

# VHF 대역 4채널 위상 판별기

## A VHF Band 4 Channel Phase Discriminator

박 범 준 · 이 정 훈 · 이 규 송

Beom-Jun Park · Jeong-Hoon Lee · Kyu-Song Lee

### 요 약

본 논문에서는 트리플 베이스라인 인터페로미터(tripple baseline interferometer) 방향탐지 장치에 적용할 수 있는 VHF 대역 다채널 위상 판별기(phase discriminator)를 제안하였다. 방향탐지 장치에서 출력되는 IF(Intermediate Frequency) 신호들 간의 위상차를 동시에 측정하기 위해 위상 판별기를 다채널의 병렬 구조로 설계하였고, 위상 판별기의 위상 코릴레이터(phase correlator)는 소자 수를 줄이기 위해 I, Q 믹서 방식으로 구현하였다. 그리고 RF 소자의 위상 정합 불균형에 따른 위상 판별기의 오차를 보상하기 위해 디지털 LUT(Look Up Table)를 적용하였다. 제작된 VHF 대역 다채널 위상 판별기는 측정 결과, 30 dB SNR 조건에서 2도 RMS(Root Mean Square) 수준의 위상 측정 정확도를 보이며, 상용 위상 판별기보다 우수한 정확도를 갖는다.

### Abstract

In this paper, a VHF band multi channel phase discriminator for direction finding equipment using tripple baseline interferometer technique is proposed. In order to measure simultaneously phase difference between IF(Intermediate Frequency) signals of the direction finding equipment, phase discriminator was designed to have parallel structure with multi channel, the phase correlator of phase discriminator was designed with I, Q mixer for reducing number of components. And digital LUT(Look Up Table) was applied for compensating error of phase discriminator due to phase unbalance of RF components. The measured phase accuracy of fabricated phase discriminator was 2 degree RMS(Root Mean Square) at 30 dB SNR condition, which is superior to the phase accuracy of conventional product.

Key words: Phase Discriminator, Interferometer Technique, Direction Finding

### I. 서 론

전자전 분야에서 방향탐지 장치는 레이더 신호를 수신하여 입사된 레이더 신호의 방위 값을 산출한다. 현대화된 레이더의 경우, 대전자전 능력 확보를 위해 주파수와 펄스 반복 주기 등의 운용 제원은 변경이 가능하나, 방위 정보는 변경하기 어렵다. 이 때문에 전자전 분야에서 방

위 정보는 각종 레이더 신호 분석을 위한 중요한 변수로 사용된다<sup>[1]</sup>.

여러 가지 방향탐지 방식 가운데 진폭 비교 방향탐지 방식과 인터페로미터(interferometer) 방향탐지 방식이 보편적으로 사용되며, 우수한 방향탐지 정확도가 요구되는 경우 인터페로미터 방향탐지 방식이 우선적으로 사용될 수 있다. 인터페로미터 방향탐지 방식은 방향탐지 안테나

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received July 21, 2014 ; Revised September 1, 2014 ; Accepted September 4, 2014. (ID No. 20140721-12S)

· Corresponding Author: Beom-Jun Park (e-mail: ibada@add.re.kr)

간의 도착 시간 차에 따른 위상차를 이용하여 입사된 신호에 대한 방위 값을 산출한다. 이 때 여러 개의 방향탐지 안테나를 사용하여 동시에 방향탐지 안테나들 간의 위상차를 측정하여 방위 값을 산출하면 보다 우수한 방향탐지 정확도를 확보할 수 있다<sup>[2]</sup>.

VHF 대역 다채널 위상 판별기가 적용될 방향탐지 장치는 방향탐지 안테나로부터 입력된 고주파 신호를 VHF 대역의 IF(Intermediate Frequency) 신호로 주파수 하향 변환한다. 지금까지는 2개의 IF 신호에 대한 위상차를 측정하는 VHF 대역 위상 판별기를 해외에서 도입하여 사용하였고, 다채널로 구성된 방향탐지 장치의 경우, 여러 개의 위상 판별기를 조합하여 사용하였다. 위상 판별기는 인터페로미터 방향탐지 장치의 핵심 부품으로, 국산화가 반드시 필요한 부품이다. 본 연구에서는 방향탐지 장치 관련 핵심 부품에 대한 해외 의존도를 줄이기 위해 VHF 대역 다채널 위상 판별기를 개발하였다.

