

광대역 GPS신호의 2차원 방향탐지를 위한 방사보정 기법 및 시험 방안

주형준*, 박슬기, 김동환
한화시스템

The Radiation Compensation Method for Two Dimensional Direction Finding of GPS Signal and Experiment Method

Hyung-Jun Ju*, Seul-Gi Park, Dong-Whan Kim
EW R&D Center, Hanwha System

요약 본 논문에서는 광대역 GPS 신호의 방위각 및 고각의 2차원 방향 탐지를 위한 방사 보정 기법을 제안하고, 이를 이용한 시험 방안 및 시험 결과를 제시한다. 기존의 방향 탐지 기법들은 탐지된 신호의 방위각 방향으로만 방향 탐지를 수행하여, 방향 탐지를 위한 시스템 보정 시 전파의 입사 각도에 따른 방위각 방향으로만 보정 값을 가지고 테이블을 형성하였다. 그러나 최근 시스템 및 방향 탐지의 응용 대상이 다양화함에 따라 본 논문에서 제안한 방법은 2차원 방향 탐지가 가능하도록 고각 및 방위각 모두의 위상차를 가지는 보정 테이블을 형성한다. 우리는 2차원 보정 테이블을 이용해 방향 탐지가 가능한지 확인하기 위해, 고각 및 방위각의 2차원 방향 탐지가 가능한 안테나를 기준으로 이론적 위상차 데이터를 산출하였다. 그리고, FEKO EM 시뮬레이터를 이용하여 위상차를 시뮬레이션 하여 보정테이블을 산출하였으며, 제시된 2차원 보정 기법을 이용하여 방사 보정 시험을 통해 그 결과를 확인하였다.

Abstract In this paper, we present a radiation compensation method and experiment method for two-dimensional direction finding by elevation and azimuth angles of broadband GPS signal, and then produce experimental results. Previous studies have performed direction finding by only using the azimuth angle of the detected signal. So, the compensation table utilizes compensation data by azimuth angles only. However, the presented method in this study has compensation data by azimuth and elevation angles for two-dimensional direction finding. Because of direction finding systems and applications are diversified, recently. So, we present a two-dimensional radiation compensation method. For evaluation of the presented compensation method, we calculate the ideal phase differences on the antenna for two-dimensional direction finding and simulate phase differences using a FEKO EM simulator. Subsequently, we analyze experimental data by radiation compensation experiments using the presented compensation method in an anechoic chamber.

Keywords : DF(Direction Finding), 2-D DF, Interferometer, Radiation Compensation, GPS, AOA(Angle of Arrival)

본 논문은 국방과학연구소의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.

*Corresponding Author : Hyung-Jun Ju(Hanwha System Co.)

email: junie.ju@hanwha.com

Received September 26, 2019

Accepted January 3, 2020

Revised October 21, 2019

Published January 31, 2020

1. 서론

위성 위치 확인 시스템(GPS)은[1] 실시간으로 물체에 대한 정확한 위치 정보를 제공하며, 과거에는 국방 분야, 차량, 선박, 항공 등 제한된 분야에서 사용하여 왔지만, 최근 GPS시스템은 산업전반에서 널리 사용되고 있다. GPS 시스템이 국방 분야뿐만 아니라 산업전반에서 사용됨에 따라, 이에 따른 GPS 대역 고출력 신호원의 탐지가 가능한 시스템 또한 필요성이 점점 커지고 있다. GPS 대역 고출력 신호원을 탐지하는 시스템은[2] 탐지 대상의 신호원을 수신하여 방향을 탐지하는 수동형 방향탐지 방식을 사용한다. 수동형 방향탐지 방식에는 진폭 비교 방향탐지, 위상비교 방향탐지, 모노펄스 합차 비교 방식 등이 있다. 위상비교 방향 탐지 방식은 두 개의 안테나에 수신된 신호의 위상차를 이용하여 방향 탐지를 수행하는 방식으로, 신호의 입사각에 따라 전파지연시간이 발생하여 두 개의 수신 신호 사이에 위상차가 발생하는 원리를 이용한 것이다. 이러한 방향 탐지 기법에 대해 Table 1에 정리하였다. 본 논문에서는 위상비교 방향탐지 방식을 이용해 2차원 방향탐지[3] 수행을 위한 방사보정 기법을 다루었다.

