

2.4 GHz 도플러 레이더의 주파수 조정을 통한 이동체 거리 센싱

Distance Sensing of Moving Target with Frequency Control of 2.4 GHz Doppler Radar

백 경 진 · 장 병 준

Kyung-Jin Baik · Byung-Jun Jang

요 약

도플러 레이더는 단일 주파수의 정현파를 이용하므로 움직이는 이동체의 속도만을 측정할 수 있다고 알려져 있다. 일반적으로 이동체의 거리를 측정하기 위해서는 FMCW 레이더나 펄스 레이더를 이용하여야 하는데, 이 경우 하드웨어 구성 및 신호처리가 복잡할 뿐만 아니라, 주파수 대역폭을 넓게 사용하기 때문에 24 GHz나 77 GHz 대역의 밀리미터파를 사용할 수밖에 없어 가격이 비싸다. 따라서 가격이 저렴한 도플러 레이더에서 다중 톤 주파수를 이용하여 이동체의 속도 외에 거리까지 센싱하는 연구가 시작되고 있다. 이에 본 연구에서는 2.4 GHz 도플러 레이더에 내장된 PLL만을 이용한 주파수 조정만으로도 이동체의 거리 센싱이 가능함을 보인다. 특히, 기존에 제안된 DC 기반의 거리 계산에서 필요한 DC 정보를 제거하고, 교류결합된 AC 정보만을 이용하여 거리를 센싱할 수 있음을 보인다. 제안된 기술은 2.4 GHz 대역의 이동체 식별용 특성소출력 무선기기 기술기준을 만족하므로 45 dBm EIRP 출력을 이용하여 이동체 거리 센싱이 필요한 다양한 응용이 가능하다.

Abstract

In general, a Doppler radar can measure only the velocity of a moving target. To measure the distance of a moving target, it is necessary to use a frequency-modulated continuous wave or pulse radar. However, the latter are very complex in terms of both hardware as well as signal processing. Moreover, the requirement of wide bandwidth necessitates the use of millimeter-wave frequency bands of 24 GHz and 77 GHz. Recently, a new kind of Doppler radar using multitone frequency has been studied to sense the distance of moving targets in addition to their speed. In this study, we show that distance sensing of moving targets is possible by adjusting only the frequency of a 2.4 GHz Doppler radar with low cost phase lock loop. In particular, we show that distance can be sensed using only alternating current information without direct current offset information. The proposed technology satisfies the Korean local standard for low power radio equipment for moving target identification in the 2.4 GHz frequency band, and enables multiple long-range sensing and radio-frequency identification applications.

Key words: Doppler Radar, Distance Sensing, 2.4 GHz Radar, Multi-Tone Radar, Gesture Sensing

I. 서 론

아직까지 국내 레이더의 대부분은 군용을 위한 지상,

「이 연구는 2018년도 삼성전자 미래기술육성센터 연구비(SRFC-IT1801-06)의 지원으로 연구되었음.」

국민대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)

· Manuscript received November 27, 2018 ; Revised January 4, 2019 ; Accepted January 22, 2019. (ID No. 20181127-121)

· Corresponding Author: Byung-Jun Jang (e-mail: bjjang@kookmin.ac.kr)

함정, 항공 레이더로 주로 쓰이지만, 최근 제스처 인식이나 물체 감지, 심장 박동 측정, 차량 충돌 방지 등 새로운 분야에서의 레이더 활용에 대한 연구가 활발히 진행 중이다^[1]. 일반적으로 레이더는 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더나 펄스레이더가 주로 사용되지만, 광대역 신호를 이용하므로 시스템이 복잡하고, 주파수 대역폭을 많이 차지한다는 단점이 있다. 따라서 보통 레이더 주파수는 대역폭의 여유가 많은 24 GHz, 60 GHz, 77 GHz 등의 밀리미터파 대역에서 주로 사용된다^[2]. 이와 달리 CW(Continuous Wave) 도플러 레이더는 하나의 주파수 성분만이 사용되므로 시스템 구성이 간단하고, 2.4 GHz나 5.8 GHz와 같은 ISM(Industrial, Scientific, and Medical) 주파수 대역을 사용하므로 주파수 자원을 효율적으로 사용할 수 있다. 하지만 FMCW 레이더와 달리 CW 도플러 레이더를 이용할 경우에는 이동하는 물체의 움직임만을 센싱할 수 있으며, 레이더와 물체 사이의 거리는 파악할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 CW 주파수를 복수로 사용하고, 각 주파수의 차이에서 발생하는 위상차를 계산하여 이동체와의 거리를 계산할 수 있는 multi-tone 도플러 레이더 개념이 제안되었다^{[3],[5]}. 특히 참고문헌 [3]에서는 2.4 GHz 대역에서 두 개의 주파수만을 사용하여 거리 및 움직임을 측정할 수 있음을 보였다. 하지만, 기본적으로 두 주파수 차에 의한 거리 계산은 DC offset의 변화를 포함한 I/Q 신호의 궤적정보가 필요하므로 시스템 구현 시 ADC(Analog-to-Digital Converter)에 부담을 주는 문제가 있다.

