

효율적인 신호분리기법을 이용한 근접한 두 사람들의 비접촉식 생체신호 탐지

Non-Contact Vital Sign Detection of Two Humans at the Same Distance Using Efficient Signal Decomposition

최인오 · 김민 · 최재호 · 박정기 · 김경태

In-Oh Choi · Min Kim · Jae-Ho Choi · Jeong-Ki Park · Kyung-Tae Kim

요 약

최근 레이더 센서 기반의 비접촉식 생체신호(호흡수 및 심장박동수)탐지 기법들에 대한 연구가 의학, 사물인터넷, 국방 분야 등에서 다양하게 개발되어오고 있다. 하지만, 매우 근접한 두 사람들이 존재할 경우, 기존 기법들로는 생체신호를 탐지하기가 매우 어렵다. 이는 두 사람들에 의한 반사 신호들이 하나의 레이더 수신신호로 혼합되어 나타나기 때문이다. 이를 해결하기 위하여 VMD(Variational Mode Decomposition)와 MUSIC(Multiple Signal Classification)과 같은 신호분리기법들이 개발되어 왔지만, 같은 거리에 위치한 두 사람들의 생체신호탐지를 수행하기에는 모두 적합하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 매우 근접한 두 사람들에 대한 생체신호탐지를 위하여 새로운 신호분리기법을 제안한다. 특히, 제안된 기법은 레이더 수신신호의 I 및 Q 채널 성분들을 두 사람들의 개별 위상 변화들로 자명하게 분리시키기 때문에, 기존 기법들보다 계산적인 측면에서 매우 효율적이다. IR-UWB(Impulse-Radio Ultra-Wideband) 레이더를 활용한 실험 결과, 제안된 알고리즘을 통하여 근접한 두 사람들의 생체신호탐지를 성공적으로 수행할 수 있었다.

Abstract

Recently, non-contact vital sign(i.e. respiratory and cardiac rate) detection(VSD) techniques based on radar sensors have been developed for several applications in the medical, Internet of Things(IoT), and military fields. However, if two humans are located at the same distance, the VSD of these methods may fail. This is because the two humans yield mixed and complicated echo signals, thereby making the VSD task quite difficult. To overcome this problem, several signal decomposition methods, such as variational mode decomposition and multiple signal classification, have been developed. Nevertheless, mixed echo signals from two humans at the same distance cannot be decomposed. In this study, we propose a new signal decomposition method to achieve the VSD of humans at the same distance. In particular, the proposed method can simply decompose I- and Q-channel parts of a mixed echo signal into the individual phase fluctuations corresponding to each human, thereby providing improved computational efficiency. In experiments using the impulse-radio ultra-wideband radar, it was observed that the proposed algorithm can successfully achieve the VSD of two humans at the same distance.

Key words: Respiratory Rate, Cardiac Rate, Micro-Doppler Effect, Mixed Echo Signal, Individual Phase Fluctuation

포항공과대학교 전자전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· Manuscript received October 31, 2019 ; Revised December 12, 2019 ; Accepted December 14, 2019. (ID No. 20191031-119)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

I. 서 론

최근 비접촉식 생체신호탐지(vital sign detection: VSD)가 의학 및 사물인터넷(internet of things: IoT) 분야에서 크게 주목을 받으면서, 이와 관련된 레이다 기술 개발의 중요성이 점점 증대되고 있다^{[1]~[3]}. 이때, 생체신호는 폐에 의한 호흡수(respiratory rate)와 심장에 의한 심장박동수(cardiac rate)로 정의되며, 이 장기들은 흉부 또는 등 부위 피부에 미세한 움직임을 야기한다. 그리고 이 움직임을 가지는 사람으로부터 수신된 레이다 반사 신호에는 미세한 위상변화가 발생되며, 이를 미세도플러 효과(micro-Doppler effect)라고 정의한다. 이때, 기존 생체신호탐지는 미세한 위상변화에 대한 스펙트럼 분석을 통해 수행될 수 있다^{[4],[5]}. 하지만, 그림 1과 같이 두 사람들이 레이다로부터 동일한 위치에 떨어져 있을 경우, 기존기법으로는 생체신호를 탐지하기가 매우 어렵다. 이는 두 사람들에 의한 반사 신호들이 동일한 거리(radial-range)에서 하나의 레이다 수신신호로 혼합되어 나타나기 때문이다.

