

256 능동위상배열 기반 연직바람 관측장비의 송수신 채널 크기 및 위상 보정 방법 연구

Study on TRX Channel Amplitude and Phase Calibration Method for a Radar Wind Profiler Based on 256 Active Phased Array

정 우 재* · 이 종 철**

* 주저자 : 광운대학교 전자융합공학과 박사과정

** 교신저자 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

Woo-Jae Jung* · Jong-Chul Lee*

* Dept. of Electronic Convergence Engineering, Kwangwoon University

† Corresponding author : Jong-Chul Lee, jcllee@kw.ac.kr

Vol. 21 No.5(2022)
October, 2022
pp.162~170

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.5.162>

Received 27 September 2022
Revised 1 October 2022
Accepted 5 October 2022

© 2022. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

본 논문에서는 256 능동위상배열 기반의 연직바람 관측장비(RWP)의 송수신 채널의 크기 및 위상을 보정하는 방법등이 논의된다. 별도의 모듈 추가 없이 송수신 전단기 및 송수신 전환기에 커플러 및 스위치를 사용하여 송신 및 수신 보정 경로를 확보하였고, Gain 및 Phase Detector를 사용하여 256 송수신 채널의 크기 및 위상을 독립적으로 보정하였다. 보정된 256 능동위상배열 안테나는 근접전계 시험을 통해 5개의 빔 (연직, 동, 서, 남, 북)의 빔폭 및 사이드 로브가 시뮬레이션 계산 값과 일치함을 확인하였다. 제안된 보정방법은 실외 환경에서 운용되는 능동위상배열 기반의 시스템에 용이하게 적용이 가능하다.

핵심어 : 능동위상배열, 연직바람 관측장비, 송수신채널, 크기 및 위상, 보정

ABSTRACT

In this paper, the phased-array transceiver (TRX) channel amplitude and phase calibration method for a radar wind profiler (RWP) based on the 256 active phased array is discussed. Without the additional module, the TX and RX calibration paths were secured using couplers and switches in the TRX front ends and the TRX switching duplexers, and the amplitude and phase of the 256 TRX were calibrated using a gain and phase detector. The beam widths and side lobes of five beams (vertical, east, west, south, and north) of the calibrated 256 active phased array antenna were confirmed by a near-field which agreed well with the simulation results. The proposed calibration method can be easily applied to a system based on an active phased array operated in an outdoor environment.

Key words : Active phased array, Radar wind profiler, TRX channel, Amplitude and phase, Calibration

I. 서론

연직바람 관측장비 (RWP, Radar Wind Profiler)는 고출력 RF 신호를 송출하고 고층에서 바람 및 강우에 의해 반사되는 전파신호를 수신하여, 수신된 신호의 분석을 통해 대기 경계층 고도, 운동량 속도, 강수 구조 등 동적 대기 현상 정보를 파악하기 위해 사용되는 장비이다.

반사되는 신호는 대기 굴절지수 (Refractive Index of the Atmosphere)의 불규칙 변동 및 대기 중에 존재하는 액체상태의 비, 얼음, 우박 또는 얼음 상태의 대기수상체 (Hydrometeors)에 의해 발생된다.

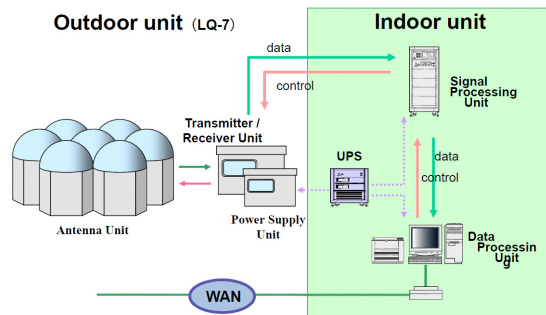
연직바람 관측장비는 총 5개의 빔으로 신호를 송출하고 반사된 신호를 수신하여 VZ(연직방향 시선속도), VE(동쪽방향 시선속도), VW(서쪽방향 시선속도), VS(남쪽방향 시선속도), VN(북쪽방향 시선속도)를 측정하고 이를 통해 고도별 동서성분(u), 남북성분(v), 연직성분(w) 바람을 계산하여 고층에서의 기상상태를 분석할 수 있다. (Heo, 2004)

