

24 GHz Six-Port Topology를 이용한 μm 단위의 초미세 진동 감지Ultra-Fine Vibration Detection in μm Using 24 GHz Six-Port Topology

김 예 원 · 방 인 우 · 최 진 주

YeWon Kim · InWoo Bang · JinJoo Choi

요 약

본 논문은 24 GHz six-port topology를 ADS로 설계하고 제작하여 초미세 진동을 감지할 수 있음을 보인다. Six-port topology는 1개의 Wilkinson divider, 3개의 90° hybrid coupler, 쇼트키 다이오드를 사용한 RF 검출기, 커플러, 서큘레이터, Ka-band 안테나, Arduino UNO, MATLAB으로 구성하였고, 4개의 RF 검출기의 출력전압으로 위상변화를 측정하였다. RF 검출기의 시뮬레이션 결과 반사 계수가 24 GHz 기준 -38.2 dB 가 되도록 설계하였다. 하지만 제작결과 4개의 RF 검출기의 출력전압의 크기가 작고 진폭이 같지 않았다. 이 문제를 해결하기 위해 gain이 45인 연산 증폭기를 RF 검출기 뒷단에 추가해 출력전압을 키웠으며, MATLAB으로 값을 보상해서 진폭을 같게 만들었다. 실험 결과 20 μm 정도의 초미세 진동을 감지할 수 있었다.

Abstract

This paper shows that ultra-fine vibration can be detected by designing and manufacturing a 24 GHz six-port topology using ADS. The six-port topology consists of one Wilkinson divider, three 90° hybrid couplers, RF detectors using Schottky diodes, couplers, circulators, Ka-band antennas, an Arduino UNO, and MATLAB, and phase changes were measured by the output voltages of the four RF detectors. As a result of RF detector simulation, S_{11} was designed to be -38.2 dB owing to 24 GHz. However, as a result of fabrication, the output voltages of the four RF detectors were small and the amplitudes were not the same. To solve this problem, an operational amplifier with a gain of 45 was added to the rear end of the RF detector to increase the output voltage, and the amplitude was made equal by compensating the value using MATLAB. As a result of the experiment, ultra-fine vibration of approximately 20 μm could be detected.

Key words: Six-Port, Six-Port Reflectometer, Vibration Detection

I. 서 론

레이다는 산업용 거리 탐지 애플리케이션에서 유망한 측정법으로 발전했다. 레이다의 장점은 장거리 장애물 감지와 정확한 거리 측정 및 동작 제어를 실시간으로 사용

할 수 있다는 것이다^[1]. 그러나 고전적인 레이다 구조는 분해능이 뛰어나지 않아 물체의 미세한 움직임을 감지하는 것이 힘들다. UWB 레이다의 경우, 매우 짧은 시간을 표본 추출을 할 수 있는 기술이 필요하며, μm 단위의 움직임을 감지할 수 없다. FMCW 레이다의 경우는 많은 대

「이 연구는 2022학년도 광운대학교 교내 연구비 지원으로 연구되었음.」

광운대학교 전자융합공학과(Department of Electronic Convergence Engineering, Kwangwoon University)

· Manuscript received December 14, 2022 ; Revised January 9, 2023 ; Accepted February 20, 2023. (ID No. 20221214-105)

· Corresponding Author: JinJoo Choi (e-mail: jinchoi@kw.ac.kr)

역폭을 차지해야 한다.

이와 반대로 six-port topology는 미세한 움직임에 대한 위상 변화를 측정할 수 있다. 대역폭과 상관없이 단일 주파수를 사용하고 거리 측정은 전력의 크기와 관련이 있다. 또한, 고주파를 사용하면 분해능을 높일 수 있다. Six-port topology는 회로 구조가 간단하고 저렴한 비용으로 만들 수 있다는 장점이 있다.

Six-port topology의 활용 분야는 거리 변화 측정뿐만 아니라, 들어오는 신호의 방향(angle of arrival)을 알 수 있다. 두 개의 안테나에 들어오는 신호의 위상 차이를 계산할 수 있기 때문이다. 이를 활용하면 로봇의 미세한 움직임을 제어할 수 있다. 또한, μm 단위의 차이를 감지할 수 있으므로 바닥의 평탄성을 확인할 수 있다. 이처럼 six-port topology는 산업에서 활용도가 높다^[2].