앞서 언급된 문제점을 해결하기 위하여, 신호분리기법 기반의 생체신호탐지 알고리즘들이 개발되어 왔다^{[6],[7]}. 먼저, 두 사람들에 의해 혼합된 레이다 수신신호를 개별 사람 신호들로 분리시키기 위한 variational mode decomposition(VMD) 알고리즘이 제안되었다^[6]. 하지만, 두 사람들의 생체신호 주기가 유사할 경우, 분리성능이 매우 저하되는 문제점이 있었다. 이는 VMD 알고리즘이 서로 다른 주파수 대역의 신호들만 분리할 수 있기 때문이다. 반면에 최근 multiple signal classification(MUSIC) 알고리즘을 활

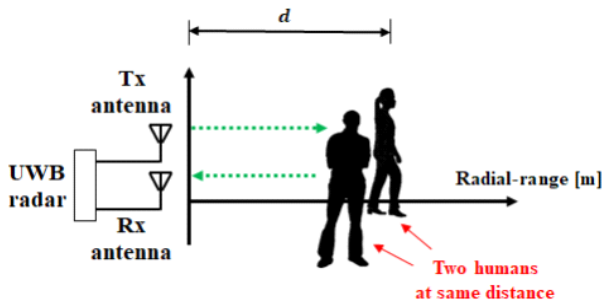


그림 1. 근접한 두 사람들의 비접촉식 생체신호탐지
Fig. 1. Geometry of non-contact VSD for two humans at same distance.

용한 두 사람들의 생체신호탐지 연구가 수행되었다^[7]. 이는 보다 향상된 거리 해상도를 MUSIC 알고리즘으로 획득하여, 거리 축에서 두 사람을 분리하는 것이다. 하지만, 매우 근접한 두 사람들로 인해 더 이상 두 사람들을 거리 축에서 분해할 수 없을 경우, 신호분리 및 생체신호탐지가 불가능해진다는 문제점이 존재하였다.

본 논문에서는 매우 근접한 두 사람들의 보다 효율적인 생체신호탐지를 위하여 새로운 신호분리기법을 제안한다. 이를 위하여, 먼저 두 사람들에 의해 혼합된 레이다 수신신호 내 I-채널과 Q-채널 성분들을 입력 값으로 가지고, 두 사람들의 개별 위상성분들을 출력 값으로 가지는 결정(determined) 시스템을 근사적으로 유도한다. 이후, 이 시스템을 구성하는 연립방정식의 자명한 해를 수학적으로 정의한다. 여기서 주목해야할 점은 제안된 연립방정식의 해를 사용할 경우, 기존 기법들^{[6],[7]}보다 효율적인 신호분리가 가능해진다는 것이다. 특히, 기존 기법들^{[6],[7]}의 한계점이었던 두 사람들 간의 생체신호 주기 유사성 혹은 거리 분해 성능에 상관없이, 생체신호탐지를 수행할 수 있다. 제안된 기법의 성능을 검증하기 위하여, IR-UWB(impulse-radio ultra-wideband) 레이다를 사용한 실험 결과, 제안된 기법을 통해 매우 근접한 두 사람들의 생체신호탐지를 성공적으로 수행할 수 있었다.

II. 이론 및 문제점 분석

2-1 레이다 수신신호 모델링

단일사람에 대한 생체신호탐지를 위한 구조는 그림 2와 같으며, 수식의 간편성을 위하여 표적은 점산란원 구조, 그리고 레이다 위치벡터 및 레이다 시선 방향(radar line-

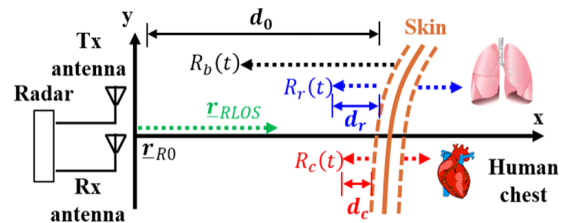


그림 2. 단일사람의 생체신호탐지를 위한 구조
Fig. 2. Geometry for VSD for a human.

of-sight: RLOS) 벡터는 $\mathbf{r}_{R0} = [0, 0, 0]^T$ 및 $\mathbf{r}_{RLOS} = [1, 0, 0]^T$ 으로 가정된다. 이때 폐에 의해 나타나는 피부의 미세한 움직임이 $\mathbf{r}_r(t) = [d_r \cos(2\pi f_r(t)t + \phi_{r0}), 0, 0]^T$ 일 경우, RLOS에 투영된 거리변화 $R_r(t)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$R_r(t) = D\{\mathbf{r}_{R0}, \mathbf{r}_r(t)\} = d_r \cos(2\pi f_r(t)t + \phi_{r0}), \quad (1)$$

여기서 $D\{\}$ 는 유클리디안 거리(Euclidean distance) 식, d_r 는 거리변화폭, ϕ_{r0} 은 초기위상이며,

$$f_r(t) = f_{r0} + \Delta f_r \cos(2\pi f_{r0}t), \quad (2)$$

는 실시간 변화하는 호홉수이며, f_{r0} 는 기본주파수(fundamental frequency), 그리고 $\Delta f_r \cos(2\pi f_{r0}t)$ 는 미세한 호홉수의 변화이다. 이때 이 변화는 푸리에 변환(Fourier transform) 과정에서 비선형적인 입, 출력 관계를 만들며, 식 (1)의 주파수 스펙트럼에 호홉수의 고조파를 생성한다^[8].