반사판 안테나 또는 수동배열 안테나를 사용하여 5개의 빔을 형성했던 과거와 달리 최근에는 빔 스위칭 속도에 장점이 많은 위상배열 안테나가 주로 이용되고 있다. (Srinivasulu et al., 2012)

이 방식은 5개의 빔을 이용하는 특정한 규칙을 갖고 있으므로, <Fig. 1>에 도시한 완전 능동위상배열 안테나가 아닌 송수신 구조가 비교적 간단한 Semi-능동위상배열 안테나를 적용한 방식 (Hashiguchi et al., 2004) 및 <Fig. 2>에 도시한 능동위상배열 급전에 렌즈를 이용하여 모듈화된 안테나를 적용한 방식에 (Imai et al., 2007) 관한 연구가 진행되어왔다.



<Fig. 1> Semi-Active Array Antenna



<Fig. 2> Configuration of a RWP (Sumitomo Ltd.)

이에 반해 완전 능동위상배열 기반의 연직바람 관측장비는 낮은 출력의 반도체 증폭기를 사용하여 고장률이 낮고, 다수의 증폭기가 송신 출력을 분담하므로 일부 증폭 모듈이 고장이 나더라도 전체 성능이 크게 변하지 않으므로 장비의 가용성이 매우 우수하다.

그러나 이러한 능동위상배열 기반의 시스템은 각각의 안테나 복사소자에 여기되는 신호의 크기와 위상이 일정하게 제어되어야 전자적으로 빔 조향이 가능하다. 만약 안테나 복사소자에 여기되는 송수신 채널상의 위상과 크기가 보정되지 않으면 원하는 방향으로의 빔 조향이 이루어지지 않는다. 송수신 채널상에 크기 및 위상을 보정하기 위한 가장 좋은 방법은 전자파 무반사실에서 각각의 채널별 특성을 측정하여 보정하는 것이지만 연직바람 관측장비처럼 실외에서 운용되고 장비의 크기가 매우 크면 운용 중에 발생하는 송수신 채널

널상의 크기 및 위상의 부정합을 보정하기 위한 추가적인 장치가 필요하다. (Cho et al., 2016; Lee et al., 2015)

본 논문에서는 256 능동 위상배열 기반의 연직바람 관측장비에서 요구되는 5개의 빔 (연직빔, 방위각 및 고각 방향으로 +15° 또는 -15° 조향된 동/서/남/북 빔)의 정확한 빔 형성을 위한 송수신 채널의 크기 및 위상 보정 방법을 제시하고자 한다.

II. 송수신 채널 보정 방법

1. 256 능동위상배열 기반의 연직바람 관측장비

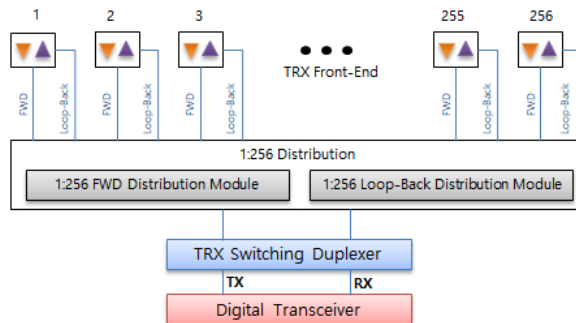
256배열 능동위상배열 기반의 연직바람 관측장비는 L-Band (중심주파수 : 1.29GHz)에서 방위각 및 고각 방향으로 최대 +/-20°의 빔 조향각이 요구된다. 따라서 안테나 사이의 거리는 식 (1)에 의해서 그레이팅 로브가 발생되지 않는 163mm로 설정하였다. 또한 빔 조향을 위해 안테나 방사 소자 사이의 위상차는 식 (2)에 의해 계산되어 질 수 있다. 정확한 빔 조향을 위해 송신 및 수신 경로상의 위상차는 조향각에 따라 일정하게 유지되어야 한다.

