

인터페로미터 방향 탐지기의 디지털 위상차 측정 기법 성능 분석

강종진^{1*} · 박성균¹ · 노지현¹

Performance Analysis on Digital Phase Difference Measurement Techniques for Interferometer Direction Finder

Jong-jin Kang^{1*} · Sung-kyun Park¹ · Ji-hyun Roh¹

^{1*}Electronic Warfare R&D Center, Hanwha Systems, Seongnam, 13524 Korea

요 약

본 논문은 서로 다른 안테나로부터 수신되는 무선 신호의 위상차를 계산하여 신호의 도래방향을 측정하는 인터페로미터 방향 탐지 장치에 관한 것이다. 최신의 전자전용 방향 탐지기는 위상차 측정에 있어서 온도에 따른 위상측정 편차가 작고, 낮은 신호 대 잡음비 환경에서도 비교적 위상측정 성능이 우수한 디지털 위상차 측정 방법이 적용되고 있다. 시스템에서 요구되는 방향 탐지 정확도 성능 달성을 위한 위상차 측정 허용 오차를 도출하고, 디지털 위상차 측정 방법에 대하여 소개하였다. 샘플 개수, 신호 대 잡음비, 간섭신호 유입에 따른 성능을 정량적으로 분석하였고, 시뮬레이션을 통하여 주파수 영역 측정방법이 시간영역 대비 낮은 SNR 및 간섭신호 유입 환경에서 더 좋은 성능을 보임을 확인하였다. 제안한 방법은 인터페로미터 방향 탐지 장치의 성능 결정에 활용 할 수 있을 것이다.

ABSTRACT

This paper describes interferometer direction finder which measures the angle of arrival based on calculation of the phase difference of received radio signal from different antennas. Modern Electronic Warfare direction finder uses digital phase difference measuring techniques which have less effect on temperature variation and better performance under low Signal to Noise Ratio environment. In this paper, we analyze acceptable phase difference error for requirement of system's direction finding accuracy and introduce digital phase difference calculation techniques. We have investigated quantitative analysis on phase difference calculation according to sample number, SNR, interference injection. Through the simulation, frequency domain measurement technique is better performance than the time domain one at the environment of low SNR and interference injection. Proposed method can be used to determine the performance of interferometer direction finder.

키워드 : 디지털 위상차 측정, 방향탐지, 전자전, 인터페로미터

Key words : Digital phase difference measurement, Direction finding, Electronic warfare, Interferometer

Received 26 June 2018, Revised 16 July 2018, Accepted 25 July 2018

* Corresponding Author Jong-jin Kang(E-mail:jongjin.kang@hanwha.com, Tel:+82-31-8091-7712)

Electronic Warfare R&D Center, Hanwha Systems, Seongnam, 13524 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.8.1076>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

무선 신호의 방향 탐지는 통신, 레이더 신호의 감시에 있어서 매우 중요한 기술이다. 다양한 무선 방향 탐지 기술이 개발되어 왔으며, 수신되는 신호의 세기 차이를 이용한 진폭비교방식, 위상차를 이용한 위상비교방식(interferometer), 시간차를 이용한 시간 비교방식(TDOA, Time Difference of Arrival) 등으로 분류할 수 있다[1, 2]. 본 논문은 위상비교방식에 관한 것으로서 2개 이상의 안테나를 특정 간격으로 배치하고 수신되는 신호의 위상차를 측정하여 신호의 도래 방향을 측정하는 방식이다.

위상차 측정에 있어서 종래에는 위상 코릴레이터(correlator)를 이용한 아날로그 방식의 위상 판별기를 이용하여 위상을 측정하였으나, 온도에 따른 위상차 측정 오차로 인해 별도의 온도 보상이 필요하고, 잡음에 민감하여 높은 신호대잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio)가 요구된다[3].

반면 아날로그-디지털 변환기(ADC, Analog to Digital Converter)를 이용하여 수신 신호를 디지털 신호로 변환한 후 위상차를 측정하는 디지털 위상차 측정 기법은 별도의 온도에 따른 위상 보정이 필요 없고 낮은 SNR에서도 아날로그 방식 대비 비교적 정확한 위상차 측정이 가능하다.

