박센서로 동작한다. 동축케이블을 이용하여 각 보드에 있는 2개의 포트(P1,P2)들이 연결된다.

Fig. 9는 인체에 근접한 심박신호 센서의 측정시스템을 보여 준다. 시제품의 최종 전압신호(Vb)는 오실로스코프를 통해 시간 축에서 관찰되며, 동시에 AC 커플링 모드를 사용하여 NI9234 (National Instrument)에 의해 수집된다. 제작된 시제품에서 측정된 심박신호의 성능을 검증하기 위해 기준신호로서 손가락 맥박센서(UFI-1010)를 이용한다.

액츄에이터(actuator)를 이용하여 센서를 인체의 가슴 앞에 직선거리(d) 2~30mm 사이에서, 좌우(x1,y1) ±20mm 내에서 분당 30회(0.5Hz) 비율로 천천히 센서를 이동시키면서 심박신호를 10초 동안 관찰한다.



(a) Board for balanced patches (b) RF circuit board

Fig. 8. Photograph of the fabricated prototype

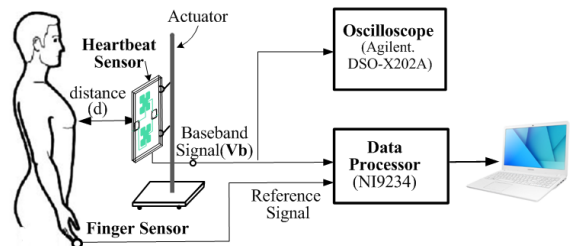


Fig. 9. Test setup for heartbeat signal detection

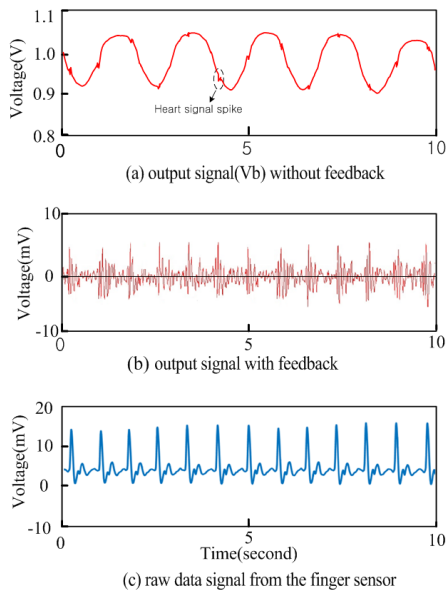


Fig. 10. Measured results of heartbeat signal for the fabricated prototype

Fig. 10은 Fig. 3의 2개 포트(P_1, P_2) 사이의 격리도 데이터를 고려하여 여러 차례 실험한 대표적인 결과이다. Fig. 10(a)는 귀환회로가 연결되지 않는 상태에서 센서의 출력신호(V_b)를 오실로스코프를 이용하여 잡음이 제거되고 평균화된 측정 결과이다. 오셋 전압 1.0V를 중심으로 심박을 나타내는 주기적인 작은 스파이크가 신체의 움직임을 나타내는 큰 전압 변화 위에 실려 있는 모습이 관찰된다. Fig. 10(b)는 귀환회로가 연결되고, 센서위치($d=10, x_1=0, y_1=0$ mm)를 중심으로 신체의 움직임이 보상된 상태에서 측정된 교류결합 출력신호(V_b) 파형이다. 잡음과 함께하는 주기적인 심박신호가 측정되었다. 이는 기준신호로 사용된 Fig. 10(c)의 손가락 맥박센서(UFI-1010) 신호들과 비교된다. 두 신호 모두 10초 동안 관찰되었으며 심박신호를 의미하는 같은 수의 스파이크 신호를 나타낸다. 따라서 측정된 심박신호는 기준신호의 측정 결과와 일치하는 것으로 평가된다. 한편, 제작된 시제품은 전력소모가 적고 회로구조가 간단하여 집적화 가능하여 저가로 상용화가 가능하나 평형 마이크로스트립 패치들을 더욱 소형화를 위한 연구가 필요하다. 한편, 제작된 시제품은 전력소모가 적고 회로구조가 간단한 장점으로 집적화를 통해 저가로 상용화가 가능하나, 전체적인 센서의 크기를 평형 마이크로스트립 패치들에 의존하므로 소형화 연구가 필요하다.

4. 결론

상호 직교하는 2개의 급전 포트를 갖는 평형 마이크로스트립 패치들과 연결된 SOD, 그리고 귀환회로를 이용하여 저속으로 변하는 인체의 움직임 속에서 심박신호를 검출해 낼 수 있는 근접 심박센서를 제안하였다. 2.4GHz ISM 대역에서 동작하는 SOD는 자체발진 검출회로 특성을 나타내는 소형 회로구조이다. $65 \times 85 \text{mm}^2$ 크기를 갖는 2개의 보드가 접지면을 공유하는 구조로 시제품이 제작되었으며, 작은 전력(직류 5V, 12mA)으로 배터리 소모를 줄일 수 있다. 귀환회로와 평형 방사패치 구조는 심박 센서가 인체와 매우 근접된 거리(직선 또는 사선 거리가 최소 2mm, 최대 40mm)에서 인체의 저속(0.5Hz) 움직임 속에서 안정하게 심박신호를 검출할 수 있었다.