이 논문에서는 24 GHz에서 six-port topology를 ADS를 사용해 설계하고 제작해 μm 단위의 거리 변화를 감지하는 것을 보인다. Six-port topology의 이론적인 원리나 구동 방식은 기존 논문과 큰 차이가 없다. 하지만 독립적으로 ADS로 설계하고 제대로 동작하는지 확인했다는 차이점이 있다. 특히 ADS로 안테나를 모델링하는 부분에서는 안테나의 전파 효과가 없어도 되기 때문에 끝을 단락시킨 유전율이 공기와 같은 동축 케이블을 사용하였다. 따라서 ADS에서 계산량을 줄일 수 있었다.

II. 이론 및 특성 식 유도

Six-port topology는 그림 1과 같이 2개의 입력 신호와 4개의 출력 신호로 구성되고, 4개의 출력 신호를 계산해서 거리의 변화를 측정하는 기법이다^{[3]~[5]}. 첫 번째 입력 신호는 VCO 신호가 커플러를 통과해 Wilkinson divider로 들어가는 신호이고, 이것의 전압을 S_1 이라고 했다. S_1 은 식 (1)로 표현할 수 있다. 두 번째 신호는 90° hybrid coupler를 거친 후 물체에 반사되는 RF 신호이다. 여기서 커플러는 서큘레이터와 같은 역할을 하여, 반사된 신호가 또 다른 90° hybrid coupler로 도달하게 한다. Six port network의 커플러에 들어가기 직전 전압을 S_2 라고 하고, 식 (2)로 표현했다.

$$S_1 = \overline{S_1} e^{j\theta_1} \quad (1)$$

$$S_2 = \overline{S_2} e^{j\theta_2} \quad (2)$$

입사된 두 신호 S_1 , S_2 는 Wilkinson divider와 90° hybrid coupler를 거쳐 4개의 출력 신호로 나온다. 이때 쇼트키 다이오드를 사용한 RF 검출기 앞 단의 전압을 S_3 , S_4 , S_5 , S_6 로 표현하면 식 (3)~식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$S_3 = -0.5(S_1 - jS_2) \quad (3)$$

$$S_4 = -0.5(-jS_1 + S_2) \quad (4)$$

$$S_5 = 0.5j(S_1 + S_2) \quad (5)$$

$$S_6 = -0.5(S_1 - S_2) \quad (6)$$

S_3 , S_4 , S_5 , S_6 들의 시간당 평균 전력을 P_3 , P_4 , P_5 , P_6 라고 하면 각각의 전력은 식 (7)~식 (10)이 된다.

$$\begin{aligned} P_3 &= \frac{1}{8z_0} |S_1 - jS_2|^2 \\ &= \frac{1}{8z_0} (\overline{S_1}^2 + \overline{S_2}^2 + 2\overline{S_1}\overline{S_2}\sin(\theta_2 - \theta_1)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_4 &= \frac{1}{8z_0} |-jS_1 + S_2|^2 \\ &= \frac{1}{8z_0} (\overline{S_1}^2 + \overline{S_2}^2 - 2\overline{S_1}\overline{S_2}\sin(\theta_2 - \theta_1)) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P_5 &= \frac{1}{8z_0} |jS_1 + jS_2|^2 \\ &= \frac{1}{8z_0} (\overline{S_1}^2 + \overline{S_2}^2 + 2\overline{S_1}\overline{S_2}\cos(\theta_2 - \theta_1)) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_6 &= \frac{1}{8z_0} |S_1 - S_2|^2 \\ &= \frac{1}{8z_0} (\overline{S_1}^2 + \overline{S_2}^2 - 2\overline{S_1}\overline{S_2}\cos(\theta_2 - \theta_1)) \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 S_1 과 S_2 의 위상 차이를 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\theta_2 - \theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{P_3 - P_4}{P_5 - P_6} \right) \quad (11)$$

RF 검출기 뒷단의 전압을 그림 1과 같이 V_3 , V_4 , V_5 , V_6 이라고 했다. Square-low region 영역에서 동작하는 쇼트

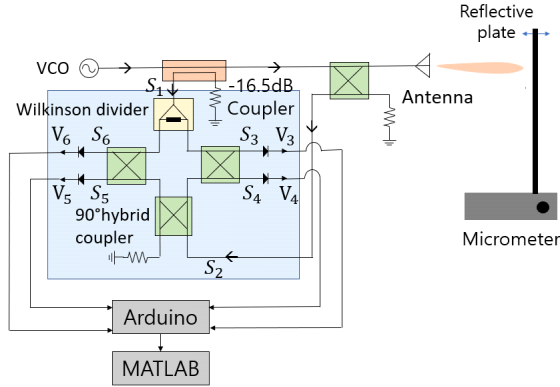


그림 1. Six-port topology 회로도
Fig. 1. Six-port topology circuit.