본 논문에서는 시스템에서 요구되는 방향 탐지 정확도 규격 만족을 위하여 허용되는 위상차 측정 오차를 분석하였고, 위상비교를 위한 디지털 위상차 측정 방법을 소개한 후 각 방법에 대한 시뮬레이션을 통하여 디지털 위상차 측정 기법 별 위상차 측정 성능을 정량적으로 비교 분석하였다.

II. 인터페로미터 방향 탐지 기법

2.1. 인터페로미터 방향 탐지 원리

인터페로미터 방향 탐지 기법은 안테나로부터 수신되는 신호의 위상차를 측정하는 방식이다. 그림 1은 2개의 안테나와 위상비교기를 이용한 인터페로미터 방향 탐지 장치의 개념도이다. 안테나1의 중심과 안테나2의 중심을 수평으로 잇는 선을 기준선(baseline)이라 하며 거리는 d 이다. 입사되는 신호는 기준선을 형성하고 있

는 2개의 안테나에 수신되어 위상비교기로 전달되고, 두 신호의 위상차를 측정한다[1, 2].

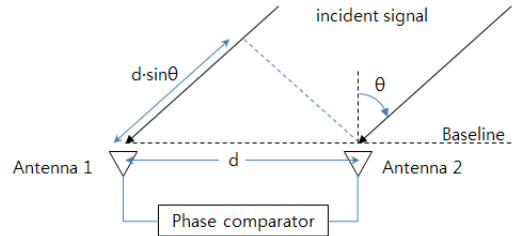


Fig. 1 Interferometer direction finding system

방위각에 따른 두 신호의 위상차 관계는 식 (1)과 같다. 입사신호는 안테나 보어사이트와 θ 각을 이루어 도래하게 되며, 안테나1과 안테나2의 거리 d 에 따른 위상차가 발생하게 된다. ϕ 는 두 수신 신호의 위상차이며, λ 는 입사신호의 파장이다[1].

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (1)$$

일반적으로 위상비교 방향 탐지기는 1° rms 이하의 높은 방향 탐지 정확도가 요구된다[2]. 정밀한 위상차 측정뿐만 아니라 수신부의 케이블, 소자 특성에 따른 위상 편차를 제거하기 위한 위상보정이 반드시 필요하다.

2.2. 방향 탐지 정확도 분석

위상비교 방향 탐지기에서의 위상차 측정 오차에 따른 방향 탐지 성능을 분석하여 시스템에 적합한 위상차 측정 허용오차를 도출할 필요가 있다.

방향 탐지 rms 오차(σ_θ)를 계산하는 수식은 식 (2)와 같다[1, 4-6]. 여기서 σ_ϕ 는 위상차 측정 오차, θ_{AZ} 는 신호의 방위각, θ_{EL} 은 신호의 고각이다.

$$\sigma_\theta = \sigma_\phi \left(\frac{\lambda}{2\pi \cdot d \cdot \cos(\theta_{AZ}) \cdot \cos(\theta_{EL})} \right) \quad (2)$$

수신 신호의 방위각이 일정하더라도 고각의 차이에 따라 위상차가 변하게 되고 방향 탐지 오차가 증가하게 된다[4-6]. 항공기에 장착되는 방향 탐지기의 경우 항공 및 지상에서 송신되는 신호를 모두 수신해야 하므로 고

각에 의한 방향 탐지 성능을 반드시 고려하여야 한다.

그림 2는 식 (2)에서 방향 탐지 정확도(σ_θ)를 1° 로 가정한 경우의 위상차 측정 오차(σ_ϕ)의 범위를 도시한 그림이다. 안테나간 거리는 1.5λ 로 가정하였다. 안테나 소자의 크기가 신호의 파장 대비 상대적으로 크므로 안테나간 거리를 1.5λ 이하로 줄이는 것이 물리적으로 불가능한 경우가 많다.