다음으로 심장에 의한 피부의 미세한 거리변화 $R_c(t)$ 와 실시간 심장박동수 $f_c(t)$ 는 앞선 식들과 동일한 방식으로 다음과 같이 정의된다.

$$R_c(t) = d_c \cos(2\pi f_c(t)t + \phi_{c0}), \quad (3)$$

$$f_c(t) = f_{c0} + \Delta f_c \cos(2\pi f_{c0}t), \quad (4)$$

여기서 d_c 는 거리변화폭, ϕ_{c0} 은 초기위상, f_{c0} 는 기본주파수, 그리고 $\Delta f_c \cos(2\pi f_{c0}t)$ 는 미세한 심장박동수의 변화이다.

다음으로 원하지 않는 사람의 동작을 간단하게 모델링하기 위하여 이를 x 축의 비선형함수 $d_x(t)$ 로 가정하며, 이때 원하지 않는 동작에 의한 거리변화 $R_b(t)$ 는 다음과 같이 정의된다^[8].

$$R_b(t) = d_0 - d_x(t), \quad (5)$$

여기서 d_0 는 레이더와 사람 간의 초기거리 간격이다.

최종적으로 점산란원 구조의 표적에 연속파(continuous wave: CW) 신호가 송신된다고 가정할 경우, 식 (1), 식 (3), 그리고 식 (5)를 사용하여 단일사람에 대한 레이더 수신신호 $s(t)$ 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} s(t) &= I(t) + jQ(t) \\ &= \sigma(t) \exp[j\theta(t)] \\ &= \sigma(t) \exp\left\{j\frac{4\pi}{\lambda_0} \{R_r(t) + R_c(t) + R_b(t)\}\right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 λ_0 는 파장, $\sigma(t)$ 는 사람의 RCS(radar cross section) 변화, $\theta(t)$ 는 위상 변화, $I(t)$ 및 $Q(t)$ 는 I 채널 및 Q 채널 성분들이다.

2-2 문제점 분석

앞서 모델링된 단일사람의 레이더 수신신호로부터 생체신호를 탐지하기 위해서는 일반적으로 식 (6)에 arctangent demodulation^[2]을 적용하여, 다음과 같이 위상 변화 $\theta(t)$ 을 추출해야 한다.

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \tan^{-1}\{Q(t)/I(t)\} \\ &= \{4\pi/\lambda_0\} \{R_r(t) + R_c(t) + R_b(t)\} \\ &= \theta_r(t) + \theta_c(t) + \theta_b(t), \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\theta_r(t)$, $\theta_c(t)$ 및 $\theta_b(t)$ 는 각각 호홉, 심장박동 및 원하지 않는 동작에 의한 위상 변화이다. 이때 생체신호 탐지는 식 (7)의 스펙트럼 분석을 통해 호홉의 기본주파수 f_{r0} 와 심장박동의 기본주파수 f_{c0} 을 추정하는 것이다.

앞서 언급된 단일사람의 경우와 달리, 두 사람들이 그림 1과 같이 매우 근접하게 존재할 경우, 각 사람들에 대한 레이더 수신신호들은 하나의 레이더 수신신호로 혼합되어 다음과 같이 나타나게 된다.

$$\begin{aligned} s_{mixed}(t) &= s_1(t) + s_2(t) \\ &= I_{mixed}(t) + jQ_{mixed}(t) \\ &= [I_1(t) + I_2(t)] + j[Q_1(t) + Q_2(t)] \\ &= \sigma_1(t) \exp[j\theta_1(t)] + \sigma_2(t) \exp[j\theta_2(t)], \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $I_{mixed}(t)$, $Q_{mixed}(t)$ 는 혼합된 레이더 수신신호의 I 채널 및 Q 채널 성분이며, $s_k(t)$, $\sigma_k(t)$, $\theta_k(t)$, $I_k(t)$, $Q_k(t)$ 는 각각 $k(k = 1, 2)$ 번째 사람의 레이더 수신신호, RCS 변화, 위상 변화, I 채널 및 Q 채널 성분이다. 이때, 혼합된 레이더 수신신호로부터 두 사람들의 생체신호탐지를 수행하기 위해서는 각각의 위상 변화 $\theta_1(t)$ 및 $\theta_2(t)$ 을 식 (7)과 같은 방법으로 추출해야 한다. 하지만, 두 사람들에 의해 혼합된 식 (8)의 레이더 수신신호에 arctangent demodulation^[2]를 적용할 경우, tangent 함수의 비선형성으로 인해 다음과 같이 각각의 위상 변화를 추출하는 것은 불가능하다.

$$\begin{aligned}
 \theta_{mixed}(t) &= \tan^{-1} \left\{ \frac{Q_{mixed}(t)}{I_{mixed}(t)} \right\} \\
 &= \tan^{-1} \left\{ \frac{Q_1(t) + Q_2(t)}{I_1(t) + I_2(t)} \right\} \\
 &\neq \tan^{-1} \left\{ \frac{Q_1(t)}{I_1(t)} \right\} + \tan^{-1} \left\{ \frac{Q_2(t)}{I_2(t)} \right\} \\
 &\neq \theta_1(t) + \theta_2(t). \quad (9)
 \end{aligned}$$

게다가 각각의 위상 변화들이 추출되었다고 가정해도, 생체신호탐지를 위해서는 이를 분리해야 하는 문제점이 존재한다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 혼합된 레이더 수신신호를 입력 값으로 가지고, 각각의 분리된 위상 변화 $\theta_1(t)$ 및 $\theta_2(t)$ 을 출력 값으로 가지는 새로운 신호분리 알고리즘이 반드시 필요하다.