키 다이오드를 사용한 RF 검출기는 입력 파워와 출력 전압이 비례하기 때문에 S_1 과 S_2 의 위상 차이는 식 (12)와 같다.

$$\theta_2 - \theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{V_3 - V_4}{V_5 - V_6} \right) \quad (12)$$

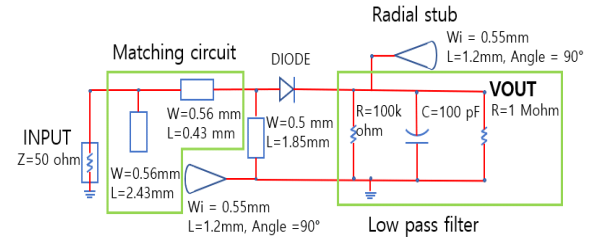
여기서 θ_1 은 고정된 값이고, θ_2 는 물체가 움직이는 거리에 따라 변하기 때문에 식 (12)를 이용하면 물체의 거리 변화를 측정할 수 있다^[2].

III. 설계 및 제작

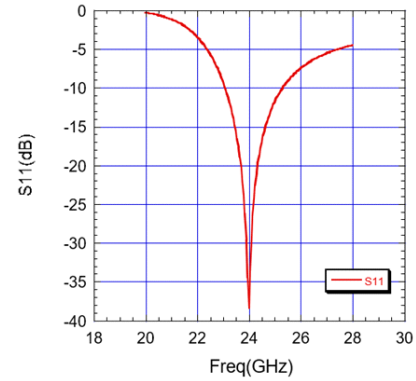
이 논문에서는 six-port 회로를 유전율 3.66, 기판 두께 254 μm 인 Rogers4350 기판으로 설계했다. VCO는 HMC739LP4 칩으로 하였다. VCO의 조정 전압을 2.1 V로 설정해 24 GHz를 발진할 수 있게 하였다. RF 검출기에 사용한 쇼트키 다이오드는 Skyworks사의 SMS7630-079LF 제품을 사용하였다. 또한, 커플러는 -16.5 dB가 되게 설계를 하였다.

그림 2(a)는 ADS로 RF 검출기를 설계한 회로이다. 스미스 선도를 이용해서 정합 회로를 추가해 반사 계수가 24 GHz 기준 -38.2 dB가 나오도록 설계했다.

ADS로 전체 six-port topology를 시뮬레이션한 회로를 그림 3에서 나타냈다. 그림 1의 안테나를 대신하여 그림 3과 같이 끝부분을 단락시킨 유전율이 공기와 같은 동축 케이블을 사용하였다. 동축 케이블을 사용한다면 안테나와 왕복 거리에 따른 전력손실이 거의 없다. 안테나를 대



(a) RF 검출기 회로도
(a) Diode detector schematic



(b) RF 검출기의 반사 손실
(b) Diode detector return loss

그림 2. RF 검출기 설계
Fig. 2. Diode detector design.

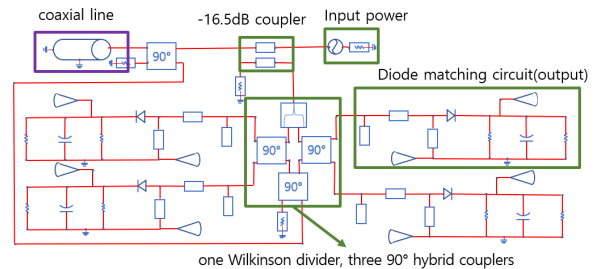


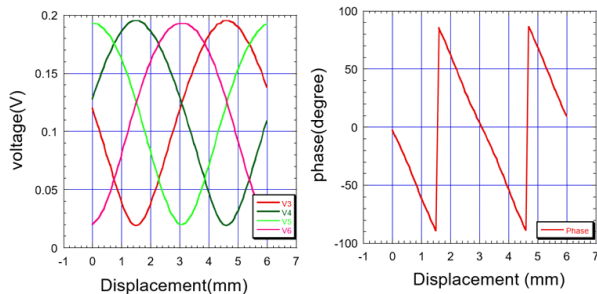
그림 3. 시뮬레이션을 한 전체 회로도
Fig. 3. Simulated whole schematic.