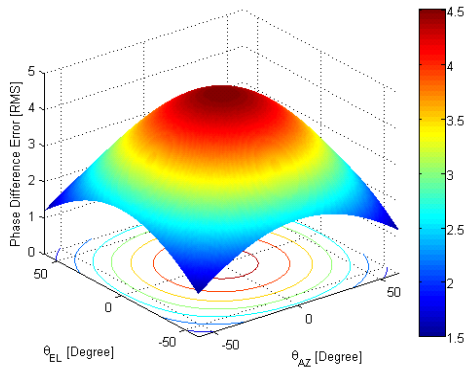


Fig. 2 Phase difference error vs θ_{AZ} and θ_{EL}

그림 2에서 고각(θ_{EL})이 -60° 혹은 60° 인 경우 위상차 측정 오차가 가장 작아야 한다. 즉 방향 탐지 정확도를 만족하기 위하여 정밀한 위상차 측정이 보장되어야 한다. 반대로 고각이 안테나 보어사이트(0°) 방향으로 이동할수록 허용되는 위상차 오차가 커진다.

그림 3은 고각에 의해 코시티 오차가 최대(고각 $-60^\circ, 60^\circ$)가 되는 지점의 방위각에 따른 위상차 측정오차 허용범위를 도시하였다.

표 1은 1° RMS 방향 탐지 정확도 만족을 위한 방위각 및 안테나 이격 거리에 따른 위상차 측정 허용오차를 최악 조건인 고각 60° 일 때를 기준으로 정리한 결과이다. 안테나간 이격 거리를 늘리는 경우 허용되는 위상차 측정 오차가 커짐을 알 수 있다. 그러나 이격 거리가 큰 경우 위상차가 360° 를 넘게 되어 모호성이 발생하는 문제가 있다. 모호성을 해결하기 위하여 여러 개의 안테나를 이용한 멀티베이스라인 인터페로미터 방향 탐지 기법의 연구가 진행되고 있다[7].

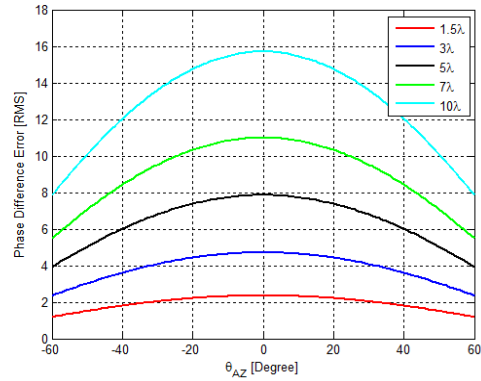


Fig. 3 Phase difference error vs θ_{AZ} and λ

Table. 1 Phase difference error vs θ_{AZ} and distance

		Antenna Distance (d)				
		1.5λ	3λ	5λ	7λ	10λ
θ_{AZ}	0°	2.35°	4.71°	7.85°	10.99°	15.70°
	10°	2.32°	4.64°	7.73°	10.82°	15.46°
	20°	2.21°	4.42°	7.38°	10.33°	14.76°
	30°	2.04°	4.08°	6.80°	9.52°	13.60°
	40°	1.80°	3.60°	6.01°	8.42°	12.03°
	50°	1.51°	3.02°	5.04°	7.06°	10.09°
60°	1.17°	2.35°	3.92°	5.49°	7.85°	

III. 디지털 위상차 측정 방법

디지털 위상차 측정 방법은 시간영역(Time-domain) 처리방법과 주파수영역(Frequency-domain) 처리방법으로 나눌 수 있다. 3.1 및 3.2에서는 시간영역 측정 방법을, 3.3에서는 주파수영역 측정 방법을 소개한다.

3.1. I/Q 복조(demodulation) 방법

I/Q 복조 방법은 두 개의 안테나로부터 입력된 신호를 AD 변환 후 기저대역 신호처리를 통하여 I/Q 신호로 변환한 후 각각의 채널별 순시위상을 측정하여 채널간 위상차를 구하는 방법이다. 그림 4는 I/Q 복조 방법의 블록도이다. 사인 및 코사인 신호를 생성하는 NCO (Numerically Controlled Oscillator) 및 곱셈기, 저역통과필터를 이용하여 기저대역 I/Q 신호로 변환한다. 기저

대역 신호처리는 디지털 하향변환(Digital Down Converter)와 동일한 구조이다. 시간영역 처리방법은 ADC 샘플단위로 수행하며 잡음의 영향을 저감하기 위하여 특정 샘플의 평균값을 적용하여 위상차를 구한다.