III. 제안된 기법

본 절에서는 매우 근접한 두 사람들에 의해 혼합된 레이더 수신신호 $s_{mixed}(t)$ 로부터 각각의 분리된 위상 변화 $\theta_1(t)$ 및 $\theta_2(t)$ 를 추출하는 알고리즘을 제안한다.

먼저 매우 근접한 두 사람들로 혼합된 레이더 수신신호 $s_{mixed}(t)$ 가 I 채널 성분 $I_{mixed}(t)$ 와 Q 채널 성분 $Q_{mixed}(t)$ 로 구성된다고 가정할 경우, 제안된 신호분리 알고리즘은 $I_{mixed}(t)$ 와 $Q_{mixed}(t)$ 를 입력 값으로 가지고, 각각 분리된 위상 변화 $\theta_1(t)$ 및 $\theta_2(t)$ 를 출력 값으로 가지는 결정(determined) 시스템으로 정의할 수 있다(그림 3 참조). 이때 결정 시스템의 입력 값과 출력 값 간의 관계를 간단한 연립방정식으로 정의하기 위하여, 다음과 같이 두

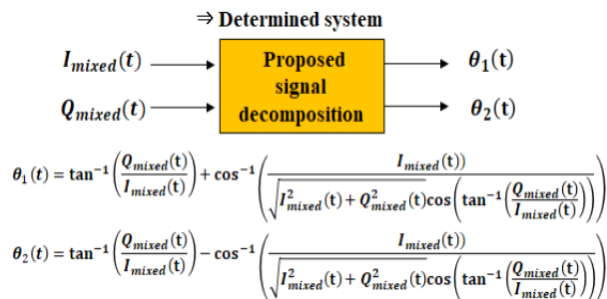


그림 3. 제안된 신호분리 알고리즘의 구조

Fig. 3. Framework of proposed signal decomposition.

사람들 간의 RCS 변화가 근사적으로 유사하다고 가정한다.

$$\sigma_1(t) \approx \sigma_2(t). \quad (10)$$

이는 레이더로부터 두 사람들이 동일한 위치 및 방향을 가지고 있어서, free-space path-loss(FSPL)와 관측각도(aspect-angle)가 유사하다는 근거 때문이다. 이러한 가정과 삼각함수(trigonometric function)를 바탕으로 혼합된 레이더 수신신호의 I 채널 성분 $I_{mixed}(t)$ 는 다음과 같이 재정의 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_{mixed}(t) &= I_1(t) + I_2(t) \\
 &= \sigma_1(t) \cos(\theta_1(t)) + \sigma_2(t) \cos(\theta_2(t)) \\
 &\approx \sigma_1(t) \{ \cos(\theta_1(t)) + \cos(\theta_2(t)) \} \\
 &\approx 2\sigma_1(t) \cos \left(\frac{\theta_1(t) + \theta_2(t)}{2} \right) \\
 &\quad \times \cos \left(\frac{\theta_1(t) - \theta_2(t)}{2} \right). \quad (11)
 \end{aligned}$$

이와 유사하게 혼합된 레이더 수신신호의 Q 채널 성분 $Q_{mixed}(t)$ 은 다음과 같이 재정의 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Q_{mixed}(t) &= Q_1(t) + Q_2(t) \\
 &= \sigma_1(t) \sin(\theta_1(t)) + \sigma_2(t) \sin(\theta_2(t)) \\
 &\approx \sigma_1(t) \{ \sin(\theta_1(t)) + \sin(\theta_2(t)) \} \\
 &\approx 2\sigma_1(t) \sin \left(\frac{\theta_1(t) + \theta_2(t)}{2} \right) \\
 &\quad \times \cos \left(\frac{\theta_1(t) - \theta_2(t)}{2} \right). \quad (12)
 \end{aligned}$$

여기서 주목해야 할 점은 식 (11)과 식 (12)를 통해, 입력 값 $I_{mixed}(t)$ 및 $Q_{mixed}(t)$ 와 출력 값 $\theta_1(t)$ 및 $\theta_2(t)$ 의 관계를 간단한 연립방정식으로 정의할 수 있다는 것이다.