이에 본 논문에서는, 거리 계산 시 필요한 DC 정보를 제거한 교류결합(AC-coupled)된 AC 정보만을 이용하여 거리를 계산하는 방법을 새롭게 제안한다. 제안된 시스템은 Two-tone 도플러 레이더를 구성하는 위상동기회로(phase-locked loop: PLL)의 주파수 제어를 이용하여 국내 2.4 GHz 대역의 이동체 식별용 특정소출력 무선기기 기술기준을 만족하도록 설계하였다. 해당 기술기준에 의하면 300 mW의 출력과 20 dBi의 안테나 이득이 가능하므로 약 45 dBm의 EIRP 출력을 갖는 장거리 물체인식 시스템 구현이 가능하므로 이동체의 움직임과 거리 센싱이 필요한 다양한 분야에 응용이 가능하다.

II. 관련 국내 기술기준 및 주파수 제어

과학기술정보통신부 고시 제2018-38호(신고하지 아니하고 개설할 수 있는 무선국용 무선설비의 기술기준), 제 7조 8항에 ‘이동체 식별용 특정소출력 무선기기의 기술기준’이 명시되어 있으며, 그 내용은 표 1과 같다. 이동체 식별용 특정소출력 무선기기는 원래 2.4 GHz RFID를 이용한 시스템으로 고안되었다. 일반적으로 리더는 3개의 주파수 중 하나의 주파수로 CW 신호를 전송하고, 물체에 부착된 태그는 CW 신호를 진폭변조하여 응답하게 된다. 하지만 2.4 GHz RFID는 917~923.5 MHz의 RFID가 전 세계적으로 보편화되면서 최근 사용이 활발하지 않은 기술이 되었다. 하지만 300 mW의 공중선 출력과 20 dBi까지의 안테나 이득이 가능하므로 약 45 dBm의 EIRP 출력을 갖는 장거리 물체인식 시스템 구현이 가능하다는 장점이 있어 RFID가 아닌 도플러 레이더에 의한 이동체 식별에 적용할 수 있다.

본 논문에서는 위 기술기준을 만족하도록 참고문헌 [6]에서 제시한 2.4 GHz 대역에서 동작하는 도플러 레이더 회로를 일부 변경하였다. 주파수 제어를 위해 Analog Device Inc.의 Fractional-N Frequency Synthesizer인 ADF4153과 Maxim사의 MAX 2750 전압제어발진기를 이용하여 주파수합성기를 구성하였으며, 8 bit 마이크로컨트롤러인 Atmega8을 이용하여 마이크로컨트롤러 프로그램을 작성하여 ADF4153 칩의 N divider와 R counter 값을 수정할 수 있도록 하였다. PLL 회로인 N divider와 R counter의 조정으로 레이더의 동작 주파수가 기술기준에서 제시한 3가지 주파수인 2.440 GHz,

표 1. 국내 이동체 식별용 특정소출력 무선기기 기술기준
Table 1. The Korean local regulation for specific low power radio equipment for mobile identification.