$$D \leq \frac{\lambda_h}{1 + \sin\theta_m} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta\phi = \frac{360^\circ \cdot D \cdot \sin\theta_m}{\lambda} \dots\dots\dots (2)$$

D : 배열간격, λ_h : 최대주파수, θ_m : 최대 빔 조향각

<Fig. 3>은 256 능동위상배열 기반의 연직바람 관측장비의 송수신 채널 보상을 위한 시스템 구성을 도시하였다. 제안된 시스템은 256개의 송수신전단기(TRX Front-End), FWD 분배모듈과 Loop-Back 분배모듈을 포함하는 1:256 분배기(1:256 Distribution), 송수신전환기(TRX Switching Duplexer), 디지털 송수신기(Digital Transceiver)로 구성된다.



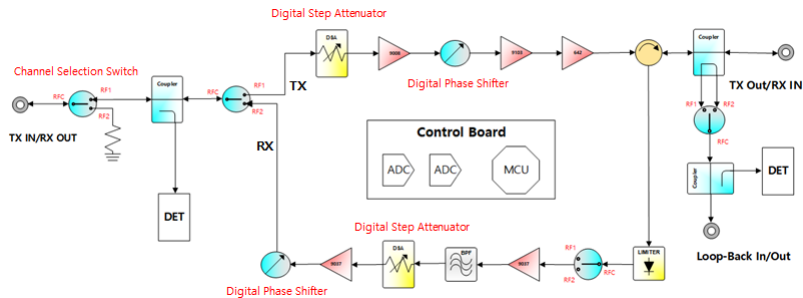
<Fig. 3> Configuration of a Radar Wind Profiler

2. 송수신 채널의 이득 및 위상 보정

1) 송수신전단기

송수신전단기는 입력된 송신신호를 수십 W로 증폭하여 안테나를 통해 신호를 방사하고 안테나를 통해 수신된 신호를 저잡음 증폭하여 하위단으로 출력한다. 256 능동위상배열을 위해 256개의 안테나 소자에 각각 연결되므로 256개의 송수신전단기가 필요하다. 따라서 256개의 송수신 채널이 형성되고 각각의 송수신전단기에는 크기 및 위상을 조절하기 위해 송신경로 및 수신경로에 Digital Step Attenuator(DSA)와 Digital Phase Shifter(DPS) 회로를 설계하였다. 그림 4는 설계된 송수신전단기의 블록도를 도시하였다.

DSA는 0.5dB 단위로 31.5dB의 범위에서 크기 조절이 가능한 MACOM社 제품을 사용하였고, DPS는 1.4도 단위로 360도 범위에서 위상 조절이 가능하고 낮은 RMS 크기 및 위상 오차 (RMS 크기 오차 = 0.1dB, RMS 위상 오차 = 1도)를 갖는 Peregrine社 제품을 사용하여 설계하였다. 또한 채널 선택 스위치는 보정을 수행하는 채널만 선택하여 채널 간의 격리도를 확보하도록 설계하였다. 송수신 채널의 DSA와 DPS는 송수신전환기에서 검출된 비교값을 기준으로 송수신전단기 내부의 MCU를 통해 조절된다.