다음으로 앞서 언급된 연립방정식에서 자명한 해를 구하기 위하여, 식 (11)과 식 (12)를 사용하여 arctangent demodulation^[2]을 다음과 같이 적용한다.

$$\begin{aligned}
 \theta_{mixed}(t) &= \tan^{-1} \left\{ \frac{Q_{mixed}(t)}{I_{mixed}(t)} \right\} \\
 &\approx \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin \left(\frac{\theta_1(t) + \theta_2(t)}{2} \right)}{\cos \left(\frac{\theta_1(t) + \theta_2(t)}{2} \right)} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\approx \tan^{-1} \left\{ \tan \left(\frac{\theta_1(t) + \theta_2(t)}{2} \right) \right\} \\ &\approx \frac{\theta_1(t) + \theta_2(t)}{2}. \end{aligned} \quad (13)$$

이때, 식 (13)은 식 (9)와 달리 tangent 함수의 비선형성에도 불구하고, 위상 변화가 추출될 수 있음을 보여준다. 따라서 식 (13)은 자명한 해를 구하기 위한 첫 번째 수식으로 식 (14)와 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{\theta_1(t) + \theta_2(t)}{2} \approx \theta_{mixed}(t). \quad (14)$$

여기서 $\theta_{mixed}(t)$ 는 혼합된 레이더 수신신호 $s_{mixed}(t)$ 의 위상 성분으로 입력 값 $I_{mixed}(t)$ 와 $Q_{mixed}(t)$ 로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_{mixed}(t) &= \angle s_{mixed}(t) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{Q_{mixed}(t)}{I_{mixed}(t)} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

다음으로 자명한 해를 구하기 위한 두 번째 수식을 위하여, 식 (13)의 결과를 식 (11)에 대입하여 다음과 같이 재정의한다.

$$\begin{aligned} I_{mixed}(t) &\approx 2\sigma_1(t) \cos \left(\frac{\theta_1(t) + \theta_2(t)}{2} \right) \\ &\quad \times \cos \left(\frac{\theta_1(t) - \theta_2(t)}{2} \right) \\ &\approx 2\sigma_1(t) \cos(\theta_{mixed}(t)) \cos \left(\frac{\theta_1(t) - \theta_2(t)}{2} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

이때 식 (16)은 자명한 해를 구하기 위한 두 번째 수식으로 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{\theta_1(t) - \theta_2(t)}{2} \approx \cos^{-1} \left(\frac{I_{mixed}(t)}{2\sigma_1(t) \cos(\theta_{mixed}(t))} \right), \quad (17)$$

여기서 $2\sigma_1(t)$ 는 혼합된 레이더 수신신호 $s_{mixed}(t)$ 의 크기 성분으로 입력 값 $I_{mixed}(t)$ 와 $Q_{mixed}(t)$ 로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} |s_{mixed}(t)| &= \sqrt{I_{mixed}^2(t) + Q_{mixed}^2(t)} \\ &= |s_1(t)| + |s_2(t)| \\ &= \sigma_1(t) + \sigma_2(t) \\ &\approx 2\sigma_1(t). \end{aligned} \quad (18)$$

최종적으로 식 (14)와 식 (17)을 출력 값 $\theta_1(t)$ 및 $\theta_2(t)$ 에 대한 식으로 정리할 경우, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_1(t) &\approx \tan^{-1} \left(\frac{Q_{mixed}(t)}{I_{mixed}(t)} \right) \\ &\quad + \cos^{-1} \left(\frac{I_{mixed}(t)}{|s_{mixed}(t)| \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{Q_{mixed}(t)}{I_{mixed}(t)} \right) \right)} \right), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \theta_2(t) &\approx \tan^{-1} \left(\frac{Q_{mixed}(t)}{I_{mixed}(t)} \right) \\ &\quad - \cos^{-1} \left(\frac{I_{mixed}(t)}{|s_{mixed}(t)| \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{Q_{mixed}(t)}{I_{mixed}(t)} \right) \right)} \right), \end{aligned} \quad (20)$$

IV. 실험

본 절에서는 그림 4의 IR-UWB 레이더를 사용하여 측정된 데이터를 통해 제안된 신호분리 알고리즘의 성능을 검증한다. 이때, 실험 변수는 표 1과 같으며, 측정 실험은 두 가지 시나리오에서 수행된다. 첫 번째 실험은 각각의 단일 사람에 대한 레이더 수신신호를 측정하여, 이들의

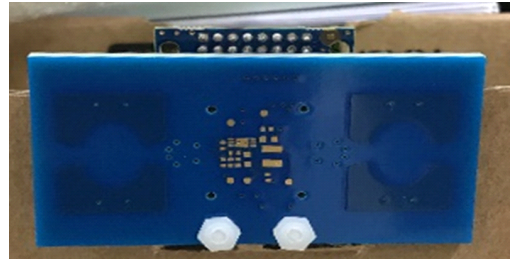


그림 4. IR-UWB 레이더

Fig. 4. IR-UWB radar.

표 1. 실험 변수들

Table 1. Experiment parameters.