Device	Mobile identification
Frequency (MHz)	2,440(2,427~2,453)
	2,450(2,434~2,465)
	2,455(2,439~2,470)
Power	300 mW
Propagation type	N0N
	A1D
	AXN

2.450 GHz, 및 2.455 GHz 주파수로 자유롭게 변경될 수 있어 기술기준을 만족한다.

Ⅲ. 이중 주파수 도플러 레이더 센서

3-1 거리 센싱 측정 원리

일반적으로 하나의 단일 주파수를 사용하는 도플러 레이더는 이동체의 움직임에 따라 반사되는 반사파의 도플러 주파수가 변화되는 원리를 이용하므로 I/Q 복조기가 필요 없다. 하지만 반사파의 위상변화를 알기 위해서는 직교복조기가 필요하다. 직교복조기는 동위상(I) 신호와 직교위상(Q) 신호를 검출하고, 두 신호의 위상차를 통해 위상변화를 관찰할 수 있다. 이에 제작된 도플러 레이더는 Skyworks사의 SKY73009 I/Q 복조기를 사용한다. 기본 회로 구성에 대한 설명은 참고문헌 [1] 및 참고문헌 [6]에 기술된 바와 동일하므로 생략한다.

먼저, I/Q복조기가 있는 도플러 레이더의 기저대역 I/Q 신호는 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$I(t) = A_I \cos \left[\frac{4\pi x(t)}{\lambda} + \theta_0 + \theta_r + \Delta\phi(t) \right] + DC_I \quad (1)$$

$$Q(t) = A_Q \sin \left[\frac{4\pi x(t)}{\lambda} + \theta_0 + \theta_r + \Delta\phi(t) \right] + DC_Q \quad (2)$$

여기서 A_I 와 A_Q 는 I/Q 신호의 크기이며, $x(t)$ 는 시간에 따라 변하는 이동체의 움직임, λ 는 파장, $\Delta\phi(t)$ 는 range correlation 효과에 의해 감소된 위상잡음, θ_0 는 레이더와 이동체 사이의 거리에 따른 위상지연, θ_r 은 수신기 회로에 의한 위상지연, 마지막으로 DC_I 와 DC_Q 는 DC offset을 의미한다.

그림 1과 같이 서로 다른 주파수 f_1 과 f_2 가 교대로 송신된다면 이에 따른 반사파의 위상변화 θ_1 과 θ_2 는 다른 고정항을 제외하면 식 (3) 및 식 (4)와 같이 달라진다.

$$\theta_1 = \frac{4\pi d}{\lambda_1} + \theta_r \quad (3)$$

$$\theta_2 = \frac{4\pi d}{\lambda_2} + \theta_r \quad (4)$$

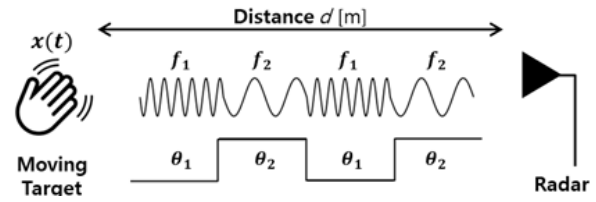


그림 1. 이중 주파수 도플러 레이더 원리
Fig. 1. Principle of two-tone Doppler radar.

여기서 d 는 레이더와 진동하는 물체 사이의 거리 $x(t)$ 의 평균거리를 의미한다. 식 (3)과 식 (4)를 d 에 대해 정리하면 식 (5)을 정의할 수 있다^[3].

$$Distance [m] = \frac{\Delta\theta \times c}{\Delta f \times 4\pi} \quad (5)$$

여기서 Δf 는 $|f_1 - f_2|$ 이고, $\Delta\theta$ 는 $|\theta_1 - \theta_2|$ 을 의미한다. 정리하면 그림 1과 같이 도플러 레이더의 중심주파수가 f_1 에서 f_2 로 변한다면 반사파의 위상도 θ_1 에서 θ_2 로 변하게 되며, 식 (5)을 이용하여 위상의 변화로부터 이동물체와의 거리를 계산할 수 있게 된다. 그림 2는 거리와 위상차의 관계를 나타낸 그림이다. Δf 가 일정하면 거리가 멀수록 위상차가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 특정거리에 있는 이동체의 거리를 계산할 수 있다. 한편, Δf 가 증가함에 따라 전파의 감쇄특성에 의해