## II. VHF 대역 다채널 위상 판별기 설계

그림 1은 안테나 4개를 사용하는 트리플 베이스 라인 인터페로미터 방향탐지 장치의 개략적인 구성도이다. 그림 1에서 다채널 위상 판별기는 광대역 수신기로부터 VHF 대역의 4개 IF 신호를 입력 받아 4개의 IF 신호 간의 위상차( $\phi_1, \phi_2, \phi_3$ )를 동시에 고속으로 측정하여야 한다.

인터페로미터 방향탐지 장치는 입사 신호의 방향 값을 위상 판별기에서 측정된 위상차와 방위 보정 map을 이용하여 산출한다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서 제안한 다채널 위상 판별기는 입력된 4개의 IF 신호에 대한 3개의 위상차를 동시에 측정할 수 있



그림 1. 트리플 베이스라인 인터페로미터 방향 탐지 장치  
Fig. 1. Direction finding equipment using triple baseline interferometer.

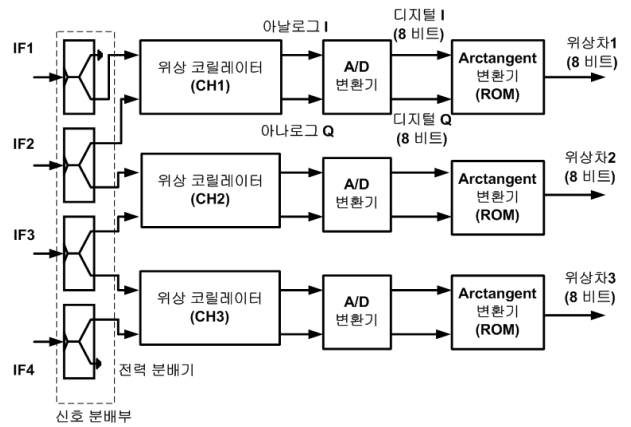


그림 2. 다채널 위상 판별기 블럭도  
Fig. 2. Block diagram of multi-channel phase discriminator.

도록 다채널의 병렬 구조로 설계하였다. VHF 대역 다채널 위상 판별기에 대한 블럭도는 그림 2와 같다. 그림 2에 보는 바와 같이, 다채널 위상 판별기는 신호 분배부, 위상 코릴레이터, A/D 변환기(Analog-to-Digital Converter), Arctangent 변환기로 구성된다. 신호 분배부는 4개의 입력 IF 신호를 동일한 크기 및 동위상으로 분배하여 채널별 위상 코릴레이터로 출력한다. 위상 코릴레이터는 입력된 IF 신호를 코릴레이터 동작에 적합한 레벨로 증폭하고, 증폭 과정에서 발생하는 하모닉 성분은 LPF(Low Pass Filter)를 사용하여 제거한 후, 각 채널별로 입력된 IF 신호 간의 위상차를 아날로그 I, Q 신호로 변환한다. A/D 변환기는 아날로그 I, Q 값을 8 비트 디지털 값으로 변환하고, ROM(Read Only Memory)으로 구현된 Arctangent 변환기는 입력된 디지털 I, Q 값을 이용하여 8 비트의 위상차 값을 출력한다.