Carrier frequency f_0	7.29 GHz
Wave length λ_0	0.0412 m
Observation time	63 s
Sampling frequency	24 Hz
Distance between radar and target d_0	0.2 m

RCS 변화가 얼마나 유사한지 비교한다. 이는 제안된 기법에서 두 사람들의 RCS 변화가 유사하다는 가정이 얼마나 타당한지 검증하기 위해서이다. 다음으로 두 번째 실험에서는 매우 근접한 두 사람들의 레이더 수신신호를 측정하여, 제안된 알고리즘의 신호분리 성능을 검증한다. 이때, VMD 기반의 기존기법^[6]은 생체신호가 유사한 주파수 대역에 있을 경우, 적합하지 않다. 마찬가지로 거리 축에서 분리를 수행하는 MUSIC 기반의 기존기법^[7]으로는 매우 근접하게 있는 두 사람들의 시나리오(i.e. 거리 축에서 분리가 불가능)에 적합하지 않다. 따라서 기존기법들^{[6][7]}이 불가능한 시나리오에서 제안된 기법의 우수성을 검증한다.

4.1 RCS 변화 유사도 검증

본 측정 실험은 키와 체중이 유사한 두 사람들이 각각 IR-UWB 레이더로부터 0.2 m 만큼 떨어진 상태에서 수행

되었다. 이때, 두 사람들은 생체신호에 의한 미세 움직임 외에 추가적인 불필요한 동작들을 최대한 가지지 않았다.

먼저, 각각의 사람들에 대한 RCS 변화는 그림 5(b)와 그림 5(e)를 통해 확인할 수 있다. 이때, 각각의 RCS 변화에 대하여 두 가지 대표적인 통계 값(i.e. 평균(mean), 표준편차(std.))을 비교할 경우, 상당히 유사함을 알 수 있다. 이는 레이더로부터 두 사람들이 동일한 위치 및 방향을 가지고 있고, 이로 인해 free-space path-loss와 관측각도가 유사하기 때문이다. 하지만, 두 사람들은 서로 다른 생체신호 특성을 가지기 때문에, RCS 변화의 주기적인 특성은 다르게 나타났다(그림 5(b) 및 (e) 참조).

다음으로 각각의 사람들에 대한 위상 변화는 그림 5(c)와 그림 5(f)를 통해 확인할 수 있다. 여기서 주목해야 할 점은 RCS 변화와 달리 각 사람들의 위상 변화는 두 가지 통계 값(i.e. 평균, 표준편차) 측면에서 매우 극심하게 차이를 확인할 수 있다. 이는 각 사람들 간의 서로 다른 생체신호 특성에 의해 나타나는 결과이다.

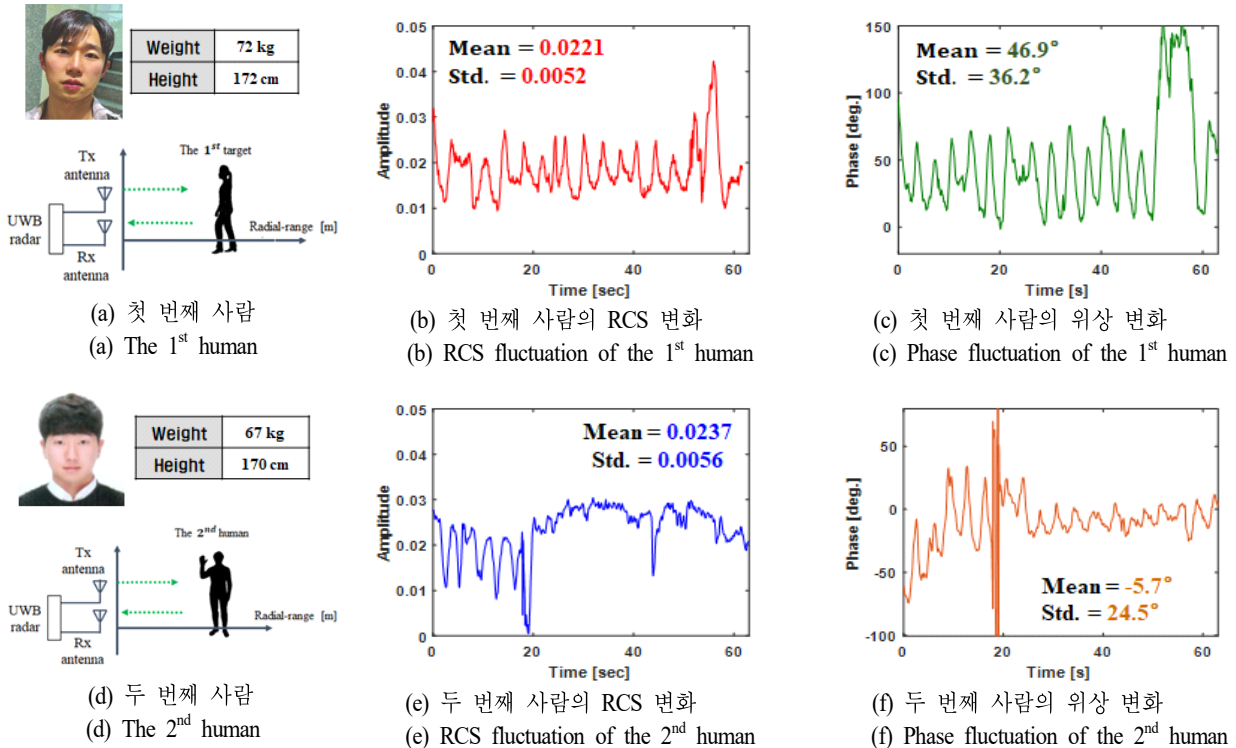


그림 5. RCS 변화 유사도 검증 실험 결과

Fig. 5. Experimental results to verify the similarity of RCS fluctuation between two targets.