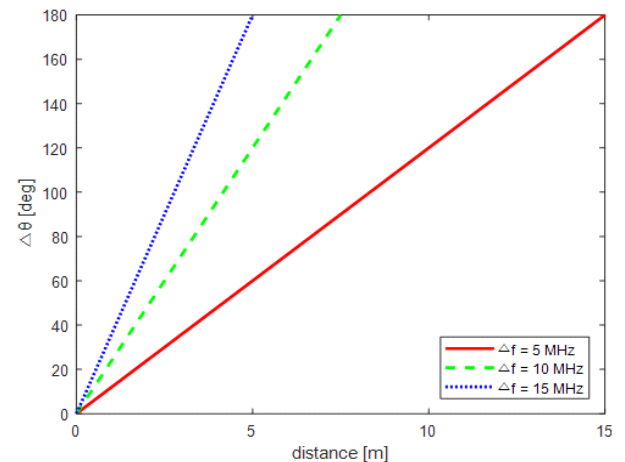


그림 2. 이중 주파수 레이더의 거리와 위상차의 관계
Fig. 2. The relationship between distance and $\Delta\theta$ of dual-tone Doppler radar.

인식 가능한 거리가 감소하므로, 적용하고자 하는 목적에 맞는 Δf 를 설정할 필요가 있다.

3-2 시뮬레이션

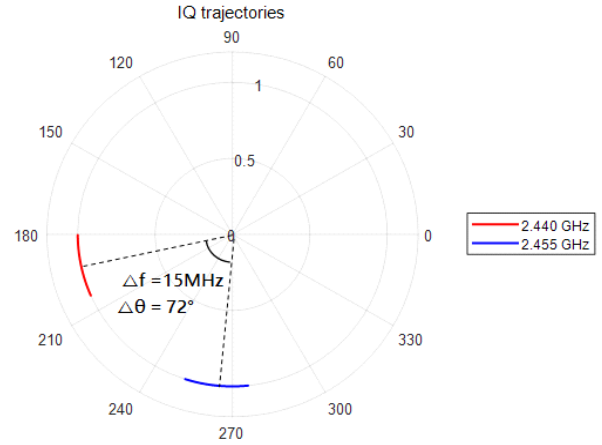
주파수 조정에 따른 도플러 레이더의 거리 감지 특성을 확인하기 위해 MATLAB으로 모의 실험(시뮬레이션)을 진행하였다. 도플러 레이더의 주파수는 국내 기술기준을 고려하여 두 가지 주파수 2.440 GHz와 2.455 GHz로 설정하였다. 그리고 2 m 만큼 떨어진 거리에 0.2 Hz, 2 mm 크기로 진동하는 물체가 있다고 가정하였다. 직교복조기를 거친 신호는 그림 3(a)와 같이 Δf 가 15 MHz이고 거리가 2 m이므로 $\Delta\theta$ 는 72° 가 된다. 이러한 신호는 DC 정보가 포함된 DC-결합 신호이므로 ADC를 이용하여 디지털 신호로 변환할 경우 ADC의 동적범위에 부담이 된다. 보통 ADC는 DC-결합 신호보다는 DC 정보가 없는 AC-결합 신호를 사용하므로 IQ 복조기 신호를 OPAMP로 구성된 고역통과필터(high pass filter: HPF)를 통과시키면 그림 3(b)와 같이 AC-결합 신호로 변환된다.

그림에서 알 수 있듯이, 그림 3(a)는 일정한 크기로 위상정보만 변하는 궤적을 그리는 반면, 그림 3(b)의 경우에는, 한 가지 주파수 내에서 위상의 변화가 거의 없으므로 주파수 차이에 의한 위상차를 쉽게 파악할 수 없는 단점이 있다. 따라서 ADC에 부담을 주지 않는 AC-결합 신호를 사용하면서도 디지털 영역에서 위상차를 정확히 계산하는 방식이 필요하다.