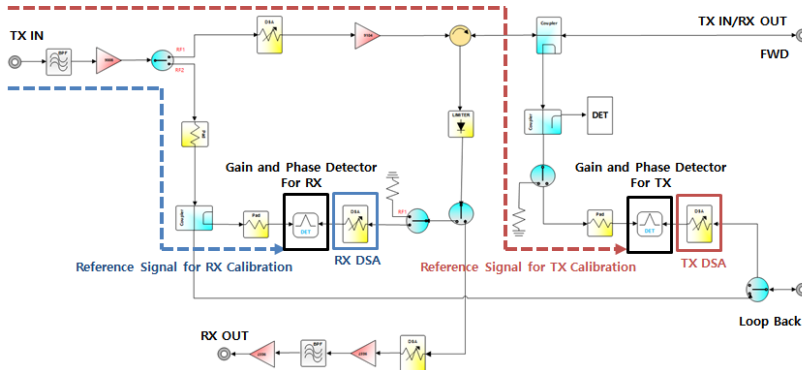
<Fig. 4> Block Diagram for a TRX Front-End

2) 1:256 분배기

1:256 분배기는 송수신 채널의 위상 및 크기를 보정하기 위한 경로를 제공하고 1:256 순방향 분배기와 1:256 Loop-Back 분배기로 구성된다. 각각의 1:256 분배기는 1:2 분배기, 1:4 분배기, 1:8 분배기의 조합으로 256개의 송수신 경로를 확보하였고 송수신 채널의 위상 및 크기를 보정할 때 확보된 256개의 송수신 경로의 위상 및 크기를 포함하여 보정하므로 케이블을 포함한 1:256 분배기의 크기 및 위상은 오차범위 내에서 동일한 성능을 갖도록 설계하였다.

3) 송수신전환기

송수신전환기는 256개의 송수신전단기에 충분한 입력신호를 제공하고, 수신된 신호는 디지털 송수신기의 ADC(Analog Digital Converter)의 입력 범위를 충족시킬 수 있도록 증폭한다. 더불어 송수신 기준신호와 각각의 송수신 채널 경로로 입력되는 신호의 크기 및 위상을 비교하기 위한 경로를 포함하고 있다. 이 경로는 커플러와 스위치를 이용하여 설계하였고 송수신 채널의 크기 및 위상을 독립적으로 비교하도록 설계하였다. <Fig. 5>는 송수신전환기의 블록도를 도시하였다.

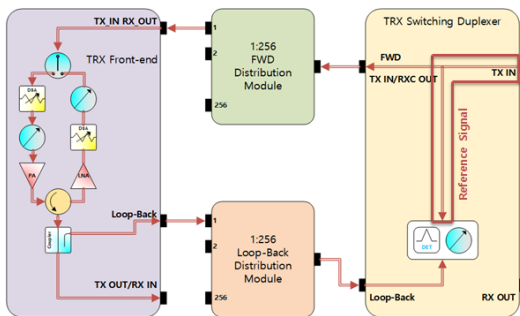


<Fig. 5> Block Diagram of a TRX Switching Duplexer

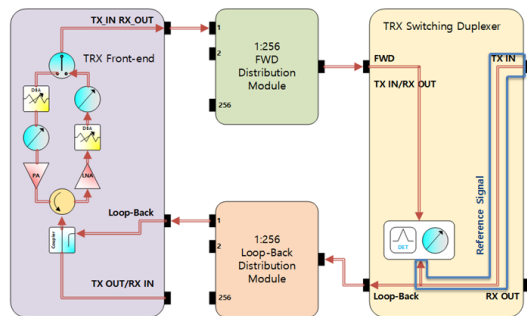
<Fig. 5>에 도시하였듯이 256개 각각의 송신 채널 크기 및 위상은 송신 보정을 위한 기준신호 (Reference Signal for TX Calibration)의 크기 및 위상과 동일하게 보정된다. TX DSA의 Attenuation 값을 조절하여 송수신 전단기의 이득 및 송신출력을 설정할 수 있고 설정된 값을 기준으로 보정되므로 장비의 운용에 필요한 송신 출력에 따른 다양한 보정 테이블을 얻을 수 있다. 이와 마찬가지로 256개 각각의 수신 채널 크기 및 위상은 수신 보정을 위한 기준신호 (Reference Signal for RX Calibration)의 위상 및 크기와 동일하게 보정되고, 송수신 전단기의 수신 이득은 RX DSA를 조정하여 설정된다. 송수신 기준신호와 각각의 채널 경로를 통해 입력되는 신호의 크기 및 위상 비교값을 검출하기 위해 Analog Device社의 Gain and Phase Detector(AD8302)를 사용하여 회로를 설계하였다. AD8302는 이득 측정값의 비선형성(Nonlinearity)은 0.5dB 이하의 이득 측정값 Nonlinearity를 갖고, 1도 이하의 위상 측정값 Nonlinearity 특성을 갖게 되므로 매우 정확하게 두 신호의 위상 및 신호의 차이를 검출한다. 최적의 비교값을 검출하기 위해 기준신호는 -30dBm/CW를 만족하도록 회로를 설계하였다.