결과적으로 첫 번째 실험을 통해, 동일한 위치에 있는 두 사람들의 RCS 변화는 위상 변화와 달리 두 가지 통계 값 측면에서 충분히 유사함을 확인할 수 있었다.

4-2 신호분리 성능 검증

본 측정 실험은 그림 5(a) 및 그림 5(d)의 두 사람들이 매우 근접한 상태에서 IR-UWB 레이더로부터 0.2 m 만큼 떨어져 있을 때 수행되었다. 첫 번째 실험과 마찬가지로 두 사람들은 최대한 불필요한 움직임은 가지지 않았다.

먼저, 분리 전 두 사람들에 의해 혼합된 레이더 수신신호에 위상 변화를 추출할 경우, 그림 6(a)와 같이 나타남을 확인할 수 있었다. 그리고 그림 6(a)에 대한 스펙트럼 분석을 수행할 경우, 두 사람들의 호흡수가 매우 근접한

주파수 대역에서 함께 나타남을 확인할 수 있었다(그림 6(d) 참조). 반면에 심장박동수의 경우, 각 사람들에 대한 반사 신호 간의 간섭으로 인해 정확한 탐지가 불가능하였다(그림 6(d) 참조).

다음으로 제안된 알고리즘을 적용할 경우, 두 사람들에 대한 위상 변화가 그림 6(b) 및 그림 6(c)와 같이 나타남을 확인할 수 있었다. 그리고 그림 6(b) 및 그림 6(c)에 대한 스펙트럼 분석을 수행할 경우, 그림 6(e) 및 그림 6(f)와 같이 나타남을 확인할 수 있었다. 여기서 주목해야 할 점은 제안된 알고리즘을 통해, 각 사람들에 해당하는 호흡수(i.e. 15.84 beats/min 및 17.28 beats/min)의 에너지가 가장 크게 나타난다는 점이다. 게다가, 심장박동수(i.e. 73.44 beats/min 및 72 beats/min)의 경우, 분리 전(그림 6(d) 참조)과 비교하여 보다 명확하게 나타남을 확인할 수 있었다. 하지