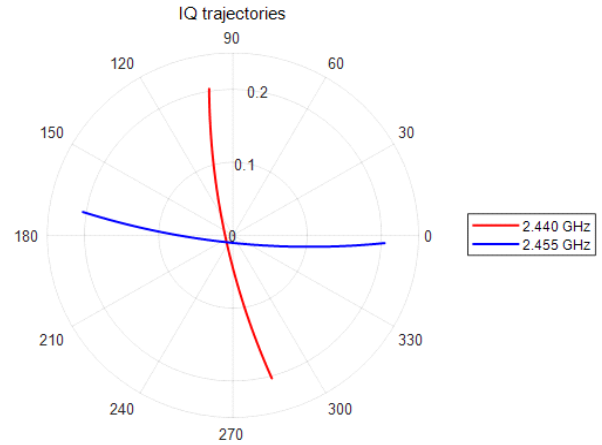
3-3 AC-결합 신호의 위상 계산 알고리즘

앞에서 설명한 바와 같이 레이더와 이동체 사이의 거리를 정확히 센싱하기 위해서는 도플러 레이더로 측정된 신호에서 위상 변화를 정확히 알아야 한다. 하지만 식 (1)과 식(2)에서 위상변화는 DC offset이나 I/Q 신호의 크기에 비해 매우 작으므로 DC offset을 회로적으로 정확히 보상(calibration)하는 것은 매우 어렵다. 한편, DC 성분을 ADC 이후에 보상할 수도 있으나, 이 경우 ADC 동작범위에 부담을 주므로 이 또한 어려운 작업이다^[5].

이에 본 논문에서는 회로적인 I/Q 신호의 교정이나 ADC에 부담없이 위상변화를 구할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 이를 위해 회로적으로 1 Hz 이하의 DC 성분을



(a) DC offset을 포함
(a) I/Q trajectories with DC offset



(b) DC offset 제거
(b) I/Q trajectories without DC offset

그림 3. I/Q 궤적 비교

Fig. 3. The comparison of I/Q trajectories.

차단할 수 있도록 OPAMP를 이용한 고역통과필터(High Pass Filter: HPF)를 구현하여 교류정합된 AC 신호를 생성하였다. 이 AC 성분을 바탕으로 위상차를 구하는 알고리즘은 그림 4와 같다. 먼저 서로 다른 2개의 주파수에서 동작시킨 도플러 레이더의 I/Q 신호를 복소수 형태인 X_1 과 X_2 신호를 만들고, 이를 푸리에 변환한다. 푸리에 변환하여 얻은 Y_1 과 Y_2 신호에서 가장 큰 크기를 갖는 인덱스를 찾는다. 찾아진 각 인덱스에 해당하는 성분의 위상을 구하고 마지막으로 두 신호의 위상차를 계산한다. 이렇게

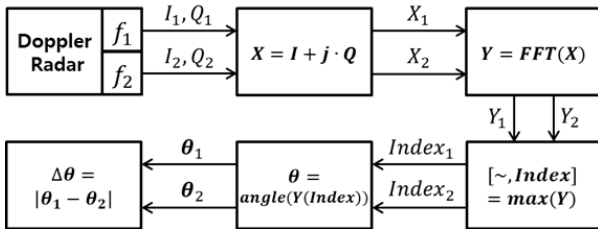


그림 4. 위상차 계산을 위한 알고리즘
Fig. 4. The algorithm of calculating the phase difference.

하면 DC 성분의 고려 없이 교류정합된 AC-신호로부터 위상차를 계산할 수 있다.

IV. 실험

4.1 시스템 구성

제안한 Two-tone 도플러 레이더를 이용한 거리 측정 시스템의 타당성을 검증하기 위한 실험구성은 그림 5와 같다. CW 도플러 레이더(4)는 PLL을 마이컴으로 제어하여 출력 주파수를 순차적으로 조정한다. 각 주파수로 송신된 신호가 물체나 사람의 움직임에 의해 반사되고, 반사된 신호가 레이더로 수신된다. 본 실험에서는 서보모터(1)와 아두이노(3)를 이용하여 일정한 속도로 움직이는 물체(2)를 구현하였다. 이 때 각각의 주파수에 따라서 다른 위상차가 발생하는데, 주파수의 차이와 위상차에 따라 움직이는 물체와 레이더 사이의 거리를 파악할 수 있다. 위상차를 분석하기 위해, 도플러 레이더의 출력 신호를 오실로스코프(5)로 수신하여 데이터를 저장하였다. 저장된 데이터는 MATLAB으로 후처리하여 주파수

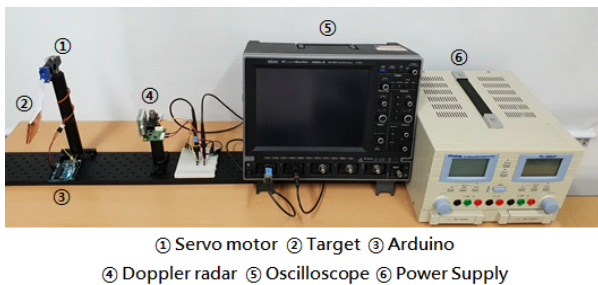


그림 5. 이동체 거리 센싱 시스템 구성
Fig. 5. The configuration of the distance sensing system.

