산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제29권 B호, 2009.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 29 B, 2009.

비접촉식 유속계를 위한 10.5 GHz 대역 도플러 레이더에 대한 연구

A study of 10.5 GHz band Doppler radar for non-contact type hydrometer

김 진 수* 황 희 용**
Kim, Jin-Su Hwang, Hee-Yong

Abstract

A Doppler radar is a radar using the doppler effect of the returned echoes from targets to measure their radial velocity. To be more specific the microwave signal sent by the radar antenna's directional beam is reflected toward the radar and compared in frequency, up or down from the original signal, allowing for the direct and highly accurate measurement of target velocity component in the direction of the beam. In this paper, we designed the doppler radar composed of 10.5 GHz band DROs(Dielectric Resonator Oscillator), 90° branch line coupler, single balanced mixer and 4×4 array antenna of high gain, high directivity, for non-contact type hydrometer. Fabricated Doppler radar can detect slow moving objects.

키워드 : *유속계, 도플러 레이더, 배열 안테나*
Keywords : *hydrometer, Doppler radar, array antenna*

1. 서론

홍수 예방, 수자원 관리 등을 위하여 하천의 유속을 측정하기 위한 방법은 다양하게 시도되어 왔으며 그 중에서 프로펠러식, 부자식, 초음파식 유속계가 가장 많이 사용된다.

프로펠러식 유속계는 물의 흐름이 거센 홍수 시에는 물의 저항력이 강하여 사용이 불가능하고, 부자식 유속계는 측정인원이 다수 필요한 반면 측정결과가 부정확하며 측정 시 사람이 물에 근접해야 하는 위험성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 비접촉식 유속계의 필요성이 대두되었고 [1][2] 그 결과 초음파식 유속계가 개발되었다. 초음파식 유속계는 비접촉식이기 때문에 홍수 시에 물에 직접 접촉함으로써 발생할 수 있는 기기 손상과 사람이 물에 근접해야 하는 위험성을 해결하였다. 하지만 온도, 습도 등 기후 변화에 민감한 초음파의 특성으로 인해 정확도가 떨어진다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 비접촉식 유속계인 마이크로웨이브 유속계를 위한 도플러 레이더를 설계하였다.

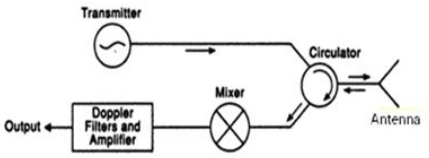
도플러 레이더는 그림 1의 유속 계측 시스템 구성도에서 보이듯이 교량 위에 설치되어 하천의 유속을 측정하기 때문에 교량의 높이, 하천의 폭 등을 고려하여 이 시스템에 적합한 특성을 보이도록 DROs(Dielectric Resonator Oscillator)와 고이득 고지향성 안테나로 구성하였다.

* 강원대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정
** 강원대학교 전기전자공학과 부교수, 공학박사, 교신저자

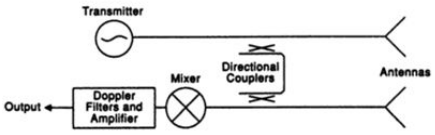
그림 1. 유속 계측 시스템 구성도

2. 본론

2.1 도플러 레이더 이론



(a) single antenna type



(b) double antenna type

그림 2. 도플러 레이더 블록도[3]

$$f_d = \frac{2vf_o}{c} \quad (1)$$

도플러 효과란 전파, 광, 음의 발생점과 이것을 관측하는 관측점의 어느 한 지점 또는 양쪽 지점이 이동함에 따라 전파 거리가 변화될 경우, 측정되는 주파수가 변화하는 현상을 말한다. 발생점과 관측점이 가까워질 때는 주파수가 높아지고, 멀어질 때는 주파수가 낮아진다.

도플러 레이더는 이러한 도플러 효과를 이용한 레이더로써 송신한 전자파가 반사되는 것을 측정하는 레이다 시스템에서, 그 반사체가 이동하고 있는 경우 그 이동 방향과 속도에 따라 수신되는 주파수는 송신주파수에 비해 약간 shift되게 된다. 도플러 주파수(f_d)는 움직이고 있는 물체로 인해 송신 주파수로부터 shift된 주파수를 의미하며, 식 (1)로 표현이 된다. v는 물체의 속도이고 f_0는 LO(Local Oscillator)의 송신 주파수, c는 광속이다.