다채널 위상 판별기에서 가장 중요한 부분은 위상 측정 정확도를 좌우하는 위상 코릴레이터이다. 위상 코릴레이터는 입력된 2개 IF 신호의 위상차에 대응되는 아날로그 I, Q 신호를 출력한다. 일반적으로 위상 코릴레이터를 구성하는 방식에는 4개의 하이브리드(180도 1개, 90도 3개)를 이용하여 구성하는 방식, 2개의 전력분배기와 2개의 하이브리드(180도 1개, 90도 1개)를 이용하는 방식, 2개의 믹서와 1개의 전력분배기 및 90도 하이브리드를 이용하는 방식이 있다<sup>[3]</sup>. 본 논문에서는 위상 코릴레이터를 구성하는데 필요한 소자 수를 줄일 수 있는 2개의 믹서와

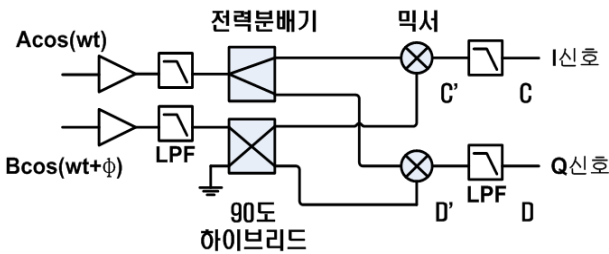


그림 3. 위상 코릴레이터 블럭도  
Fig. 3. Block diagram of phase correlator.

각각 1개의 전력 분배기 및 90도 하이브리드를 이용하는 I, Q 믹서 방식을 적용하였다.

본 논문에서 적용한 위상 코릴레이터의 개략적인 구조를 그림 3에 보였다. 이 때 위상 코릴레이터 초단에는 신호 세기가 변동될 경우에도 입력 신호를 믹서 구동에 필요한 일정한 신호 세기로 증폭하기 위해 리미팅 증폭기를 적용하였다. 그리고 증폭기 후단의 LPF는 증폭기의 하모닉 성분을 160 MHz 입력 주파수 기준으로 30 dBc 이상 제거하기 위해 필터 차수를 7차로 결정하였고, 칩 형태의 L, C 소자를 이용하여 구현하였다.

위상 코릴레이터의 기본 원리는 다음과 같다. 그림 3의 위상 코릴레이터 입력 단에 서로 다른 크기 A, B와 임의의 위상차 (φ)를 가진 두 신호(A cos(wt), B cos(wt + φ))가 입력될 경우, 위상 코릴레이터에서 믹서 출력단 C 지점과 D 지점의 신호를 수식화하면 다음과 같다.

$$C' = \frac{AB}{2} [\cos(2wt + \phi) + \cos\phi] \quad (1)$$

$$D' = \frac{AB}{2} [\sin(2wt + \phi) + \sin\phi] \quad (2)$$

위상 코릴레이터에서 LPF를 통과한 최종 출력인 C지점과 D지점에서는 I 신호 =  $\frac{AB}{2} \cos(\phi)$ , Q 신호 =  $\frac{AB}{2} \sin(\phi)$ 가 된다. I 신호와 Q 신호의 비는 즉  $\frac{Q}{I} = \tan(\phi)$ 이므로, 이 결과에 arctangent( $\tan^{-1}$ )를 취하면, 두 입력 신호의 신호 세기 차에 관계없이 두 입력 신호에 대한 위상차 (φ)가 구해진다.

한편, 위상 판별기의 측정 정확도를 유지하기 위해서는 위상 판별기에서 출력하는 I, Q 신호가 정확해야 한다.

정확한 출력 I, Q 신호를 얻기 위해선 그림 2의 신호 분배부와 위상 코릴레이터의 I, Q 수신 경로를 구성하는 RF 소자들의 위상 정합(phase balance) 특성이 유지되어야 한다. 신호 분배부와 위상 코릴레이터를 구성하는 RF 소자들의 위상 정합 특성이 유지되지 않으면, 위상 코릴레이터의 출력 I, Q 신호에 오차가 발생한다.