4) 송수신 채널 보정 경로 및 방법

<Fig. 6>과 <Fig. 7>은 송신 채널의 보정 경로와 수신 채널의 보정 경로를 각각 도시하였다. 이 경로를 통하여 256개의 송수신 채널의 크기 및 위상을 별도로 추가되는 모듈없이 실외 환경에서 장비의 운용 중에 보정할 수 있다. 또한 256개의 송수신 채널의 크기와 위상이 기준 신호와 같으므로 장비 운용 시 일부 모듈의 고장으로 인해 교체 시 교체된 모듈만 선택적으로 보정하고 바로 운용할 수 있는 장점을 가진다.



<Fig. 6> TX Channel Calibration Path

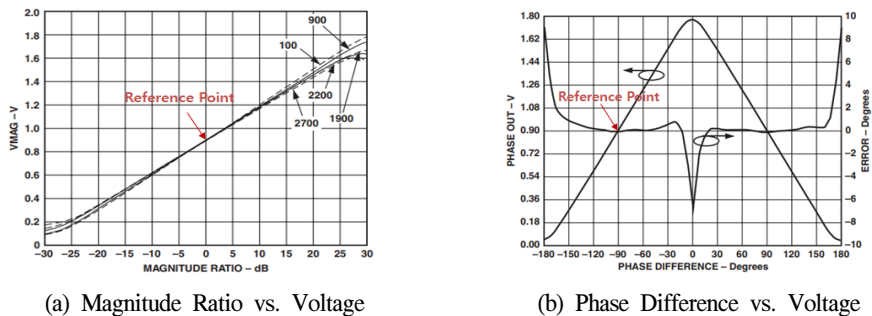


<Fig. 7> RX Channel Calibration Path

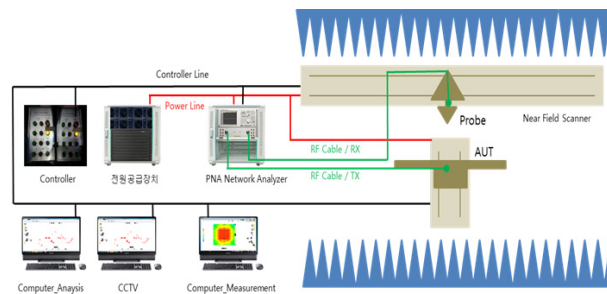
<Fig. 8(a)>는 AD8302에 입력된 두 신호의 크기의 차이에 따라 검출되는 전압값에 대한 그래프를 도시하였다. 기울기 스케일은 약 30mV/dB 이다. <Fig. 8(b)>는 AD8302에 입력된 두 신호의 위상의 차이에 따라 검출되는 전압값에 대한 그래프를 도시하였다. 0도 부근을 제외한 선형 구간에서의 기울기 스케일은 약 10mV/도 이다. 이를 바탕으로 송수신 채널의 크기 보정을 위해서 기준 전압은 약 0.9V, 오차 범위는 +/- 30mV 이하로 설정하였고 위상 보정을 위한 기준 전압은 약 0.9V, 오차 범위는 +/- 30mV 이하로 설정하였다. 위상 보정의 경우 두 신호의 위상차가 0도인 부분은 비선형 구간이고, 위상에 대한 어려움이 크므로 선형구간이면서 어려움이 낮은 90도 부근을 설정하였다. 송수신 기준신호와 <Fig. 6>, <Fig. 7>에 도시된 송수신 채널 보정 경로를 통해 입력된 신호는 설정된 기준 전압의 오차 범위 내로 수렴할 때까지 송수신 전단기의 DSA와 DPS는 MCU에 설계된 알고리즘을 통해 조절된다. 또한 256개의 송수신 채널의 보정은 연직바람 관측장비 시스템에 구현된 Auto Calibration 기능을 통해 자동으로 수행된다.