그림 2(a)는 하나의 안테나를 이용한 도플러 레이더의 블록도이다. LO에서 발생된 신호는 안테나를 통해 전송이 되고 물체의 움직임에 따라 f_d만큼 shift되어 수신된다. 수신된 신호는 mixer를 거쳐 shift된 f_d의 주파수를 갖는 IF 신호가 출력이 된다. 그림 2(b)는 송신과 수신을 각기 다른 안테나를 사용한다.

2.2 송 · 수신부 설계

설계한 도플러 레이더는 그림 2(b)와 같은 double antenna type을 이용하였으며 그에 따라 신호 발생을 위한 LO, 신호의 혼합을 위한 coupler, mixer를 각각 설계하였다.

사용된 기판은 유전율 4.4, 기판 두께 0.762 mm, tanδ 0.025인 FR 4이며 NEC 社의 NE3512s02 모델명의 TR과 Q 값이 4500, 유전율 45.6, f_0는 10.525(±0.05) GHz인 DR(Dielectric Resonator)을 사용하였고, Agilent 社의 회로 silmulator인 ADS를 이용하여 그림 3과 같이 설계하였다.

각각의 설계 목표치는 다음과 같다. LO는 10.52 GHz를 이용하여 1~3 dBm의 출력 파워를 갖도록 했으며 유속이 평상시 느린 점을 감안하여 높은 주파수 sensitivity를 위해 phase noise는 -90 dBc/Hz @ 10 kHz가 되도록 하였다. coupler는 3 dB 전력 분배 특성을 갖도록 90° branch line coupler를 설계하였고, mixer는 90° hybrid junction을 이용하여 L_C(Conversion loss)가 10 dB 이내인 balanced mixer를 설계하였다[4].

그림 4는 simulation을 했을 때의 결과이다. 그림 4(a)는 LO 출력 파워이다. 목표치 10.52 GHz, 1~3 dBm과 비교했을 때 출력 파워가 8.5 dBm으로 목표치보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 실제 제작했을 때 제작된 기판이 고주파수에서 손실이 크기 때문에 출력 파워가 줄어드는 것을 감안하여 출력 파워를 크게 했기 때문이다.

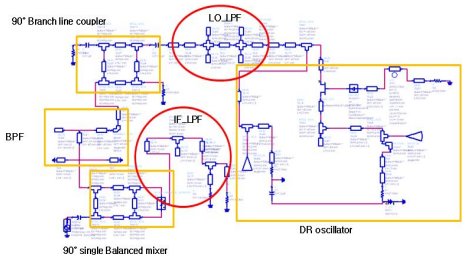
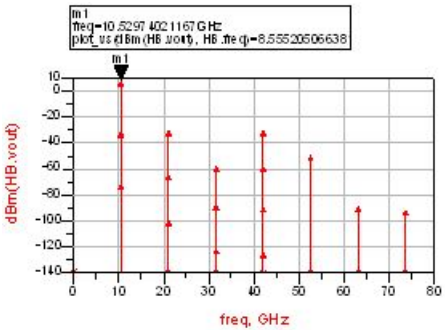


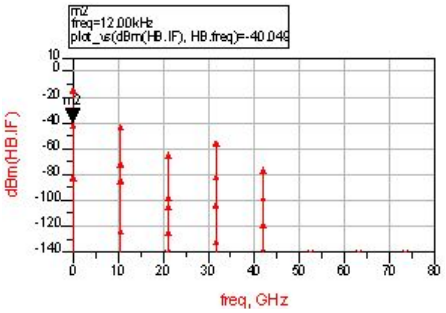
그림 3. 송 · 수신부 schematic

표 1. 안테나 배열 상태에 따른 빔 폭

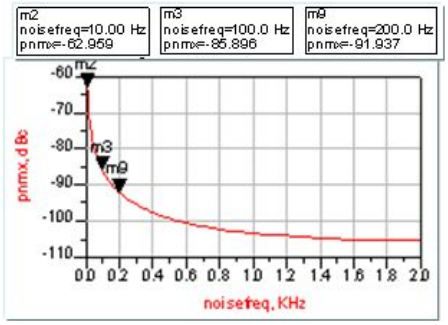
	E-plane						H-plane					
배열상태 (m×n)	단일	1×2	1×4	2×1	4×1	2×2	단일	1×2	1×4	2×1	4×1	2×2
HP(°)	74	28	14	72	72	28	61	58	56	29	16	34