하지만 현실적으로 I, Q 수신 경로를 구성하는 신호 분배부와 위상 코릴레이터의 필터나, 전력분배기, 90도 하이브리드 등의 소자들이 완벽한 위상 정합 특성을 갖는 것은 불가능하며, 어느 정도의 위상 정합 오차를 갖는다. 먼저 신호 분배부의 경우, 적용된 상용 전력 분배기의 출력 포트간 위상 정합 특성은 1~2도 수준이다. 다음으로 위상 코릴레이터의 경우, 상용 90도 하이브리드의 위상 정합 특성은 160 MHz 기준으로 1.5도 이하이며, 전력분배기의 출력 포트간 위상 정합은 1~2도 수준이다. 그리고 증폭기 후단 LPF도 칩 L, C값의 오차 범위에 따라 위상 정합 특성이 달라질 수 있다. I, Q 수신 경로의 두 LPF간 위상 정합 특성을 파악하기 위해 ADS<sup>[4]</sup>를 이용하여 시뮬레이션하였다. 이 때 한 필터 대비 다른 필터의 L, C 값 범위 오차를 전체적으로 -1~+1%까지 0.25% 단위로 변경해 가며 위상 정합 특성을 시뮬레이션하였고, 그 결과를 그림 4에 보였다.

그림 4의 시뮬레이션 결과에서 L, C 범위에 따른 필터간 위상 정합 특성은 두 필터의 L, C값이 동일할 경우, 위상 정합 오차는 발생하지 않는다. 160 MHz 주파수 기준

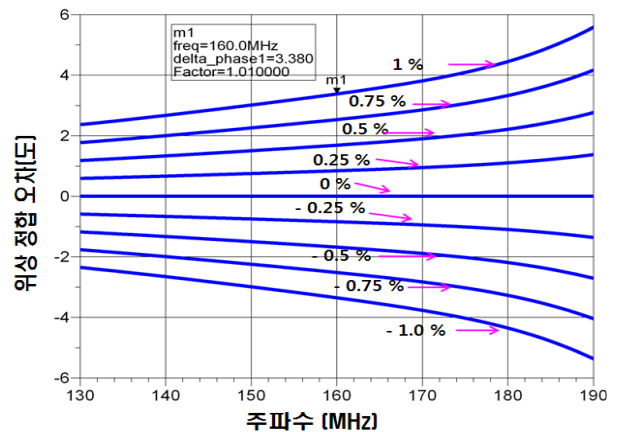


그림 4. 입력 LPF간 위상 정합 시뮬레이션 결과  
Fig. 4. Simulation result of phase balance of input LPF.

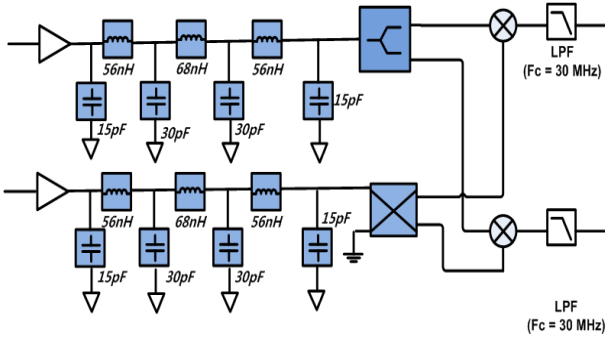


그림 5. 위상 코릴레이터 회로도  
Fig. 5. Circuit of phase correlator.

으로 L, C값의 오차 범위가  $\pm 0.25\%$  이내인 경우, 약 0.8도의 위상 정합 오차가 발생하며,  $\pm 0.5\%$ 에서는 약 1.7도,  $\pm 0.75\%$ 에서는 약 2.5도,  $\pm 1\%$ 에서는 약 3.4도의 위상 정합 오차가 발생할 수 있다.

그림 5에 주어진 위상 코릴레이터의 회로도에 대해 이상적인 소자로 구성된 경우와 실제 소자 값을 적용한 경우의 위상 코릴레이터 출력 I, Q 신호를 ADS<sup>[4]</sup>를 이용하여 시뮬레이션하였다. 실제 소자 값을 적용한 경우의 시뮬레이션 조건은 전력분배기의 위상 오차는 1.5도, 90도 하이브리드의 위상 오차는 1.5도, 두 입력 LPF간 L, C값의 범위 오차는 1%로 각각 설정하였다. 그리고 위상 코릴레이터의 나머지 부품인 증폭기와 믹서, 출력 LPF, 그리고 부품 연결에 사용된 전송 선로 등에 대한 위상 정합 특성은 시뮬레이션을 단순화하기 위해 이상적인 값을 적용하였다. 이와 같은 조건에서 위상 코릴레이터의 입력 위상차를 0도에서 360도까지 변화시켜가며, 시뮬레이션한 결과를 그림 6에 보였다.