Ⅲ. 시스템 통합 및 측정

연직바람 관측장비의 시스템 통합 후 송수신 채널의 보정을 거친 256 능동위상배열 안테나는 <Fig. 9>와 같이 근접전계측정 방식을 통해 방사패턴 시험을 진행하였다.



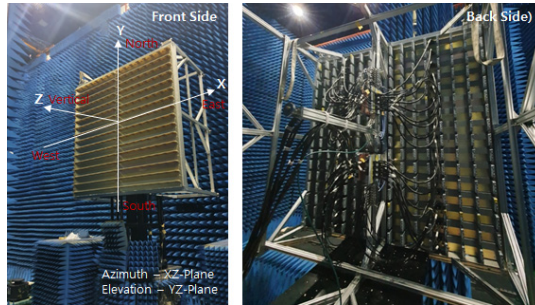
<Fig. 8> AD8302 Performance Characteristics



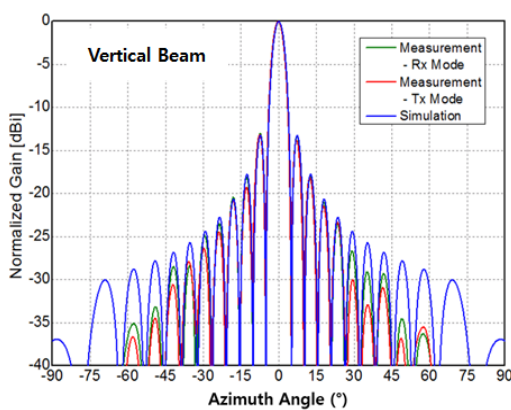
<Fig. 9> Near-Field Measurement

<Fig. 10>은 256 능동위상배열 안테나의 근접전계 측정 사진 및 좌표계를 도시하였고, <Fig. 11>은 근접전계 측정방식에 의한 256 능동위상배열 안테나의 측정결과를 나타내었다. 안테나의 E면과 H면은 방위각과 고

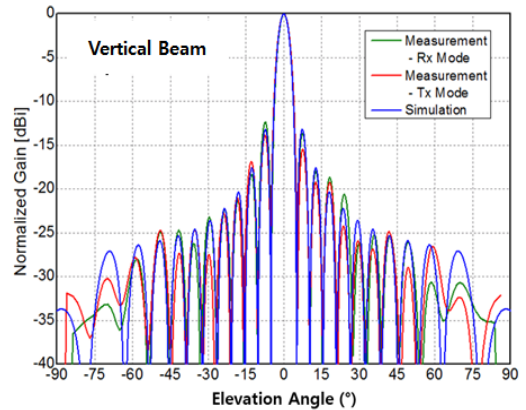
각 방향에 기계적, 전기적 Alignment 하여 고정하였다. 측정결과 연직방향 뿐 아니라 방위각 및 고각 방향으로 +/-15도 빔 조향시에도 안테나의 빔폭 및 사이드로브는 시뮬레이션 결과와 유사하다. 단, 1st Side lobe의 비대칭 발생 및 광각(wide angle)에서 시뮬레이션과의 오차가 발생하였다. 이는 근접전계 측정 장비의 프로브 안테나의 스캔 면적이 제한되고 안테나 전체크기 (약 3m×3m)로 인한 정렬 오차의 영향으로 고려된다. 256 능동위상배열 안테나의 측정결과는 <Table 1>과 같다.