(a) LO 출력 파워



(b) IF 출력 파워



(c) Phase noise

그림 4. 송 · 수신부 simulation 결과

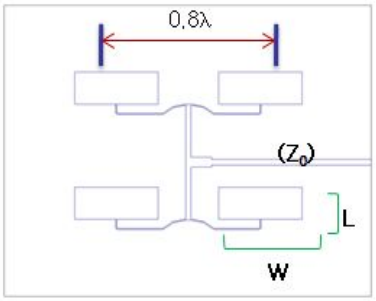
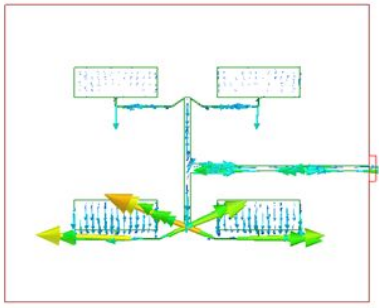
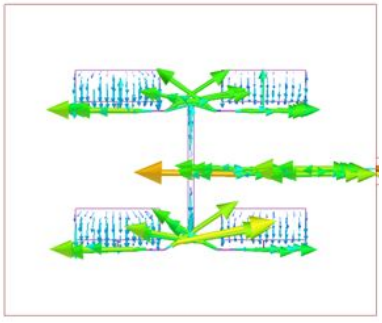


그림 5. 배열 안테나 schematic



(a) 각진 급전선로



(b) 완만한 급전선로

그림 6. 급전선로 형태에 따른 전류

그림 4(b)는 IF 출력 파워이다. 수신 파워를 -30 dBm이라고 가정했을 때의 시뮬레이션 결과이므로 IF 출력 파워가 약 -40 dBm이므로 conversion loss는 식 (2)를 이용하면 약 10 dB이다. 그림 4(c)는 phase noise 특성이다.

$$L_C = 10\log\frac{available\ RF\ input\ power}{available\ IF\ output\ power} \geq 0dB \qquad (2)$$

2.3 고이득 고지향성 안테나 설계

안테나를 고이득 고지향성으로 설계해야 하는 이유는 송신파워를 높이기 위해 고출력 TR이나 추가적 앰프를 사용하는 것보다 비용적 효율이 좋고 앰프 사용으로 인해 발생하는 노이즈 및 harmonic의 증폭을 걸러내는 필터의 사용을 방지할 수 있고 수신 안테나의 이득이 높을수록 측정거리가 증가하기 때문이다. 또한 유속계를 설치하는 조건이 교량 높이가 30 m이고 강폭이 8 m이기 때문에 안테나의 빔 폭이 15° 이기 때문에 고이득 고지향성의 배열 안테나를 설계하였다.

안테나에 사용된 기판은 유전율 3.38, tanδ 0.0042, 두께 0.762 기판을 사용하였고 중심 주파수 10.52 GHz, 빔 폭 15° , 안테나 이득은 주파수 법규에 의거하여 허용복사 전력에 맞도록 17 dBi로 설계하였고, EM simulator인 HFSS를 통해 최적화 하였다.

$$W = \frac{c}{2f}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \qquad (3)$$
$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon_{eff}}} - 2\Delta L$$

$$\varepsilon_{ff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left[1 + 12\frac{h}{W}\right]^{-\frac{1}{2}} \qquad (4)$$
$$\Delta L = 0.412\frac{(\varepsilon_{ff} + 0.3)(\frac{h}{W} + 0.264)}{(\varepsilon_{ff} - 0.258)(\frac{h}{W} + 0.8)}h$$

안테나 단일 패치의 폭과 길이는 식 (3)과 (4)를 이용하여 구하였고 패치 사이의 간격은 방사패턴의 합성을 위하여 공기 중의 0.8λ의 거리를 두었다 [5].