제안된 심박 센서는 가슴 부위에 위치하는 자동차의 안전벨트, 침대의 담요(blanket) 또는 의류에 부착되어 인체 또는 센서의 작은 움직임 속에서도 심박신호를 측정할 수 있는 웨어러블 디바이스에 적용 가능할 것으로 판단된다. 한편, 안정적인 심박신호 검출을 위해 PLL(phase locked loop) 기반 회로와 소형 평형 마이크로스트립 패치에 관한 연구들이 향후 연구주제이다.

REFERENCES

- [1] S. G. Kim, G. H. Yun & J. G. Yook. (2012). Compact vital signal sensor using oscillation frequency deviation. *IEEE Trans. MTT*, 60(2), 393-400. DOI: 10.1109/TMTT.2011.2175403
- [2] Y. Hong et al. (2014). Noncontact proximity vital sign sensor based on PLL for sensitivity enhancement. *IEEE Trans. on Biomedical Circuits and Systems*, 8(4), 584-593. DOI: 10.1109/TBCAS.2013.2280913
- [3] B. H. Kim et al. (2016). A Proximity Coupling RF Sensor for Wrist Pulse Detection Based on Injection-Locked PLL. *IEEE Trans. on MTT*, 64(5), 1667-1675. DOI: 10.1109/TMTT.2016.2549531
- [4] C. Li & J. Lin. (2008). Random Body Movement Cancellation in Doppler Radar Vital Sign. *IEEE Transaction On MTT*, 5(12), 3143-3152. DOI: 10.1109/TMTT.2008.2007139
- [5] C. Gu, G. Wang, T. Inoue & C. Li. (2013). Doppler radar vital sign detection with random body movement cancellation based on adaptive phase compensation. *IEEE MTT-S, Seattle, WA, USA*, 2-7. DOI: 10.1109/MWSYM.2013.6697618

- [6] G. H. Yun. (2013). Tx/Rx Isolation enhancement of the Planar Patch Antenna at 5.8GHz ISM band. *Journal of the Korean Electrical and Electronics Engineers*, 17(3), 385-392.
- [7] J. S. Kim & H. Y. Hwang. (2011). 2.45 GHz high gain self-oscillating mixer for simple short-range Doppler radar. *Microwave Journal*, 54(8), 38-43.
- [8] J. S. Kim & H. Y. Hwang. (2013). Design of X-Band SOM for Doppler Radar. *Journal of the KIEES*, 24(12), 1167-1172.
DOI : 10.5515/KJKIEES.2013.24.12.1167
- [9] K. Kurokawa. (1965). Design Theory of Balanced Transistor Amplifiers. *Bell System Technical Journal*, 44(8), 1675-1698.
DOI: 10.1002/j.1538-7305.1965.tb04198.x
- [10] S. Gabriel, R. W. Lau & C. Gabriel. (1996). The dielectric properties of biological tissues. *Physics in Medicine and Biology*, 41(11), 2251-2269.
- [11] T. Yilmaz, R. Foster & Y. Hao. (2014). Broadband tissue mimicking phantoms and a patch resonator for evaluating noninvasive monitoring of blood glucose levels. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 62, 3064-3075.
DOI: 10.1109/TAP.2014.2313139
- [12] G. Ramachandran & M. Singh. (1989). Three-dimensional reconstruction of cardiac displacement patterns on the chest wall during the P, QRS, and T-segments of the ECG by laser speckle interferometer. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 27(5), 525-530.
<https://doi.org/10.1007/BF02441473>
- [13] A. S. Berson & H. V. Pipberger. (1966). Measurement of chest wall vibrations due to the activity of the heart. *Journal of Applied Physiology*, 21(2), 370-374.
- [14] S. G. Kim, G. H. Yun & J. G. Yook. (2012). Wireless RF Sensor Structure for Non-Contact Vital Sign Monitoring. *Journal of the KIEES*, 12(1), 37-43.
DOI: 10.5515/JKIEES.2012.12.1.37
- [15] F. M. Zahed, F. Taghibakhsh & B. Kaminska. (2007). Contactless Heart Monitoring", *2007 IEEE, Session 33: Biomedical Signal Processing-I*, 583-585.
DOI: 10.1109/CCECE.2007.150

윤 기 호(Gi-Ho Yun)

[정회원]



- 1984년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
- 1999년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1985년 1월 ~ 1997년 2월 : 삼성종합기술원, 삼성전기 근무
- 1997년 3월 ~ 2009년 2월 : 호남대학교 전자공학과 부교수
- 2009년 3월 ~ 현재 : 성결대학교 정보통신공학과 교수
- 관심분야 : 바이오센서, RF회로, 안테나
- E-Mail : ghyun@sungkyul.ac.kr