Table 1. Direction finding methods

Method	Antenna Array Shape	Parameters
Amplitude Comparison	Circular, Linear	Amplitude of Received Signal
Phase Comparison	Circular, Linear	Phase Difference of Received Signals between Antennas
Mono-pulse	2-element	Sum of Amplitude / Difference of Amplitude

기존의 ELINT(Electronic Intelligence) 등 방향탐지 기능을 보유한 시스템들은 대부분 원형배열 안테나 등을 이용하여 방위각에 대한 1차원 방향 탐지를 수행하였다. 그러나 최근 이동형 ELINT 장비, 드론 및 무인기의 개발 확대, 방향탐지 기능을 보유한 재머(jammer) 등 방향탐지 기능을 필요로 하는 시스템 및 응용분야가 넓어짐에 따라 2차원 방향탐지에 대한 수요가 증가하고 있으며, 2차원 위상비교 방향탐지 정확도 성능에 대한 분석도 활발히 이루어지고 있다.

본 논문에서는 이러한 2차원 위상비교 방향탐지를 수행하기 위해 고각 방위각에 따른 방사보정 수행 및 보정 테이블 생성 기법 등을 제시하며, 2차원 방향탐지용 안테나를 이용하여 무반향 챔버 환경에서 방사보정을 수행한

결과를 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 2차원 방향 탐지가 가능한 안테나를 소개하고, 2차원 방향탐지를 위한 보정데이터를 계산한 뒤 무반향 챔버에서 방사보정을 수행하여 보정테이블을 생성한다. 그 후 3장에서 논문의 결론을 맺었다.

2. 본론

2.1 2차원 방향 탐지용 안테나

Fig. 1은 본 논문에서 사용한 2차원 방향 탐지용 4소자 배열 안테나의 형상이다. 안테나는 FEKO EM 시뮬레이터를[4] 이용하여 기초 설계하였으며, 유전자 알고리즘을 이용하여 각 설계변수를 최적화하는 과정을 통해 최종 설계 및 구현되었다. 구현된 4소자 배열안테나는 원형루프가 인쇄된 세라믹 기판을 적층한 형상이며, 그라운드 PCB의 중심을 기준으로 4개의 소자를 배열 한 후 하부 패치에 커플러로 2개의 급전부에 각각 0°와 90°의 위상차가 발생하도록 하여 원형편파(RHCP) 특성을 가지도록 구현하였다. 4개의 소자 중 수직 방향 소자 2개는 고각 탐지용 안테나이며, 수평 방향 소자 2개는 방위각 탐지용 안테나이다. Fig. 2는 이를 통해 실제 제작된 4소자 배열 안테나의 형상이다[5].

2차원 방향 탐지는 고각 및 방위각 안테나간의 위상차를 이용하여 수행하며, 이를 위해 고각 및 방위각의 각도별 입사되는 신호에 대해 위상차를 측정하여 방향 탐지 시스템의 방사보정을 수행하게 된다.