조정에 따른 위상변화를 계산하여 거리를 예측하였다. 한편 기존의 CW 도플러 레이더 시스템과 같이 한 주파수에 대한 신호를 이용하여 도플러 주파수를 분석하면 움직임 인식도 가능하다.

4.2 실험 및 실험 결과

본 논문에서 제안한 시스템을 검증하기 위해 실험을 진행하였고, 시나리오는 그림 6과 같다. 이동체로 가정할 물체와 30 cm 만큼 떨어진 위치에 도플러 레이더를 고정하였다. 물체와 레이더의 고정은 간이 광학벤치를 이용하여 실험의 신뢰성을 높였다. 이동체는 서보모터에 네모난 금속판으로 구성하고, 아두이노로 서보모터를 제어하여 일정하게 움직이도록 하였다. 이 때, 이동체의 움직임이란 30cm로 고정된 위치에서 일정한 속도, 일정한 높이로 움직이는 진자운동을 의미한다. 도플러 레이더의 주파수는 2.425 GHz부터 2.455 GHz까지 5 MHz 간격으로 제어하였다. 그리고 국내 이동체식별용 특정소출력 무선기기의 기술기준 주파수인 2.455 GHz를 기준으로 Δf (5 MHz 단위)에 따른 $\Delta \theta$ 를 분석하였다.

그림 6의 실험 시나리오 및 블록도에 따라 실험이 진행되었다. 먼저 마이컴으로 PLL을 제어하여 도플러 레이더의 동작 주파수를 원하는 주파수로 설정한다. 그리고 해당 주파수로 동작하는 도플러 레이더에서 CW 신호를 송신하고, 이동체의 움직임에 의해 반사된 신호를 다시 수신한다. 오실로스코프를 이용하여 레이더의 출력 신호인 I/Q 데이터를 500 samples/sec로 5초 동안 측정하여 저장한다. 여러 가지 주파수로 측정된 IQ 신호의 동기를 맞추

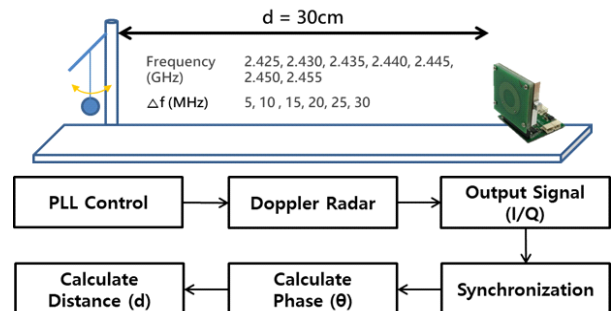


그림 6. 실험 시나리오 및 블록도
Fig. 6. Experimental scenario and block diagram.

고 나면, 그림 7과 같은 I/Q 신호를 확인할 수 있다. 그림 7의 x축은 측정된 시간을 의미하며, y축은 신호의 크기를 의미한다. 또한 이는 국내 기술기준에 해당하는 세 가지 주파수에 대한 I/Q 신호만 그렸다. 그림에서 알 수 있듯이 다양한 AC-결합된 신호가 출력되며, 크기는 주변 환경의 원인으로 크기가 달라진다. 그림 8은 2.440 GHz, 2.455 GHz의 주파수로 측정된 교류 정합된 AC-신호의 I/Q 궤적이다. 이는 3장의 시뮬레이션을 통해 확인했듯이, 그림 3(b)와 같이 AC-정보만을 이용한 데이터이므로 거리와 위상이 모두 변하여 위상차를 파악하기 쉽지 않다. 따라서 이 신호를 이용하여 3장에서 설명한 위상차 알고리즘에 따라 위상차를 구하였으며, 그림 9는 주파수 차이에 따른 위상차의 이론값과 실험값을 비교한 그래프이다. 마지막으로, Δf 와 $\Delta \theta$ 를 식 (3)에 대입하여 거리를 계산한 결과는 표 2로 나타내었으며, 2 cm 이내의 오차 내에서 평균적으로 2.42 %의 오차율을 보였다. 오차율을 계산할 때 도플러 레이더 자체에서 발생한 위상차가 있을 수 있으나, 5 MHz 주파수 변화에 대해서는 일정하다고 가정하면 주파수 변화에 따라 위상차 계산할 때 레이더 자체