신할 수 있는 이유는 첫 번째로는 안테나와 같이 자유 공간에서 전파 특성이 있기 때문이다. 본 연구의 six-port topology는 일정한 거리에서 미세한 움직임 감지하는 것이 목적이기 때문에 안테나의 전파 효과를 고려할 필요가 없다. 두 번째로는 식 (11)에서 S_3, S_4, S_5, S_6 의 크기가 약분되기 때문에 위상 변화만 볼 수 있기 때문이다. 따라

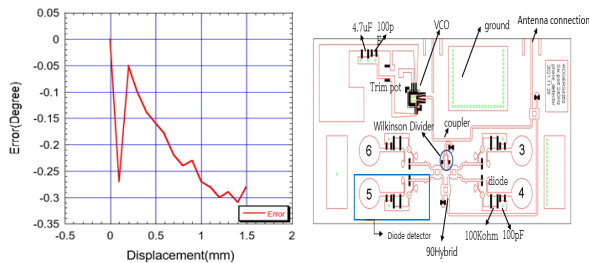
서 신호대잡음비가 충분한 조건이라면 일정한 거리에 떨어진 물체의 위상 변화는 언제나 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 불필요한 계산을 줄일 수 있게 유전율이 공기와 같은 동축 케이블로 안테나를 대신하여 시뮬레이션하였다.

그림 4(a)는 동축 케이블을 0.5 mm씩 증가시킬 때 출력 전압을 나타낸 것이다. 4개의 출력 모두 거리에 따라 전압이 바뀐다. 그림 4(b)는 그림 4(a)에서 구한 출력전압을 식 (12)에 넣어 위상을 구한 것이다.

식 (12)에서와 같이 위상 변화는 탄젠트 그래프를 따르고 왕복 거리임을 고려하면 최대 추정 거리 범위는 $R_{unambiguous} = \frac{\lambda}{4}$ 가 된다^[6]. 따라서 그림 4(b)에서 보듯이 동축 케이블의 길이의 3.125 mm마다 주기가 반복한다. 또한, 거리와 위상이 비례하게 나오는 것을 확인했다. 그림 4(c)는 동축 케이블을 0.1 mm씩 증가했을 때 위상의 이론값 오차를 나타낸 그래프다. 최대 오차가 -0.31° 로



(a) 거리에 따른 4개의 출력 전압 (b) 거리에 따른 위상 변화
(a) Four output voltage with distance (b) Phase changes with distance



(c) 시뮬레이션 오차 (d) 제작 회로도
(c) Simulation error values (d) Fabrication schematic

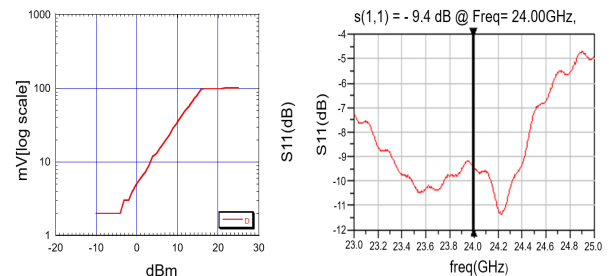
그림 4. ADS 시뮬레이션 결과
Fig. 4. ADS simulation result.

11 μm 오차가 발생하였다. 오차가 발생한 이유는 RF 검출기의 매칭 회로의 일부 반사파가 돌아가서 다시 six-port 회로와 간섭이 일어나기 때문이다. 그림 4(d)는 본 논문에서 제작한 회로도이다.

IV. 실험

제작된 RF 검출기의 RF 검출기 반응 정도를 측정했다. 측정 결과 RF 검출기의 출력 전압이 3 mV에서 30 mV까지 지일 때 RF 검출기가 square-law region에 있는 것을 그림 5(a)에서 볼 수 있다. 제작한 RF 검출기의 반사 계수는 그림 5(b)에서 볼 수 있듯이 VNA로 측정 결과 -9.4 dB가 나왔다. 설계한 값보다 반사 계수가 안 좋아진 이유는 커넥터와 RF 검출기의 납땜 문제에 의한 것이라고 판단된다.