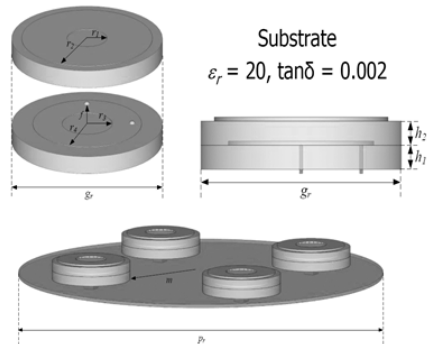


Fig. 1. Shape of designed 4-element array antenna

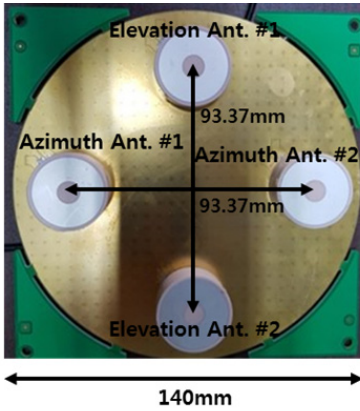


Fig. 2. Shape of produced 4-element array antenna

제작된 안테나를 이용하여 2차원 방향탐지를 수행하는 시스템은 Fig. 3과 같다. 4채널의 안테나를 통해 수신된 GPS대역 신호는 RF수신부를 통해 신호의 이득 및 위상 안정성 등을 컨디셔닝한다. RF수신부를 통해 수신된 신호는 ADC(Analog-to-Digital Converter)를 통해 디지털 신호로 변환한 뒤, SoC(System on Chip)에서 위상차 산출, 방향탐지 수행, 각종 정밀 디지털 신호처리 등을 수행하게 된다. SoC는 XILINX사의 Zynq-7000시리즈를 사용하였다.

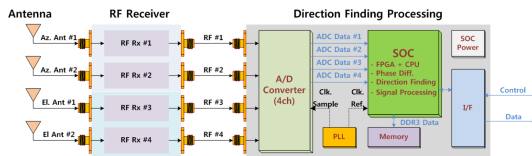


Fig. 3. Block diagram of 2-D direction finding system

2.2 2차원 방향탐지를 위한 보정 데이터

위상비교 방향탐지를 위해 베이스라인에 있는 두 안테나 사이의 위상차를 측정하는데, Fig. 4와 같은 형태의 베이스라인을 기준으로 베이스라인에 있는 두 개의 안테나간 위상차는 Eq. (1)과 같다.

$$\phi_{12} = \frac{2\pi D_{12}}{\lambda} \sin\theta_{12} + \Delta_{12} \quad (1)$$

Where, ϕ_{ij} denotes phase difference between with i-th antenna and j-th antenna, Δ_{ij} denotes

phase error between with i-th antenna and j-th antenna by noise.

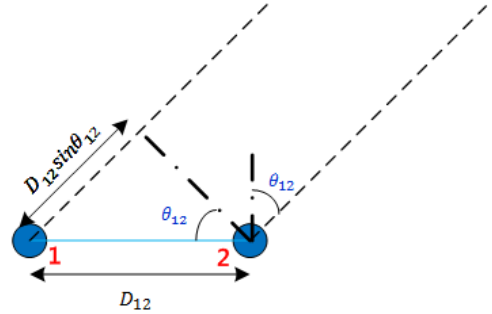


Fig. 4. Two elements antenna array

본 논문에서는 구현된 4소자 안테나를 이용한 방사보정 데이터를 검증하기 위한 고각, 방위각 안테나간 위상차는 Fig. 5와 같은 좌표를 기준으로 Eq. (2), (3)과 같다.