그림 6은 급전선로의 형태가 다른 2×2 배열안테나이다. 그림에서 보이듯이 급전선이 각이 졌을 때는 전류가 모든 패치에 균일하게 급전이 되지 않기 때문에 급전선로를 최대한 완만하게 함으로써 균일하게 급전이 되도록 하였다.

표 1은 안테나 배열 상태에 따른 안테나 빔 폭이다. E-plane은 1×4일 때 빔 폭이 14° 이고 H-plane은 4×1일 때 빔 폭이 16° 이다. 따라서 4×4 배열 안테나를 만들어 E-plane과 H-plane 모두 빔 폭이 15° 가 되도록 하였다.

2.4 제작 및 측정

그림 7(a)은 실제 제작된 송·수신부의 모습이고, (b)는 측정된 LO 출력 파워이다. 중심 주파수가 설계치보다 약 40 MHz 차이가 나고 출력 파워도 차이가 난다. 중심 주파수의 차이는 제작 상의 오차로서 튜닝을 통해 보정이 필요하고 출력 파워의 차이는 고주파수에서 기판 손실이 큰 것과 그로 인한 coupler의 3 dB 전력 분배 특성이 약 6 dB로 안좋아진 것 때문이다. 이것은 (d)를 통해 알 수 있다. (c)는 측정된 phase noise 특성으로 제작된 도플러 레이더의 phase noise는 -56.5 dBc/Hz @ 10 kHz 이다.

그림 8(a)는 실제로 제작된 4×4 배열 안테나이다. (b)는 안테나의 E-plane과 H-plane 방사패턴의 측정치이다. 중심 주파수 10.525 GHz 일 때 안테나 이득은 약 17.9 dBi이고 안테나 빔 폭은 약 15° 이고 설계치를 만족한다.

그림 9는 완성된 도플러 레이더를 이용하여 측정한 결과이다. 물체의 움직임이 없을 때 (a)는 shift된 주파수가 없기 때문에 IF는 DC이고, 물체의 움직임이 있을 때 (b)는 주파수 성분이 나타난다. 움직임이 있는 물체에 대하여 제작된 도플러 레이더는 최대 0.3m/s의 저속으로 움직이는 물체에 대해서도 측정이 가능하였다.

3. 결론

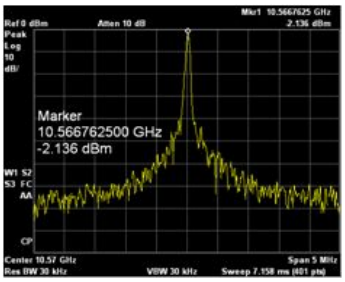
본 논문은 기존 유속계의 위험성과 부정확성, 기기 파손 등의 문제점을 해결할 수 있는 마이크로웨이브를 이용한 유속 계측기를 위한 도플러 레이더를 설계 제작하였다.

측정 시스템에 맞는 스펙의 송·수신부를 설계하였고 제작하여 측정한 결과 기판의 손실과 제작상의 오차로 인해 설계치와 측정치가 중심 주파수는 약 40 MHz, 출력 파워는 약 10 dB 차이가 났다. 또한 17 dBi의 이득과 15° 빔 폭을 갖는 4×4 배열 안테나를 설계하였고 측정한 결과 안테나의 이득은 약 17.9 dBi, 빔 폭은 15° 로써 설계치를 만족하였다.

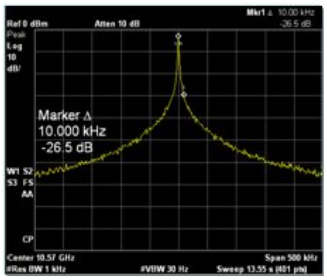
제작된 도플러 레이더는 물체의 움직임이 없을 때는 주파수 성분이 없는 DC가 IF로 출력이 되었고 최대 0.3m/s의 저속으로 움직이는 물체에 대해서도 측정이 가능하였다.