실험 환경은 그림 6과 같이 조성했다. 구리판을 마이크로미터와 연결한 후 안테나와 5 cm 거리를 두고 설치했다. RF 검출기 출력단에 이득이 45인 연산 증폭기를 추가하고, Arduino UNO로 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸어 MATLAB으로 결과를 나타내었다. 연산 증폭기를 추가한 이유는 Arduino UNO의 해상도가 4 mV이기 때문이다. 그림 5(a)와 같이 RF 검출기의 측정할 수 있는 최대 전압이 30 mV로 Arduino UNO로는 7개의 데이터 포인트를 찍을 수가 있다. 하지만 이는 매우 적은 데이터 포인트 개수이기에 다이오드 뒷단에 이득이 45인 연산 증폭기를 추가해 출력전압을 키워 Arduino UNO로 측정할 수 있는



(a) 제작된 RF 검출기의 반응 정도 (b) 제작된 RF 검출기 회로의 반사 계수
(a) Manufactured diode detector response (b) Return loss of the manufactured diode detector circuit

그림 5. 제작된 RF 검출기 결과
Fig. 5. Manufactured diode detector result.

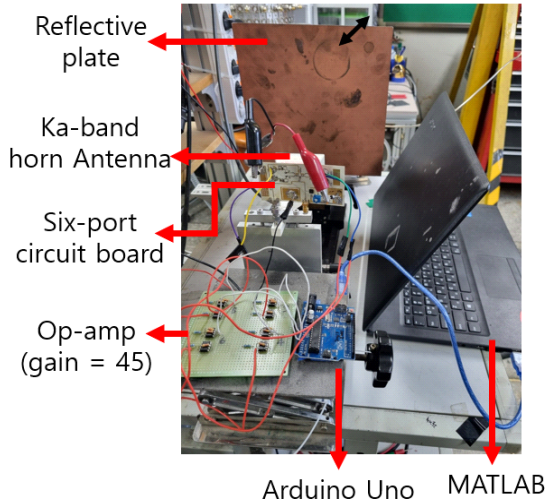


그림 6. 실험 환경
Fig. 6. Experimental layout.

데이터의 개수를 늘렸다. Arduino UNO를 통과한 4개의 출력전압은 MATLAB으로 적당한 값을 곱해 진폭이 같게 만들었다.

그림 7(a)는 RF 검출기 뒷단에 연산 증폭기를 추가하지 않고 금속판의 거리를 손으로 마이크로미터를 0.5 mm씩 이동시키며 출력전압을 전압 측정기로 측정한 그래프다. 그림 7(a)와 그림 7(c)에서의 빨강, 초록, 연두, 분홍색의 선은 각 RF 검출기 뒷단에서 측정한 전압 V_3 , V_4 , V_5 , V_6 에 대응된다.

그림 7(a)에서 V_3 과 V_5 는 출력전압의 진폭이 비슷하였지만, V_4 와 V_6 는 진폭이 작게 읽힌다. 이는 각 출력단의 RF 검출기의 반응 정도가 다르기 때문이다.

그림 7(b)는 그림 7(a)의 출력전압을 식 (12)를 이용해서 위상을 계산한 그래프이다. 모든 출력전압이 15 mV~30 mV 사이로 square-law region에서 동작하므로 식 (12)를 통해 두 입력 신호의 위상 차이를 구할 수 있다. 그래프를 보면 거리에 따른 위상의 주기가 일정하게 반복되지 않는 모습을 볼 수 있다. 이는 RF 검출기의 반응 정도가 일정하지 않기 때문이다. 이것은 4개의 출력전압의 진폭이 일정하지 않게 만들고 따라서 위상 주기가 일정하지 않은 그림이 만들어지게 된다.