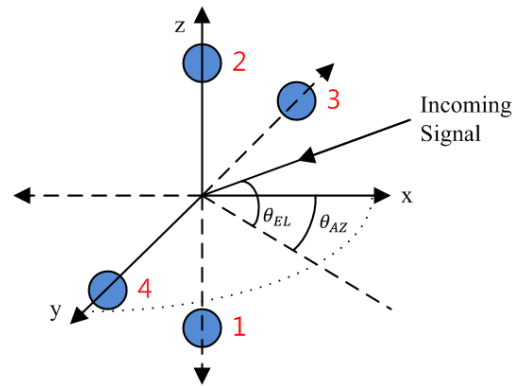


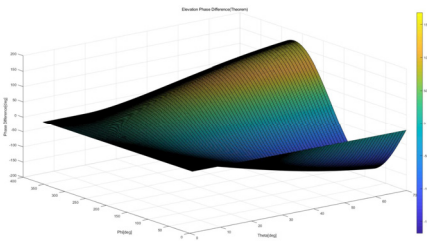
Fig. 5. Four elements antenna array

$$\phi_{12} = \beta(z_2 - z_1)\sin\theta_{EL} + \Delta_{12} \quad (2)$$

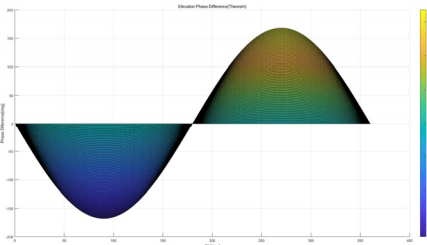
$$\phi_{34} = \beta(x_4 - x_3)\sin\theta_{AZ}\cos\theta_{EL} + \Delta_{34} \quad (3)$$

Where, β denotes phase constant(rad/m), x_i , z_i denotes coordinates of i-th antenna.

Eq. (2)의 ϕ_{12} 는 방위각 안테나간 위상차이고, Eq. (3)의 ϕ_{34} 는 고각 안테나간 위상차이다. 신호원의 주파수는 GPS L1대역인 1575.42MHz 중심주파수를 기준으로 설정 하였으며, 이를 기준으로 고각 안테나간 위상차는 Fig. 6과 같으며, 방위각 안테나간 위상차는 Fig. 7과 같다.

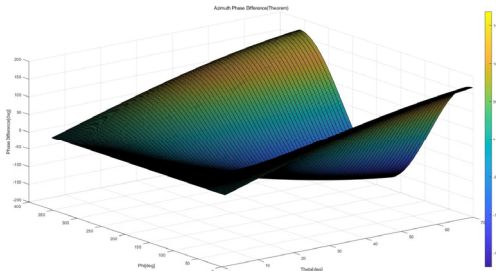


(a)

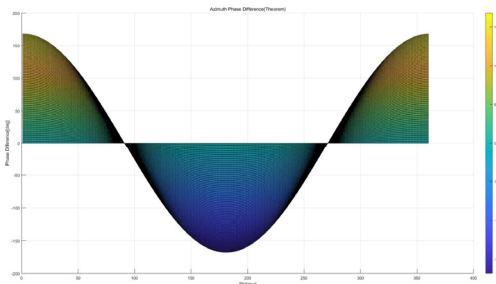


(b)

Fig. 6. Elevation phase difference
(a) 3-D view (b) 2-D view for phi-axis



(a)



(b)

Fig. 7. Azimuth phase difference
(a) 3-D view (b) 2-D view for phi-axis

이론적인 위상차 값은 모호성 없이 방향탐지가 가능한 테이블 형태를 보여준다. 모호성은 임의의 각도에서 고각

및 방위각 위상차가 모두 동일한 값을 가져서 방향탐지 수행 시 두 가지 이상의 각도를 추정하게 되는 것을 말한다.

위상차 모호성 발생에 대한 확인은 안테나의 방사 특성 및 레이돔 등에 의한 영향성을 확인해야 한다. 이에 대한 검증을 위해 FEKO EM 시뮬레이터를 이용하여 전방위 위상차 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 안테나 및 레이돔의 형상과 AOA 영역은 Fig. 8과 같다.