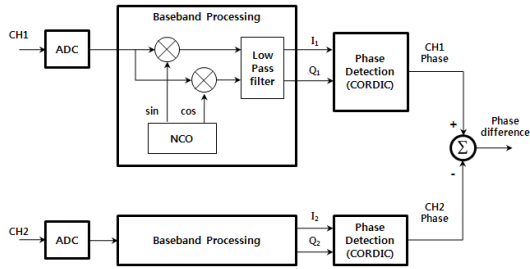


Fig. 4 Block diagram of phase difference measuring algorithm using I/Q demodulation

그림 4에서 CH1, CH2 신호의 순시위상값 ψ_1, ψ_2 은 CORDIC(COordinate Rotation DIGital Computer)[8] 알고리즘 등을 이용하여 식 (3)과 같이 구할 수 있고, 채널간 위상차는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (3)$$

$$\phi = \psi_1 - \psi_2 \quad (4)$$

3.2. 삼각함수(trigonometric function) 방법

또 다른 시간영역 위상차 측정 방법으로 삼각함수 방법이 있다.

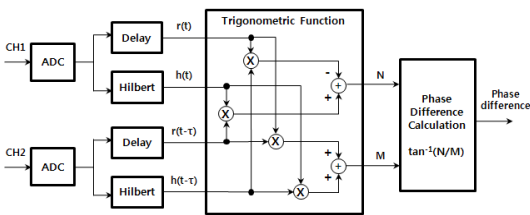


Fig. 5 Block diagram of phase difference measuring algorithm using trigonometric function

삼각함수 위상차 측정 방법은 입력되는 신호를 90도 위상천이를 시킨 후 각각을 곱한 후 각각의 합차를 이용하여 채널간 위상차를 계산하는 방법이다. 그림 5는 삼

각함수 을 이용한 위상차 측정 방법의 블록도이다[9].

$$r(t) = a_1(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (5)$$

$$r(t-\tau) = a_2(t) \cdot \cos(2\pi f_c (t-\tau)) \quad (6)$$

$$h(t) = a_1(t) \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (7)$$

$$h(t-\tau) = a_2(t) \cdot \sin(2\pi f_c (t-\tau)) \quad (8)$$

삼각함수 합차 공식을 적용하여 그림 5의 N 및 M 을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$N = h(t) \cdot r(t-\tau) - r(t) \cdot h(t-\tau) \quad (9)$$

$$M = r(t) \cdot r(t-\tau) + h(t) \cdot h(t-\tau) \quad (10)$$

식 (9), (10)을 다시 쓰면 식 (11), (12)와 같다.

$$N = a_1(t) \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot a_2(t) \cdot \cos(2\pi f_c (t-\tau)) - a_1(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \cdot a_2(t) \cdot \sin(2\pi f_c (t-\tau)) \quad (11)$$

$$M = a_1(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \cdot a_2(t) \cdot \cos(2\pi f_c (t-\tau)) + a_1(t) \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot a_2(t) \cdot \sin(2\pi f_c (t-\tau)) \quad (12)$$

식 (11), (12)를 조합하여 식 (13)을 구할 수 있다.

$$\frac{N}{M} = \frac{\sin(2\pi f_c \tau)}{\cos(2\pi f_c \tau)} = \tan(2\pi f_c \tau) \quad (13)$$

식 (13)을 이용하여 두 신호의 위상차 ϕ 를 구할 수 있다.

$$\phi = 2\pi f_c \tau = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(2\pi f_c \tau)}{\cos(2\pi f_c \tau)}\right) \quad (14)$$

3.3. FFT 방법

그림 6은 FFT를 이용한 주파수영역 위상차 측정 방법의 블록도이다.