그림 7(b)에서 생기는 오차는 출력전압을 보상에 주어서 문제를 해결할 수 있다^{[7]~[9]}. 그림 7(c)는 그림 7(a)를

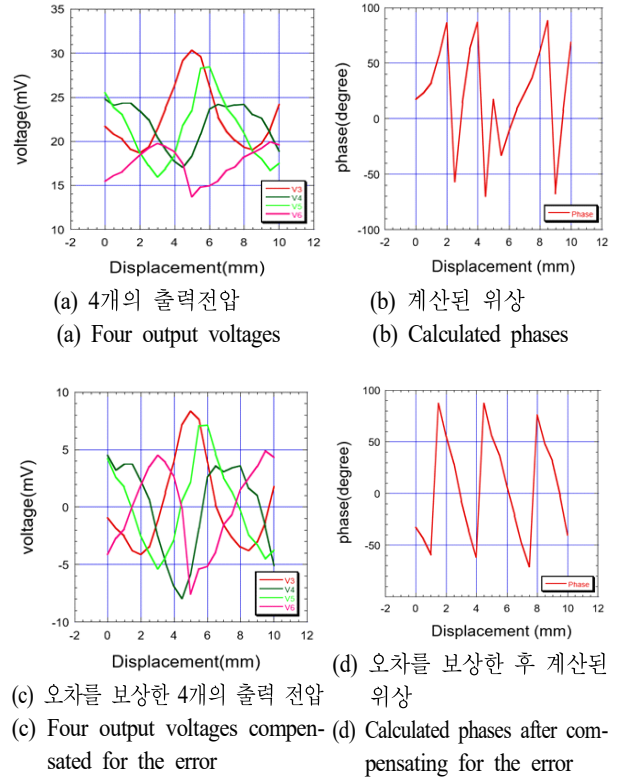


그림 7. Six-port 실험 결과
Fig. 7. Six-port experimental result.

출력전압을 보상한 결과이다. 보상 방식은 각각의 전압을 거리에 따른 그래프(그림 7(a))를 적분하여 offset 전압을 구한 후 전압의 최댓값과 최솟값의 크기가 10 mV가 되게 적당한 값을 곱해주는 방법으로 진행했다^[7].

그림 7(d)는 그림 7(c)를 식 (12)로 위상을 계산한 것이다. 주기가 3 mm로 이론값인 3.125 mm와 비교했을 때 4% 오차로 비교적 정확함을 보여준다. 거리와 위상이 적은 오차로 비례하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 8은 손으로 마이크로미터를 조절하여 구리판이 안테나로부터 0에서 -20 μm 까지 움직임을 반복한 그래프이다. 그림 8을 보면 약간의 변동이 추가되어 최댓값과 최솟값의 차이가 30 μm 이다. 이러한 약간의 변동의 모습은 아마도 RF 검출기의 매칭 회로가 완벽하지 않은 매칭 상태이거나 구리판에서 반사와 신호의 간섭으로 추정된다. 이 회로를 완벽하게 전자기 차폐한다면 이러한 변동을 없앨 수 있다고 판단된다.

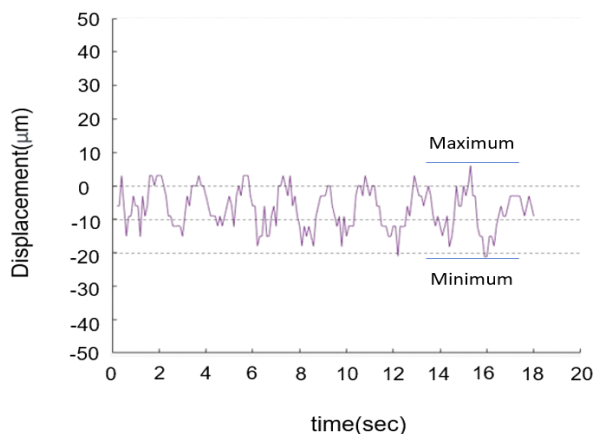


그림 8. 구리판 0에서 $-20 \mu\text{m}$ 움직였을 때 결과
Fig. 8. Results of moving the copper plate 0 to $-20 \mu\text{m}$.

V. 결 론

본 논문에서는 six-port topology를 ADS 시뮬레이션으로 설계하고, 실제로 제작하여 $20 \mu\text{m}$ 정도의 초미세 진동을 감지할 수 있음을 보였다.

ADS 시뮬레이션 결과, 위상의 이론값과 오차가 -0.31° 로 $11 \mu\text{m}$ 오차가 발생하였다(그림 4(c)). 하지만 제작한 결과, 4개의 RF 검출기의 진폭이 같지 않아 위상을 구했을 때 주기가 일정하지 않았다. 이 문제를 해결하기 위해 출력전압의 오차를 보상해 주었더니 주기가 이론값과 0.125 mm 차이가 발생했다. 이를 계산하면 4 % 오차이다.