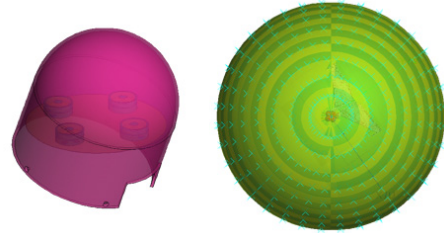


Fig. 8. Antenna shape and AOA region for EM simulation using FEKO

안테나는 Fig. 1에서 설계한 모델을 그대로 사용하였으며, 안테나 보호를 위한 레이돔을 추가하였다. 신호원은 1575.42MHz의 CW(Continuous Wave)를 사용하여 1° 단위로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 모호성은 발생하지 않았다. 고각 위상차는 수식에 의해 도출한 위상차 대비 그 값들이 조밀하게 배치되었으며, 방위각 위상차는 좀 더 넓은 분포를 가진다. 방향탐지 수행 시 오차 발생은 위상차 간 거리가 멀수록 확률이 낮아진다. 고각 안테나간 위상차와 방위각 안테나간 위상차의 시뮬레이션 결과는 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 나타내었다.

2.3 방사보정 시험

방사보정은 일반적으로 아래의 순서로 수행한다.

- 1) 방탐보정 시험환경 셋업 - 수신안테나 및 송신안테나 설치 및 수직/수평 정렬
- 2) 신호 송신 및 수신 세기 확인
- 3) 보정데이터 수집 - 원하는 신호종류 제원에 대해 위상차를 측정하여 저장
- 4) 보정데이터 생성 - 보간을 통해 원하는 데이터 해상도를 만들고, 장치의 메모리에 쓰기위한 형태로 테이블 변환 후 장치에 테이블 장입

이러한 절차에 따라서, 무방향 챔버에 제작된 안테나를 포함한 장치를 설치하여 방사보정을 수행하였다. 시험 구성도는 Fig. 11과 같다.

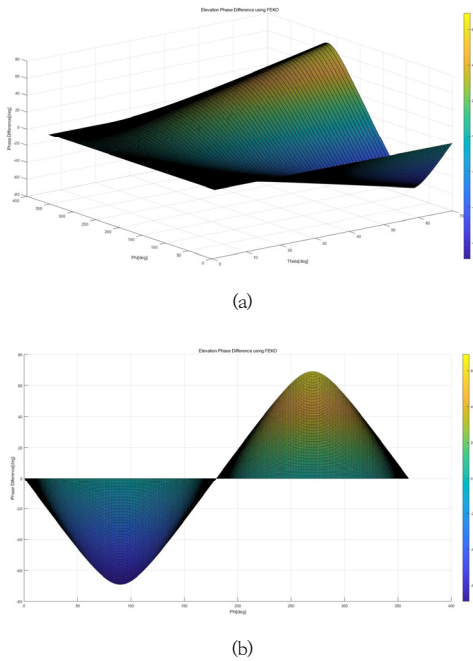


Fig. 9. Elevation phase difference by EM simulation
(a) 3-D view (b) 2-D view for phi-axis

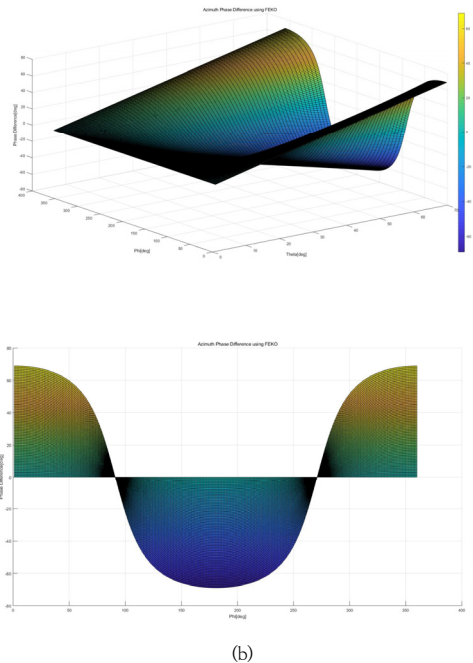


Fig. 10. Azimuth phase difference by EM simulation
(a) 3-D view (b) 2-D view for phi-axis

안테나를 포함한 장치는 Phi/Theta 제어가 가능한 로테이터에 설치하고, 신호발생기를 통해 생성된 신호는 송신안테나를 통해 신호를 방사한다. 장치로 수신된 신호는

신호 분석을 통해 고각/방위각 안테나별 위상차를 계산하고 이 값을 제어PC로 전송하면 정해진 테이블 형태로 저장을 수행한다. Phi/Theta 제어가 가능한 로테이터 및 설치 셋업을 Fig. 12에 나타내었다.