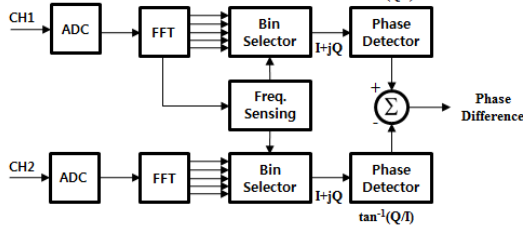


Fig. 6 Block diagram of phase difference measuring algorithm using FFT function

입력신호 $x(n)$ 의 FFT $X(k)$ 는 식 (15)와 같다[10].

$$X_k = \sum_{n=1}^N x_n e^{-\frac{j2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N \quad (15)$$

여기서 k 는 FFT 출력의 bin 인덱스이다. FFT 결과는 복소수 출력이며, 진폭 및 위상응답은 각각 식 (16), (17)과 같다.

$$|X_k| = \sqrt{\text{real}(X_k)^2 + \text{imag}(X_k)^2} \quad (16)$$

$$\angle(X_k) = \tan^{-1}\left(\frac{\text{imag}(X_k)}{\text{real}(X_k)}\right) \quad (17)$$

그림 6의 블록도에서 Freq. Sensing 블록은 입력되는 신호 중 측정하고자 하는 주파수 성분의 bin 값, k 를 추출하기 위한 블록이며, 식 (16)에서 설정한 신호레벨 임계치를 초과하는 주파수 성분 혹은 이미 알고 있는 주파수를 선택한 후 해당 주파수의 복소수값을 이용하여 식 (17)과 같이 위상차를 계산한다.

IV. 시뮬레이션 결과

3장에서 소개한 디지털방식의 위상차 측정 방법에 대한 성능 확인을 위하여 수신신호의 데이터 샘플 개수, 신호대잡음비(SNR), 간섭신호 유입에 따른 위상차 측정 오차를 Matlab 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 각각 1000번의 독립시행을 수행한 후 위상차 측정 오차를 제곱평균(Root Mean Square, RMS)으로 계산하였다.

4.1. 데이터 샘플 개수에 따른 위상차 측정 오차

그림 7은 SNR 10dB 조건에서 데이터 샘플 개수에 따른 위상차 측정 오차를 실험한 결과이다. 데이터 샘플 개수가 많을수록 위상차 측정 오차는 감소하게 된다. 각각의 방법을 비교하면 삼각함수 방법이나 FFT 방법에서의 성능이 거의 동일하며, I/Q Demodulation 방법에서는 샘플 개수가 작은 경우 위상차 측정 정확도가 떨어짐을 확인하였다. 레이더 신호의 경우, 예를 들어 $1\mu\text{s}$ 펄스폭인 경우 샘플링 클럭을 128 MHz로 가정하면, 펄스당 128 개의 샘플을 획득할 수 있으며, 샘플 개수가 적으므로 위상차 측정 오차가 증가되고, 방향 탐지 성능이 열화될 수 있음을 알 수 있다.

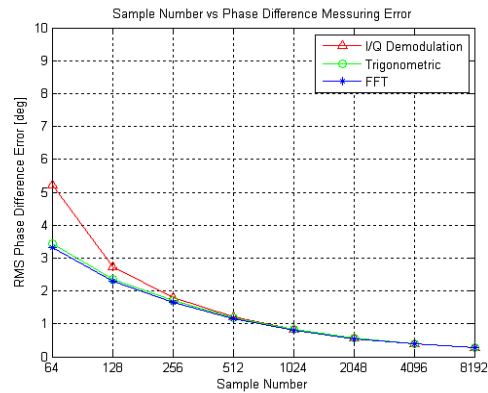


Fig. 7 Phase difference error vs sample number

일반적으로 샘플 개수가 늘어나는 경우 계산시간이 증가하여 시스템의 성능이 열화된다. 그러나 레이더 펄스의 경우 펄스폭이 펄스 반복주기 대비 짧으므로 새로운 펄스가 도착하기 전까지 신호의 위상을 측정하면 되므로 샘플개수의 처리시간은 본 연구에서 고려하지 않았다. 또한 집적회로의 기술발전으로 디지털 신호처리 자원(곱셈기)이 늘어나므로 처리시간을 극복할 수 있는 방법들이 연구되고 있다.

4.2. SNR에 따른 위상차 측정 오차

그림 8은 SNR에 따른 위상차 측정오차이다. SNR은 0dB에서 25dB 까지 1dB 간격으로 계산하였으며 이때의 샘플 개수는 1024개를 사용하였다.