그림 6의 시뮬레이션 결과에서 보는 바와 같이 이상적인 소자로 구성된 경우와 실제 소자 값을 적용한 경우, 모두 입력된 위상차가 변화하면 위상 코릴레이터에서 출력되는 I, Q 신호의 크기가 변화한다. 이 때 두 경우, 모두 I, Q 신호와 위상차 ( $\phi$ )가 서로 1:1로 대응되기 때문에 I, Q 신호만 측정하면 대응되는 위상차 값을 모호성 없이 판별할 수 있다. 하지만 실제 소자 값을 적용한 경우, 부품들의 위상 오차로 인해 이상적인 경우, 대비 출력 I, Q 신호에 오프셋(offset)이 발생하고, 이 값을 동위상(0도) 입력 조건에서 위상차 오차로 환산하면 약 6도가 된다. I, Q

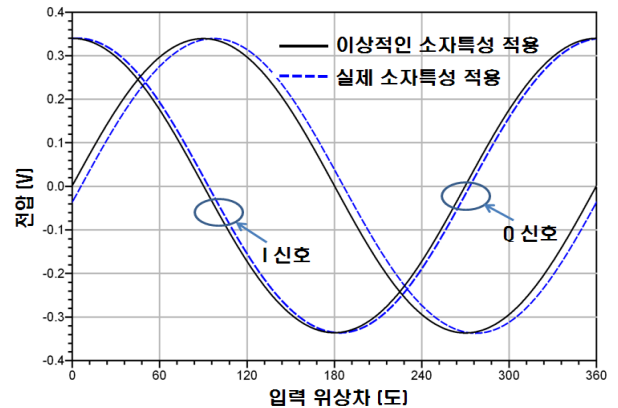


그림 6. 위상 코릴레이터 시뮬레이션 결과  
Fig. 6. ADS simulation result of phase correlator.

오프셋에 따른 위상 오차를 보정하지 않으면 위상 판별기는 정확한 위상 측정 정확도를 확보하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 위상 코릴레이터에서 발생하는 위상 오차를 보정하기 위해 디지털 LUT(Look Up Table)를 적용하였다. Arctangent 변환기는 디지털 LUT로서, 측정된 I, Q 신호에 대응되는 8 비트의 위상차 값을 출력할 수 있게 ROM을 적용하였다. 그리고 ROM을 이용한 LUT를 적용함으로써 위상 오차를 보정할 수 있을 뿐만 아니라, 위상 연산 과정을 생략하게 되어 고속으로 위상차 값을 출력할 수 있다. Arctangent 변환기는 측정된 위상 값을 고속으로 출력하기 위해 Spansion 사의 60 ns 이하의 응답 (Access) 속도와 4 Megabit의 용량을 갖는 AM29F040B ROM을 사용하였다. 이 때 ROM의 입력 어드레스는 16 비트의 I, Q 신호이고, 출력은 8 비트의 위상차 값이므로 한 채널당 메모리 용량은 약 16.8 kbit이다. 그리고 LUT는 360도 범위의 위상값을 8 비트로 표현하기 때문에 약 1.4도의 분해능을 갖는다. 한편, 아날로그 I, Q 값을 디지털 값으로 변환하기 사용한 A/D 변환기는 Analog Devices 사의 50 MSPS(Million Samples Per Second)를 갖는 8 비트 A/D 변환기를 사용하였다.