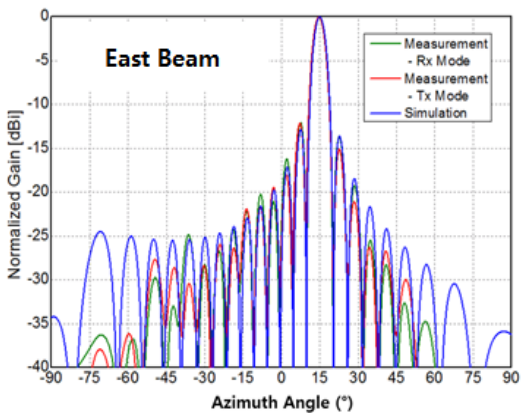
<Fig. 10> Picture of Near Field Measurement



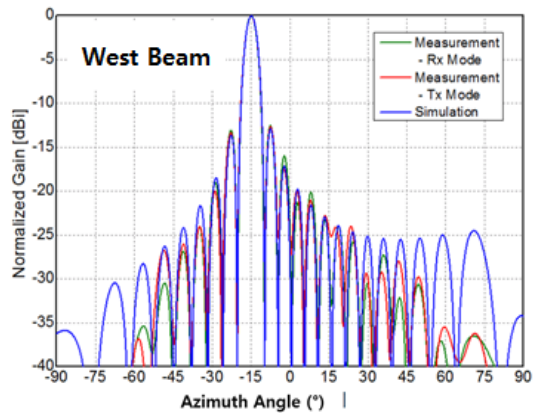
(a) Vertical Beam (AZ)



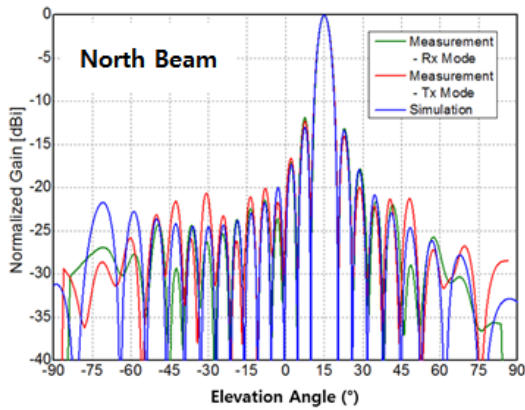
(b) Vertical Beam (EL)



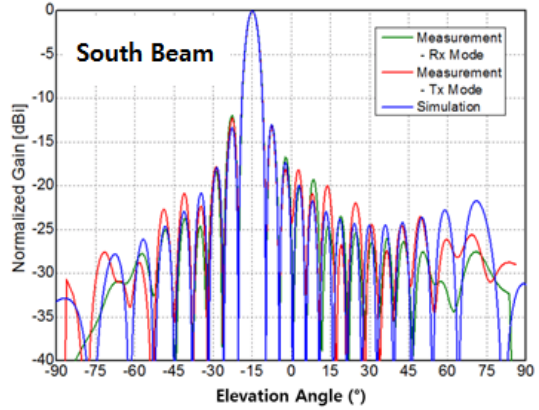
(c) Azimuth Direction Beam Tilt (+15°)



(d) Azimuth Direction Beam Tilt (-15°)



(e) Elevation Direction Beam Tilt (+15°)



(f) Elevation Direction Beam Tilt (-15°)