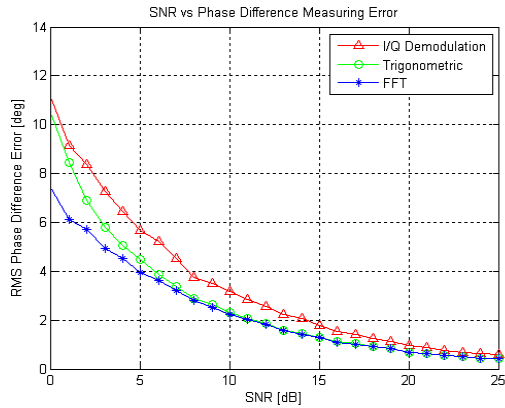


Fig. 8 Phase difference error vs SNR

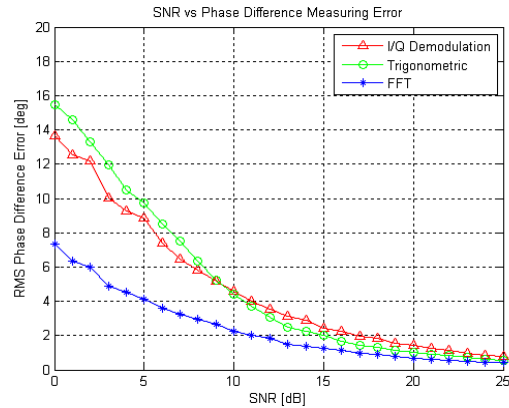


Fig. 10 Phase difference error vs SNR with interference signal

4.3. 간섭신호 유입에 따른 위상차 측정 오차

간섭신호가 유입된 경우 성능확인을 위하여 원신호 (32MHz, $f_s/4$) 대비 신호세기는 -3dB, 주파수는 2MHz 떨어진 신호를 인가하였다. 간섭신호는 수신채널의 대역통과필터 대역폭내에 포함되는 주파수를 선정하였으며, 그림 9는 원 신호 및 간섭신호의 주파수 스펙트럼이다.

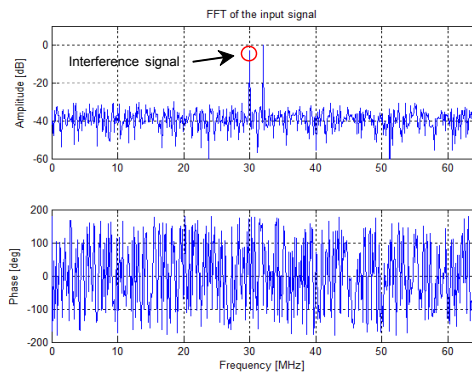


Fig. 9 Frequency response with interference

그림 10은 간섭신호를 인가하였을 경우의 SNR에 따른 위상차 측정 오차를 실험한 결과이다. 그림 9와 비교해보면, 시간영역 위상차 측정 방법은 간섭신호를 포함하여 모든 신호의 위상을 측정하여 평균을 취하므로 간섭신호 영향에 의한 위상차 측정 오차가 커지게 된다. 그러나 주파수 영역 위상차 측정 방법은 간섭신호가 존재하더라도 해당 주파수의 bin만을 선택하여 위상을 측정함으로써 간섭신호의 영향을 거의 받지 않는다.

이상의 실험 결과를 종합해보면, 데이터 샘플 개수가 많을수록 위상차 오차는 감소하나, 응용분야에 따라 획득되는 신호의 샘플 길이에 의하여 성능이 제한될 수 있다. 낮은 SNR에서는 주파수영역에서의 위상차 측정 방법이 비교적 성능이 좋음을 확인하였다. 간섭신호가 없는 경우에는 요구되는 SNR(10dB 기준) 대비 위상차 측정 오차의 허용범위를 모두 만족하지만 간섭신호가 인가된 경우에는 주파수영역 위상차 측정 방법만이 요구되는 위상차 측정 정확도(표 1에서 제시한 위상차 측정 허용오차 2.35°, 1.5λ 기준)를 만족함을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