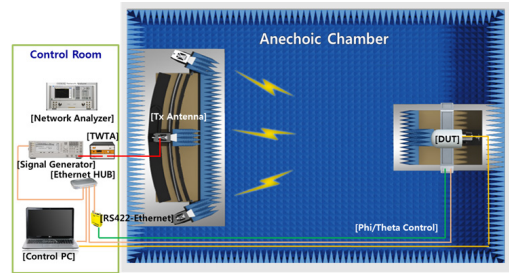


Fig. 11. Radiation compensation schematic diagram

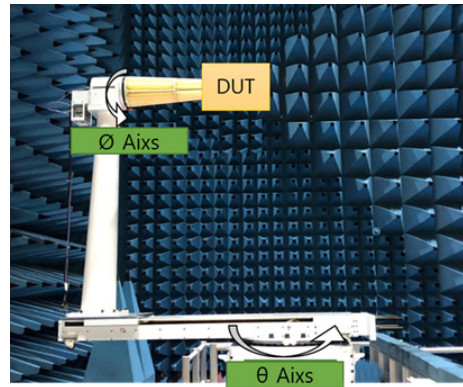


Fig. 12. Radiation compensation set-up in anechoic chamber

방사보정 측정 조건은 다음과 같다.

- 주파수: $1575.42 \pm 00\text{MHz}$ (1MHz 단위)
- Phi축 회전: $0^\circ \sim 359^\circ$ ($2^\circ \sim 5^\circ$ 단위)
- Theta축 회전: $0^\circ \sim N^\circ$ ($1^\circ \sim 2^\circ$ 단위)
- 수신 신호 세기: 약 -30dBm

Phi 각도는 구간에 따라 $2^\circ \sim 5^\circ$ 단위로 측정하고, Theta 각도는 장치의 FOV(Field Of View) 범위에 따라 N값을 결정하여 구간에 따라 $1^\circ \sim 2^\circ$ 단위로 측정 후 1° 단위로 보간을 수행하여 테이블을 작성한다. 테이블은 주파수/Phi각도/Theta각도마다 고각위상차 값과 방위각 위상차 값을 측정하여 저장한다. 작성된 테이블은 Fig. 13과 같은 형태로 저장 후 장치 메모리에 테이블을 저장하기 위해 Fig. 14의 형태로 재 정렬하여 바이너리(binary) 데이터를 저장한다.

방사보정을 통해 측정된 고각/방위각 안테나간 위상차를 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었다. 위상차 분포는 이론에 의한 값과 EM 시뮬레이션에 의해 도출된 값의 분포와 유사하게 측정되었다.

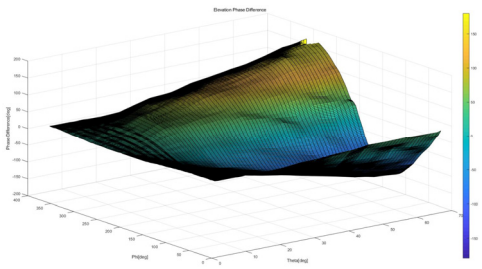
		Freq.#K (1575.42MHz +00MHz)		Theta 축				
		0°		-N°	-(N-2)°	...	+(N-2)°	+N°
				$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	...	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$
		Freq.#02		Theta 축				
		0°		1°	...	N-1°	N°	
				$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	...	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$
		Freq.#01 (1575.42MHz -00MHz)		Theta 축				
		0°		1°	...	N-1°	N°	
				$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	...	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$
		1°		$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	...	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$
		2°		$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	...	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$
		...		$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	...	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$
		357°		$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	...	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$
		358°		$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	...	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$
		359°		$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	...	$\phi_{Az}\phi_{EI}$	$\phi_{Az}\phi_{EI}$