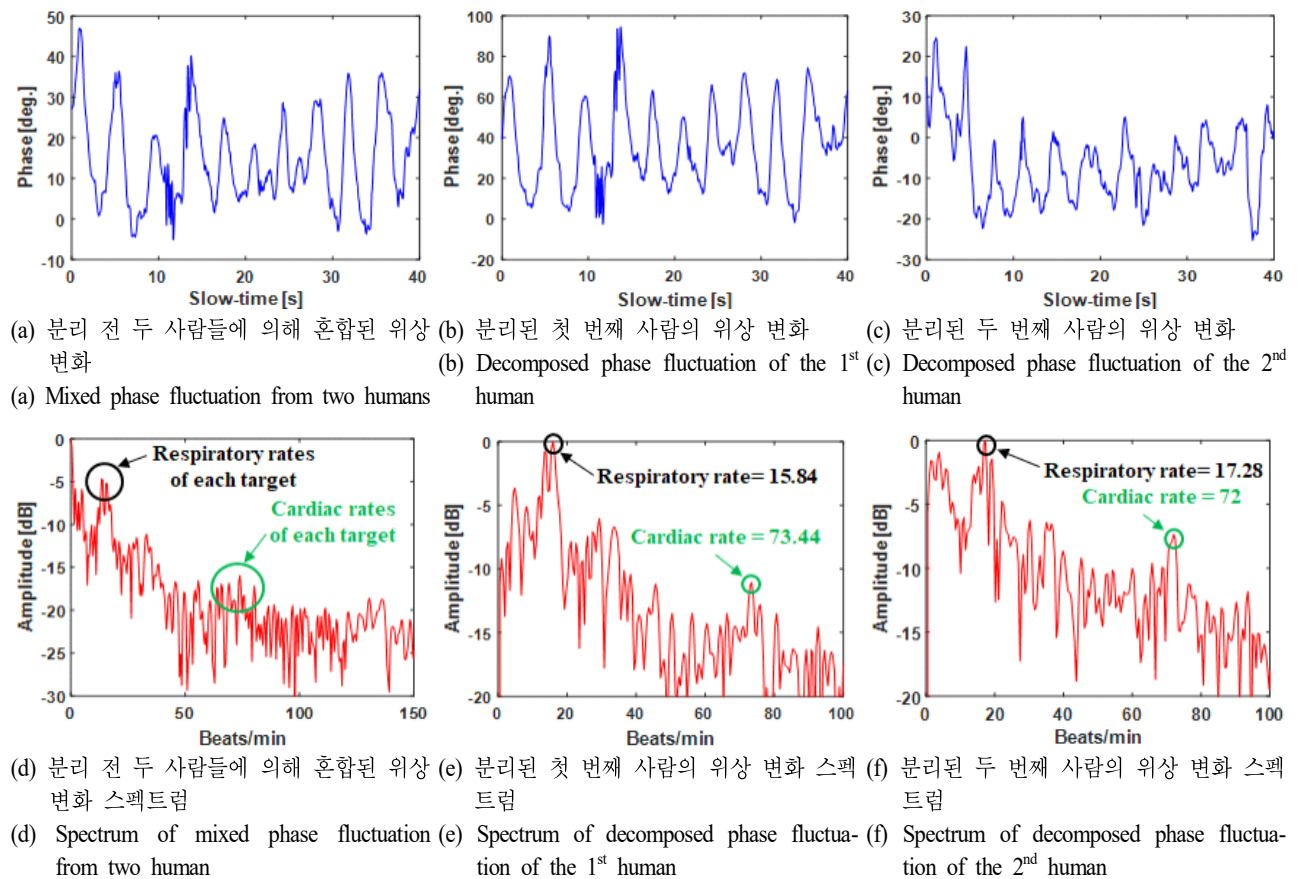


그림 6. 신호 분리 성능 검증 실험 결과

Fig. 6. Experimental results to verify the performance of the proposed signal decomposition algorithm.

만, 각 사람들의 RCS 변화가 완벽하게 유사하지 않기 때문에, 각 사람들 간의 반사 신호 간섭 영향이 완전히 없어지지 않은 것 또한 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 매우 근접한 두 사람들의 생체신호탐지를 위하여, 두 사람들에 의해 혼합된 레이더 수신신호의 I 및 Q 채널 성분들을 입력 값으로 가지고, 각 사람들의 개별 위상 변화들을 출력 값으로 가지는 새로운 신호분리 기법을 제안하였다.

제안된 기법의 성능을 검증하기 위하여 IR-UWB 레이더를 사용한 실험 결과, 기존 기법들^{[6],[7]}과 비교하여, 제안된 기법은 1) 상대적으로 간단한 신호분리 과정과 2) 두 사람들 간의 생체신호 주기 유사성 혹은 거리분해 성능에 상관없이, 매우 근접한 두 사람들의 생체신호탐지를 가능하게 하였다. 하지만, 제안된 기법은 오직 두 사람들에 대한 경우만 가능하다는 한계점이 있었다. 따라서 본 저자들은 향후 세 사람들 이상이 존재하는 생체신호탐지 환경에서 이를 보다 효과적으로 해결하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] F. Adib, H. Mao, Z. Kabelac, D. Katabi, and R. C. Miller, "Smart homes that monitor breathing and heart rate," in *CHI '15 Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Apr. 2015, pp. 837-846.
- [2] J. H. Lee, K. B. Kim, and S. O. Park, "Doppler radar system for long range detection of respiration and heart rate," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 4, pp. 418-425, Apr. 2014.
- [3] I. Ko, H. C. Park, "Apnea detection and respiration rate estimation using IR-UWB radar signals," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 10, pp. 802-809, Oct. 2017.
- [4] Q. Lv, D. Ye, S. Qiao, Y. Salamin, J. Huangfu, and C. Li, et al., "High dynamic-range motion imaging based on linearized Doppler radar sensor," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 9, pp. 1837-1846, Sep. 2014.
- [5] 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.
- [6] C. Ding, J. Yan, L. Zhang, H. Zhao, H. Hong, and X. Zhu, "Noncontact multiple target vital sign detection based on VMD algorithm," in *2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, Seattle, WA, 2017, pp. 727-730.
- [7] H. Lee, B. H. Kim, J. K. Park, and J. G. Yook, "A novel vital-sign sensing algorithm for multiple subject based on 24-GHz FMCW Doppler radar," *Remote Sens*, vol. 11, no. 10, p. 1237, 2019.
- [8] I. O. Choi, M. Kim, J. H. Choi, J. K. Park, and K. T. Kim, "Vital sign detection in a noisy environment by undesirable micro-motion," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 5, pp. 418-426, May 2019.

최 인 오 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0410-1066>



2012년 8월: 부경대학교 전자정보통신공학과 (공학사)
2014년 8월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)
2015년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 미세도플러 분석, 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 패턴인식, 스펙트럼 추정

박 정 기 [포항공과대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5409-5621>



2018년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
2018년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 생체신호 탐지, Passive Radar

김 민 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-7520-3513>



2015년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학사)
2017년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)
2018년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 전력발전단지 EMI/EMC 분석

김 경 태 [포항공과대학교/정교수]

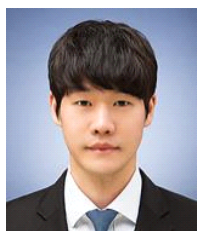
<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수
2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실실장
2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장
[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정

최 재 호 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9484-4869>



2017년 2월: 고려대학교 컴퓨터·통신공학부 (공학사)
2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2019년 2월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 휴먼 탐지, 미세도플러 분석