주파수 영역 위상차 측정 방법은 특정 주파수를 선택하여 위상을 측정하므로 낮은 SNR 및 간섭신호가 유입되더라도 비교적 좋은 성능을 보임을 확인하였다. 하지만 주파수 영역 위상차 측정 방법은 FFT를 수행하기 위하여 샘플 개수의 확보가 필요하며, 정밀한 시간해상도가 요구되는 분야에는 성능이 열화될 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 인터페로미터 방향 탐지 시스템에서 요구되는 1° 이상의 높은 방향 탐지 정확도 만족을 위해 온도에 따른 위상측정 편차가 없고 아날로그 위상 판별기 대비 낮은 SNR에서도 위상측정이 가능한 디지털 위상차 측정 방법을 소개하고 각각의 방법에 대한 위상차

측정 성능을 정량적으로 분석하였다.

시뮬레이션 결과로부터 주파수영역 위상차 측정 방법이 시간영역 위상차 측정 방법 대비 SNR(10dB 기준) 및 간섭신호 유입 환경에서 위상차 측정 오차가 약 1.5~2배 좋은 성능을 보임을 확인하였다. 시간 해상도를 고려하여 적절한 크기의 샘플 개수를 선정해야 하며, 디지털 신호처리 자원의 여유가 있는 경우 시간영역 방법과 병행하여 위상차를 측정하는 경우 위상차 측정 성능이 향상될 수 있다. 본 논문에서 제시한 성능 분석 결과를 기초로 하여 인터페로미터 방향 탐지 장비의 방향 측정 정확도 성능, 안테나간 이격 거리, 시스템 요구 SNR 등의 결정에 적용할 수 있을 것이다.

References

[1] R. G. Wiley, *ELINT The Interception and Analysis of Radar Signals*, Artech House, pp. 131-139, 2006.

[2] D. L. Adamy, *EW102 A Second Course in Electronic Warfare*, Artech House, pp. 162-163, 2004.

[3] B. J. Park, J. H. Lee and K. S. Lee, "A VHF Band 4 Channel Phase Discriminator," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 9, pp. 912-918, Sep. 2014.

[4] Y. H. Kim, J. S. Lim, G. S. Chae and K. Kim, "An investigation of the Azimuth Error for Correlative Interferometer Direction Finding," *Journal of the Korea Convergence Society*, vol. 6, no. 5, pp. 249-255, Jun. 2015.

[5] J. S. Lim and G. S. Chae, "Analysis of Direction Finding Accuracy for Amplitude - Phase Comparison and Correlative Interferometer Method," *Journal of Digital convergence*, vol. 14, no. 1, pp. 195-201, Jan. 2016.

[6] M. H. Chae, "Accuracy Analysis of 2-D Direction Finding Based on Phase Comparison," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 8, pp. 653-660, Aug. 2017.

[7] J. H. Lee and J. M. Woo, "The Direction Finding Ambiguity Analysis for 3 Element and 4 Element Phase Interferometer DF System," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 544-550, Aug. 2014.

[8] J. Duprat and J. M. Muller, "The CORDIC algorithm : New Results for Fast VLSI Implementation," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 42, no. 2, pp. 168-178, 1993.

[9] B. Hua, Z. Jianjiang, G. Zhixiong, C. Jianhua and X. Weijie "Digital Phase Detecting Based on Hilbert Transform and Its DSP Implementation," Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Technical Report, 2011.

[10] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer and J. R. Buck, *Discrete-Time Signal Processing*, 2th ed. New Jersey, NJ: Prentice Hall, pp. 629-692, 1999.



강종진(Jong-Jin Kang)

동명대학교 정보통신공학과 공학석사
현재 한화시스템(주) 전자전연구센터 근무
※관심분야: 전자전 신호처리, 방향탐지



박성균(Sung-Kyun Park)

아주대학교 전자공학과 공학석사
현재 한화시스템(주) 전자전연구센터 근무
※관심분야: 초고주파 회로설계, 전자전 시스템



노지현(Ji-Hyun Roh)

연세대학교 전기 및 전자공학과 공학석사
현재 한화시스템(주) 전자전연구센터 근무
※관심분야: 전자전 신호처리, 전자전 시스템