Fig. 13. 2-D compensation table for measurement

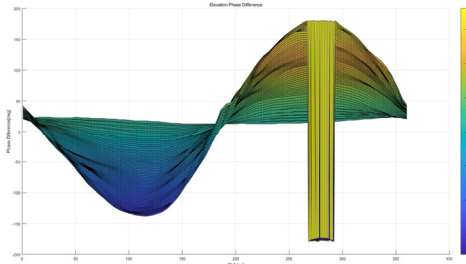
		ADDRESS		DATA	
Frequency	AOA_Az	AOA_EI	Phase Diff(Az)	Phase Diff(EI)	
FREQ #1	0°	0°	ϕ_{Az}	ϕ_{EI}	
		1°	ϕ_{Az}	ϕ_{EI}	
		
		358°	ϕ_{Az}	ϕ_{EI}	
		359°	ϕ_{Az}	ϕ_{EI}	
	
	N°	0°	ϕ_{Az}	ϕ_{EI}	
		1°	ϕ_{Az}	ϕ_{EI}	
		
		358°	ϕ_{Az}	ϕ_{EI}	
359°		ϕ_{Az}	ϕ_{EI}		
FREQ #2	...	...	...	...
...	
FREQ #K	...	...	...	...

Fig. 14. 2-D compensation table for memory writing

단, 일부 구간에서 -180° ~ +180° 범위 밖의 위상차 값이 발생하여 역위상 값으로 표현되었으나, 그래프에 표시된 선과 같이 다른 위치의 위상차 값과 겹치지 않기 때문에 이로 인한 모호성은 발생하지 않음을 확인하였다.

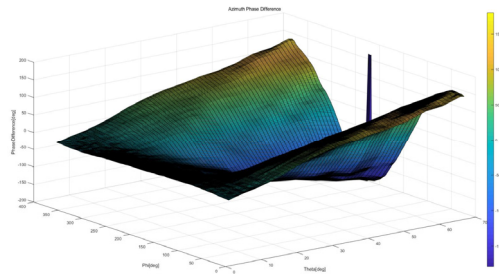


(a)

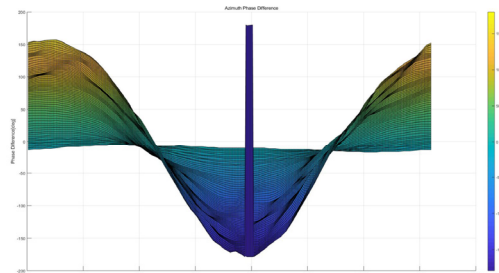


(b)

Fig. 15. Measured elevation phase difference by radiation compensation
(a) 3-D view (b) 2-D view for phi-axis



(a)



(b)

Fig. 16. Measured azimuth phase difference by radiation compensation
(a) 3-D view (b) 2-D view for phi-axis

방향탐지는 입사신호의 위상차를 분석하여, 이러한 보정 테이블의 전체 값과 비교한 뒤 상관도가 가장 높은 위상차 조합에 해당하는 각도를 도출하는 과정이다. 방향탐지를 수행할 시 모호성에 의해 잘못된 방향을 탐지하는 것은 특정지점에서 방위각 위상차와 고각 위상차 조합이 다른 지점과 일치할 때 발생한다. 이러한 방향탐지 모호성의 발생 여부를 확인하기 위해 이론값 및 EM 시뮬레이션, 방사보정 시험을 통해 취득한 위상차 테이블을 모두 Fig. 14와 같은 형태로 변환하여 Fig. 17과 같은 순서로 모든 주파수마다 검증하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