### III. 제작 및 측정

제작된 다채널 위상 판별기의 크기는 233 mm×170 mm이며, 제작 형상은 그림 7에 보였다. 먼저 제작된 다채널 위상 판별기의 보정전 위상차 측정 정확도를 A/D 변환기

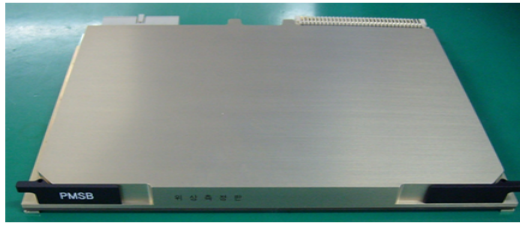


그림 7. 제작된 다채널 위상 판별기  
Fig. 7. The fabricated multi channel phase discriminator.

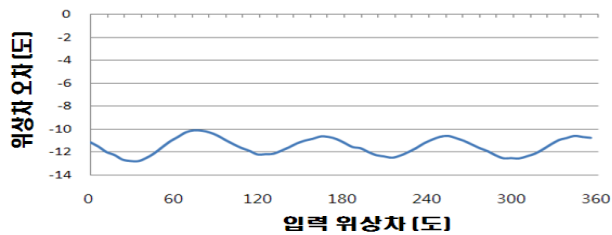


그림 8. 보정전 다채널 위상 판별기 위상차 정확도 측정 결과  
Fig. 8. The measured phase accuracy of the fabricated multi channel phase discriminator without calibration.

앞단에서 시험 주파수인 160 MHz에 대해 입력 위상차를 0도에서 360도까지 변경하면서 측정하였고, 그 측정 결과를 그림 8에 나타내었다. 보정전 측정 결과에서 보는 바와 같이 위상차 측정 오차는  $-10 \sim -12.8$ 도 범위로 측정되었고, 평균적으로  $-11.4$ 도의 오프셋된 측정 오차를 갖는다. LUT에 측정 오차 보상을 위한  $+11.4$ 도 오프셋 값을 반영하면  $-1.4 \sim -1.3$ 도 범위의 개선된 위상차 측정 정확도를 얻을 수 있다. 그리고 시뮬레이션 결과, 대비 측정 결과의 위상 오차가 증가한 이유는 증폭기나 믹서, 출력 LPF, 전송 선로의 위상 정합 특성을 이상적이라고 가정함에 따른 오차와 제작 과정에서 적용한 RF 소자 값들이 시뮬레이션보다 더 큰 위상 정합 오차 값을 가졌기 때문이라고 판단된다.

제작된 위상 코릴레이터의 위상 오차를 보상하기 위해 보정(calibration)을 수행하였다. 보정을 위해 이상적인 I, Q 값을 LUT에 적용한 후, 시험 주파수인 160 MHz에 대해 입력 위상차를 0도에서 360도까지 변경하며 제작된 다채널 위상 판별기의 위상차를 측정하였다. 그림 8의 보정전 측정 결과에서 보는 바와 같이, 위상 판별기의 위상차 오차는 입력 위상차 변화에 관계없이 균일하게 측정

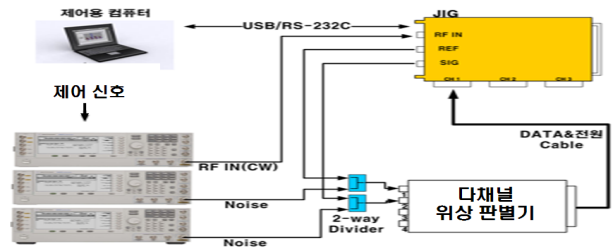


그림 9. 다채널 위상 판별기 시험 구성  
Fig. 9. Test set-up of multi channel phase discriminator.

되었기 때문에, 이 오프셋된 에러 값을 위상 판별기의 이상적인 LUT에 보정 값으로 적용하였다. 만약 위상 판별기의 위상차 오차가 그림 8의 측정된 결과와 다르게 균일하지 않을 경우에는 단순한 오프셋 오차 보정을 통해선 정확한 측정 결과를 얻을 수 없다. 이때에는 입력 위상차에 따른 I, Q값을 측정 후, 측정된 I, Q값에 따라 출력 위상차를 산출하도록 LUT를 만들어야만 한다.