그림 6과 같이 이득이 45인 연산 증폭기를 RF 검출기 뒷단에 추가하고, MATLAB으로 값을 보정해서 초미세 진동을 감지하는 실험을 진행했다. 실험 결과, 0에서 $-20 \mu\text{m}$ 진동을 감지할 수 있었다. 본 연구는 six port 입력단에 LNA를 부착하지 않고 실험하였다. 따라서 잡음에 묻혀서 $10 \mu\text{m}$ 보다 작은 변화는 관찰하기 어려웠다. 기존의 연구에서는 24 GHz 를 사용하여 거리 측정에서 500 nm 의 resolution을 갖고 있다^[10]. 따라서 더 높은 주파수를 사용하고 잡음 문제를 해결한다면 수 nm 수준의 거리 측정도 가능할 것이다.

References

[1] D. Deiana, E. M. Suijker, R. J. Bolt, A. P. M. Maas, W.

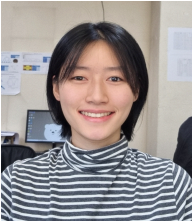
- J. Vlothuizen, and A. S. Kossen, "Real time indoor presence detection with a novel radar on a chip," in *2014 International Radar Conference*, Lille, Oct. 2014, pp. 1-4.
- [2] A. Koelpin, F. Lurz, S. Linz, S. Mann, C. Will, and S. Lindner, "Six-port based interferometry for precise radar and sensing applications," *Sensors*, vol. 16, no. 10, p. 1556, Sep. 2016.
- [3] F. M. Ghannouchi, A. Mohammadi, *The Six-Port Technique with Microwave and Wireless Applications*, Norwood, MA, Aretch House, pp. 16-18, Jan. 2009.
- [4] G. F. Engen, C. A. Hoer, "Application of an arbitrary 6-port junction to power-measurement problems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 21, no. 4, pp. 470-474, Nov. 1972.
- [5] W. J. Yang, Y. W. Kim, "Design and implementation of QPSK receiver using six-port direct conversion," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 1, pp. 15-23, Jan. 2007.
- [6] G. Vinci, S. Lindner, F. Barbon, R. Weigel, and A. Koelpin, "Promise of a better position," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 13, no. 7, pp. S41-S49, Nov. 2012.
- [7] B. Boukari, E. Moldovan, S. Affes, K. Wu, R. G. Bosisio, and S. O. Tatu, "Six-port FMCW collision avoidance radar sensor configurations," in *2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Niagara Falls, ON, May 2008, pp. 000305-000308.
- [8] S. Linz, C. Will, F. Lurz, S. Lindner, S. Mann, and R. Schober, et al., "Detector nonlinearity in six-port radar," in *2017 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks(WiSNet)*, Phoenix, AZ, Jan. 2017, pp. 19-22.
- [9] S. Linz, G. Vinci, S. Lindner, S. Mann, F. Lurz, and F. Barbon, et al., "I/Q imbalance compensation for six-port interferometers in radar applications," in *2014 44th European Microwave Conference*, Rome, Oct. 2014, pp. 746-749.
- [10] S. Lindner, F. Barbon, S. Linz, S. Mann, R. Weigel, and

A. Koelpin, "Distance measurements based on guided wave 24 GHz dual tone six-port radar," in *2014 11th*

European Radar Conference, Rome, 2014, pp. 57-60.

김 예 원 [광운대학교/학부생]

<https://orcid.org/0000-0003-1826-6950>



2019년 3월~현재: 광운대학교 전자융합
공학과 학부생
[주 관심분야] 전력 결합기, 고출력 증폭
기, RF 회로설계 등

최 진 주 [광운대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8016-7841>



1983년 8월: 서울대학교 물리교육학과
(이학사)
1985년 8월: 미국 Georgia State University
물리학과 (이학석사)
1991년 8월: 미국 University of Michigan
핵공학과 (공학박사)
1991년 5월~1997년 8월: 미국 해군연구

소 (NRL) 연구원

1997년 9월~현재: 광운대학교 전자융합공학과 교수

[주 관심분야] RF 회로 설계, 고출력 증폭기, Vacuum Tube
Amplifier 등

방 인 우 [광운대학교/학부생]

<https://orcid.org/0000-0003-4932-4447>



2016년 3월~현재: 광운대학교 전자융합
공학과 학부생
[주 관심분야] 전력 결합기, 고출력 증폭
기, RF 회로설계 등