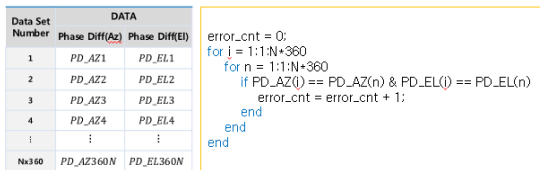


Fig. 17. Ambiguity check processing of phase difference table

Table 2. DF ambiguity evaluation result

Method	Theorem	EM Simulation	Experiment
Ambiguity Number	0	0	0

Table 2의 결과와 같이 모든 위상차 데이터 조합을 비교한 결과, 이론값 및 EM 시뮬레이션, 방사보정 시험을 통해 취득한 위상차 테이블 모두 위상차 조합이 동일한 지점은 발생하지 않았음을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 광대역 GPS 신호의 2차원 방향탐지를 위한 보정 기법을 제안하고, 이를 위한 시험 방안 및 결과를 기술하였다. 고각 및 방위각 각각의 위상차 데이터를 가지는 보정 테이블을 형성하였으며, 메모리에 저장하기 위한 테이블 구성을 제시하였다. 2차원 방향탐지가 가능한 안테나를 제작하여, 이를 기반으로 이론적 위상차 테이블을 계산하였고, EM 시뮬레이터를 이용한 위상차 테이블을 해석하였다. 끝으로 실제 무반향 챔버에서 시험을 통해 위상차 테이블을 획득하였다. 측정결과는 이론치 및 시뮬레이션 결과와 유사하였으며, 위상차 모호성이 발생하지 않는 결과를 확인하였다.

본 논문에서 실험을 통해 획득한 모호성이 발생하지 않는 보정 테이블을 사용하면, 정밀한 2차원 방향탐지가 가능하다.

References

- [1] E. D. Kaplan. Understanding GPS: Principles and Applications. Artech House, 2002.
- [2] H. Hu, N. Wei, "A study of GPS jamming and anti-jamming", *Proceedings of 2009 2nd Int. Conf. on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)*, IEEE, Shenzhen, China, pp.388-391, Dec. 2009
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/PEITS.2009.5406988>
- [3] M. H. Chae, "Accuracy Analysis of 2-D Direction Finding Based on Phase Comparison", *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol.28, No.8, pp.653-660, Aug. 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2017.28.8.653>
- [4] FEKO, Altair, Available From: <http://www.altairhyperworks.com/product/FEKO> (accessed Aug. 30, 2019)
- [5] S. G. Park, H. S. Shim, H. J. Ju, H. K. Ryu, M. H. Chae, "The four element array patch antenna for two-dimensional direction finding", *Proceedings of 2018 Winter Conf. on Korea Information and Communication soc.*, Gangwon, Korea, pp.688-689, Jan. 2018.

주 형 준(Hyung-Jun Ju)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한국해양대학교 전 파공학과 (전파공학사)
- 2006년 2월 : 한국해양대학교 전 파공학과 (전파공학석사)
- 2008년 12월 ~ 2012년 8월 : 에이스테크놀로지 선임연구원
- 2012년 9월 ~ 2016년 3월 : LS전선 선임연구원
- 2016년 4월 ~ 현재 : 한화시스템 전문연구원

<관심분야>

전자전, 방향탐지, 신호처리

박 슬 기(Seul-Gi Park)

[정회원]



- 2006년 2월 : 홍익대학교 전자전 기공학부 (전자전기공학사)
- 2008년 2월 : 홍익대학교 전자정보통신공학부 (전자정보통신공학 석사)
- 2013년 4월 ~ 2016년 12월 : 삼성전자 책임연구원
- 2017년 1월 ~ 현재 : 한화시스템 전문연구원

<관심분야>

전자전, 안테나, 레이더

김 동 환(Dong-Whan Kim)

[정회원]



- 2014년 2월 : 광운대학교 전자정보공과대학 (전자통신공학사)
- 2002년 2월 : 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 (전기전자컴퓨터공학석사)
- 2016년 7월 ~ 현재 : 한화시스템 선임연구원

<관심분야>

전자통신