<Fig. 11> Radiation Pattern Measurements

<Table 1> Results of Radiation Pattern Measurements

Item			Measured		Calculated	
			HPBW(°)	1 st S/L (dBc)	HPBW(°)	1 st S/L (dBc)
RX	Vertical	Azimuth	4.51	-13.0	4.5	-13.2
		Elevation	4.54	-12.3	4.5	-13.2
	East (Azimuth +15°)		4.67	-12.1	4.7	-12.9
	West (Azimuth -15°)		4.67	-12.5	4.7	-12.9
	North (Elevation +15°)		4.72	-12.0	4.7	-13.0
	South (Elevation -15°)		4.74	-11.9	4.7	-13.0
TX	Vertical	Azimuth	4.52	-13.1	4.5	-13.2
		Elevation	4.57	-13.9	4.5	-13.2
	East (Azimuth +15°)		4.74	-12.1	4.7	-12.9
	West (Azimuth -15°)		4.7	-12.6	4.7	-12.9
	North (Elevation +15°)		4.7	-12.3	4.7	-13.0
	South (Elevation -15°)		4.77	-12.3	4.7	-13.0

IV. 결 론

본 논문에서는 256 능동위상배열 기반의 연직바람 관측장비의 송수신 채널 크기 및 위상 보정 방법에 대해 기술하였다. 보정 경로를 확보하기 위해 송수신전단기, 송수신전환기, Forward 분배모듈 및 Loop-Back 분배모듈을 포함하는 1:256분배모듈을 사용하였고 송수신전환기 내부의 Gain and Phase Detector (AD8302)를 통해 송수신 채널의 크기 및 위상을 비교하고, 송수신전단기의 송신 경로 및 수신 경로에 Digital Step Attenuator와 Digital Phase shifter를 통해 256개의 송수신 채널의 크기와 위상을 정확하게 보정할 수 있었다. 보정된 연직바람 관측장비의 256 능동위상배열 안테나는 근접전계 시험을 통해 연직방향 및 방위각 및 고각 방향으로 각각 +/-15° 조향된 빔의 방사패턴을 측정하였고, 다섯 개의 빔 (연직, 동, 서, 남, 북)은 왜곡없이

시뮬레이션 계산값과 유사한 우수한 빔폭과 사이드로브 특성을 확인하였다. 따라서 제안된 보정 방법은 실외 환경에서 별도의 모듈 추가 없이 256배열 능동위상배열 기반의 연직바람 관측장비에 적용할 수 있음을 확인하였고 특히 시스템 운용자는 원하는 송신이득 및 출력, 수신이득값으로 보정이 가능하고 모듈의 고장에 의한 재 보정시 간단하게 송수신 채널의 위상 및 이득의 보정이 가능하다. 현재 제안된 방법이 적용된 연직바람 관측장비는 속초에 설치되어 운용되고 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2021년 광운대학교 연구년 수행 결과로 이루어졌음.

REFERENCES

- Cho, B. L., Lee, J. S., Sun, S. G., Lee, J. M., Lee, E. H. and Lee, S. G.(2016), “A Study on Calibration of Transmitter and Receiver Channels Using Coupling Lines in an Active Phased Array Radar System”, *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport System*, vol. 14, no. 10, pp.43-49.
- Hashiguchi, H., Fukao, S., Moritani, Y., Wakayama, T. and Watanabe, S.(2004), “A Lower Troposphere Radar: 1.3-GHz Active Phased-Array Type Wind Profiler with RASS”, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, vol. 82, no. 3, pp.915-931.
- Heo, B. H.(2004), *Wind profiler and atmospheric sounding*, Hongneung Science Publisher, pp.119-122.
- Imai, K., Nakagawa, T. and Hashiguchi, H.(2007), “Development of Tropospheric Wind Profiler Radar with Luneberg Lens Antenna (WPR LQ-7)”, *Sei Thecnical Review Number*, vol. 64, pp.38-42.
- Lee, Y. R., Kim, J. P., Kang, Y. D. and Kim, S. J.(2015), “Array Error Analysis and Correction of Active Array Antenna for AESA Radar”, *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 4, pp.414-423.
- Srinivasulu, P., Yasodha, P., Kamaraj, P., Rao, T. N., Jayaman, A., Reddy, S. N. and Satyanarayana, S.(2012), “1280-MHz Active Array Radar Wind Profiler for Lower Atmosphere: System Description and Data Validation”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 29, no. 10, pp.1455-1470.