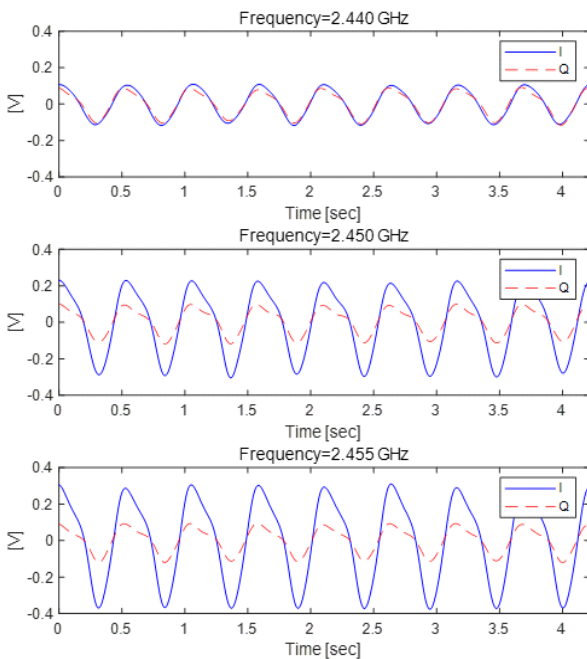


그림 7. 주파수에 따른 I/Q 신호
Fig. 7. IQ signal of each frequency set.

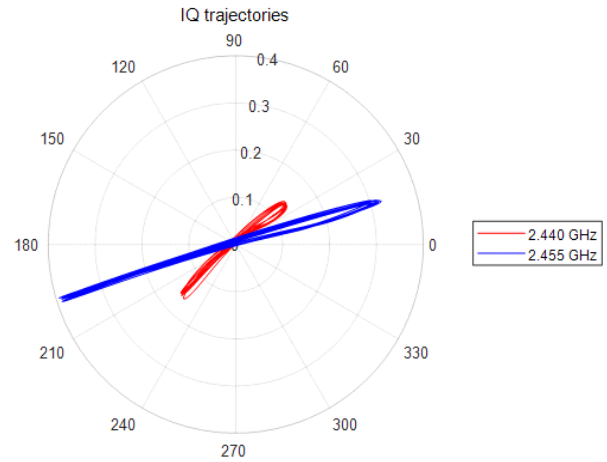


그림 8. DC offset 제거한 실험 데이터의 I/Q 궤적
Fig. 8. The I/Q trajectories without DC offset.

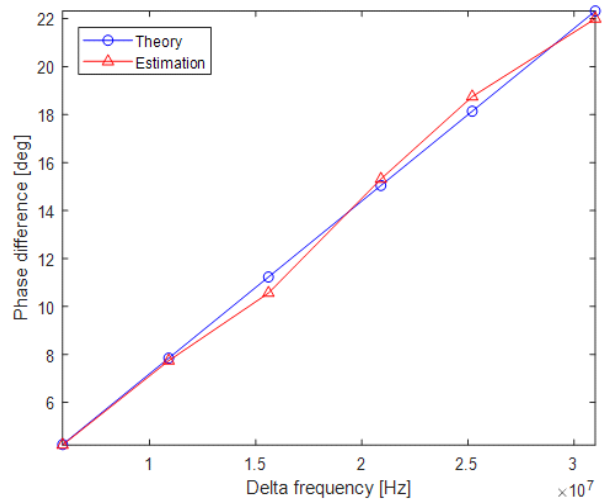


그림 9. Δf 와 $\Delta \theta$ 의 관계
Fig. 9. The relationship between Δf and $\Delta \theta$.

에서 발생한 위상차는 상쇄되었다고 가정하고 오차율을 계산하였다. 도플러 레이더 자체에서 발생하는 위상차를 상쇄할 수 있다는 것이 타 방식에 비해 본 논문의 장점이라 할 수 있다^[7].