본 논문의 연구를 통해 향후 송·수신부의 성능 개선에 대한 연구의 진행이 기대된다.

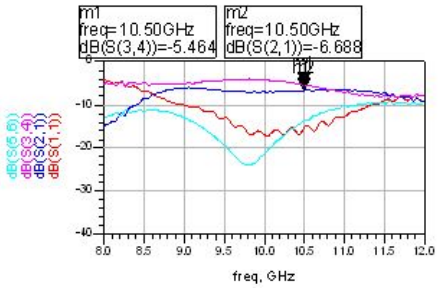
(a) 제작된 송 · 수신부



(b) 측정된 LO 출력 파워

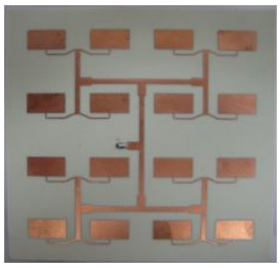


(c) 측정된 phase noise

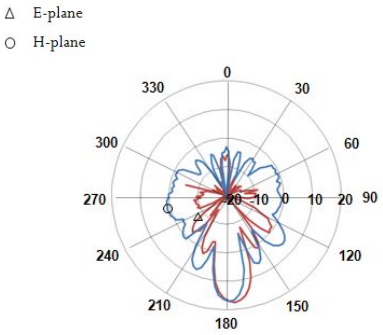


(d) 측정된 branch line coupler

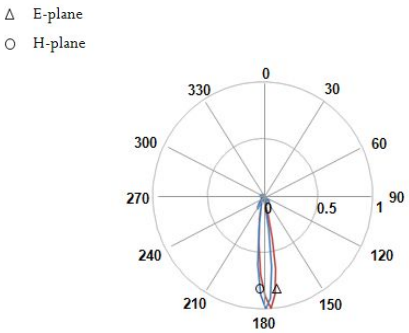
그림 7. 제작된 송 · 수신부



(a) 제작된 4×4 배열 안테나

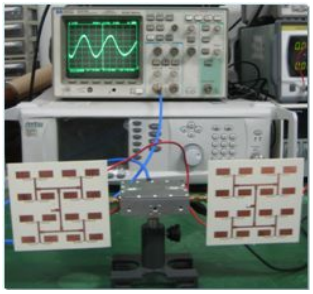


(b) 측정된 방사패턴

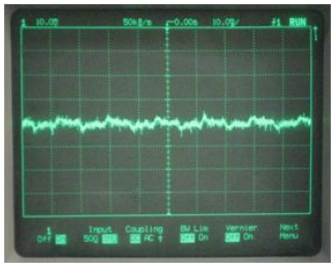


(b) 선형화 후 정규화된 방사패턴

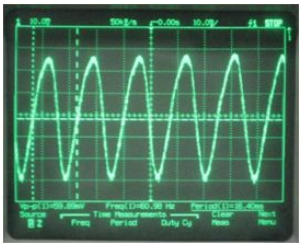
그림 8. 제작된 안테나



(a) 완성된 도플러 레이더



(b) 물체의 움직임이 없을 때 IF 출력 파형



(c) 물체의 움직임이 있을 때 IF 출력 파형

그림 9. IF 출력 파형 측정

감사의 글

본 논문은 2008년도 산학연 공동 기술 개발 사업의 지원으로 연구되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Plant, W.J, Keller, W.C and Hayes, K "Measurement of River Surface Currents With Coherent Microwave Systems", *IEEE Trans. Geoscience and Remote sensing.*, vol. 43, no. 6, June. 2005.

[2] Teague, C.C, Barrick, D.E, Lilleboe, P.M, "UHF riversonde observations of cowlitz river flow velocity at Castle Rock, Washington", *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International,* vol. 2, no. 6, Sept. 2004.

[3] Richard C. Dorf, *The electrical engineering handbook,* Second Edition, CRC Press.

[4] David M. Pozar, *Microwave Engineering, third edition,* John wiley & Sons, 2005.

[5] Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Second Edition, wiley.