본 논문에서 제안한 방식은 이러한 실험을 통해 국내 기술기준을 만족하는 이동체 거리 센싱이 만족함으로 확인할 수 있었다. 제작된 시스템은 0 dBm 출력의 신호이

표 2. 실험결과
Table 2. Experimental results.

Δf [MHz]	Theory	Estimation	Theory	Estimation	Distance error [%]
	$\Delta\theta$ [deg]	$\Delta\theta$ [deg]	Distance [cm]	Distance [cm]	
5	4.248	4.228	30	29.857	0.48
10	7.848	7.743		29.599	1.34
15	11.232	10.562		28.211	5.96
20	15.048	15.317		30.535	1.78
25	18.144	18.753		31.066	3.55
30	22.320	22.000		29.570	1.43

므로 현재 수십 cm의 거리에서만 측정되지만 출력을 기술기준이 허용하는 시스템까지 올리면 더 큰 거리까지 동작될 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 2.4 GHz 도플러 레이더에 내장된 PLL만을 이용한 주파수 조정만으로 이동체의 거리 센싱이 가능함을 보였다. 또한 상용화 가능성을 고려하고 주파수 자원을 효율적으로 활용하기 위해, 국내 이동체식별용 특정소출력 무선기기의 기술기준을 만족하도록 설정하여 실험을 진행하였다. 이를 통해 이중 주파수 도플러 레이더를 이용하여 주파수 차이에 따라 발생하는 위상차 정보로부터 물체와의 거리를 파악하고, 기존의 단일 주파수 도플러 레이더 시스템을 함께 적용하면 거리 및 움직임에 대한 인식도 가능하다. 본 제안 기술을 바탕으로 다양한 응용분야에서 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

References

- [1] 백경진, 장병준, "다중 도플러 레이더와 머신러닝을 이용한 손동작 인식," 한국전자과학회논문지, 28(1), pp. 33-41, 2017년 1월.
- [2] J. Lien, N. Gillian, M. E. Karagozler, P. Amihood, C. Schwesig, and E. Olsonet, et al., "Soli: Ubiquitous gesture sensing with millimeter wave radar," *ACM Transactions on Graphics(TOG)*, vol. 35, no. 4, p. 142, 2016.
- [3] C. Nieh, C. Wei, and J. Lin "Concurrent detection of vibration and distance using unmodulated CW Doppler vibration radar with an adaptive beam-steering antenna," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 6, pp. 2069-2078, Jun. 2017.
- [4] J. Huang, Y. Zhang, and S. Luo, "A simple estimator for localization of moving targets using dual-frequency radar with minimum system architecture," *IEEE Sensors Letters*, vol. 2, no. 1, p. 3500604, Mar. 2018.
- [5] C. Gu, J. Lien, "A two-tone radar sensor for concurrent detection of absolute distance and relative movement for gesture sensing," *IEEE Sensors Letters*, vol. 1, no. 3, p. 3500504, Jun. 2017.
- [6] 장병준, 박재형, 육종관, 문준호, 이경중, "하나의 원형 편파 안테나와 PLL을 이용하여 소형이면서도 개선된 잡음 성능을 갖는 2.4 GHz 바이오 레이더 시스템," 한국전자과학회논문지, 20(12), pp. 1325-1332, 2009년 12월.
- [7] F. Michler, B. Scheiner, F. Lurz, R. Weigel, and A. Koelpin, "(Micro)Metering with mirowaves: A low-cost, low-power, high-precision radar system," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 20, no. 1, pp. 91-97, Jan. 2019.

백 경 진 [국민대학교/석사과정]



2017년 2월: 국민대학교 전자공학부 (공학사)
2017년 3월 ~ 현재: 국민대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 센서 시스템 설계, 레이더 신호처리, 무선통신시스템

장 병 준 [국민대학교/교수]



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월 ~ 1999년 1월: LG전자(주)
1999년 1월 ~ 2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소
2003년 10월 ~ 2005년 8월: 정보통신연구진흥원
2013년 9월 ~ 2015년 8월: 미래창조과학부 민간전문가(CP)
2005년 9월 ~ 현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선통신시스템, 전파응용