그림 9에 나타난 시험 구성도에 따라 보정된 다채널 위상 판별기의 위상차 측정 정확도를 시험하였다. 이 때 시험 주파수는 160 MHz이며, SNR 조건은 30 dB를 유지하였고, 입력 위상차는 0도에서 360도까지 변화시켜 가며 1.4도 단위로 측정하였다. SNR 시험조건을 유지시키기 위해  $-10$  dBm의 지속파(Continuous wave) 신호를 주입한 후, 별도로 준비한 Agilent사 E4432B 신호발생기 2 대에서 15 MHz 대역폭을 갖는  $-40$  dBm 크기의 랜덤 잡음 신호를 독립

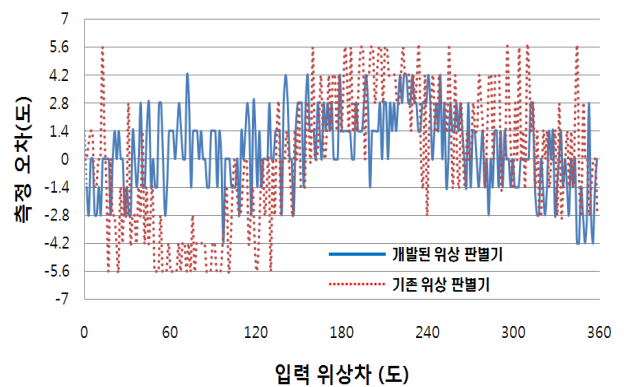


그림 10. 위상 판별기와 기존 제품의 위상차 정확도 측정 결과  
Fig. 10. Measured phase accuracy of fabricated phase discriminator and conventional product.

적으로 발생시켰다. 그리고 입력 신호 간의 위상차는 Lorch Microwave사의 9 비트 위상 천이기인 DP-2-9-160-X2를 이용하여 발생하였다.

제작된 다채널 위상 판별기의 위상차 측정 정확도 성능과 해외 제품<sup>[5]</sup>의 성능을 서로 비교하기 위해 동일한 조건에서 시험을 수행하였다. 그림 10은 개발된 다채널 위상 판별기와 기존 해외 제품에 대한 위상차 정확도 측정 결과로서, 실선은 개발된 위상 판별기의 측정 결과이고, 점선은 해외 제품의 측정 결과이다. 측정 결과, 개발된 다채널 위상 판별기의 위상차 측정 정확도는 2.0도 RMS(Root Mean Square)이고, 해외 제품의 위상차 측정 정확도는 3.3도 RMS로서, 개발된 위상 판별기가 보다 우수한 성능을 가짐을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 인터페로미터 방향탐지 장치에서 사용되는 VHF 대역 다채널 위상 판별기를 개발하였다. 본 논문의 위상 판별기는 해외 제품을 대체하기 위해 동작 주파수를 160 MHz로 설계하였고, 위상 판별기의 위상 측정 정확도를 확보하기 위해 보정용 디지털 LUT를 적용하였다. 제작된 위상 판별기의 위상 측정 정확도는 30 dB SNR 조건에서 2도 RMS이며, 기존의 해외에서 도입하여

사용한 위상 판별기에 비해 성능이 우수함을 확인하였다.

개발된 위상 판별기는 기존의 해외 제품에 비해 우수한 측정 정확도를 가지므로, 다채널 인터페로미터 방향탐지 장치에 적용 가능할 것으로 기대된다. 그리고 향후 위상 판별기의 측정 정확도 유지에 필요한 최소 SNR을 향상시키는 부분에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

#### References

- [1] 전병태, 박영미, 최도원, 박문복, 임중수, "항공기 외장형 전자전 방향탐지 장치 개발", 한국군사과학기술학회지 5(3), pp. 98-104, 2002년 11월.
- [2] 임중수, 정철구, 채규수, "원형 배열 복합 방식을 이용한 초고주파 방향탐지 기술", 한국전자과학회논문지 16(6), pp. 549-555, 2005년 6월.
- [3] J. B. Tsui, *Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- [4] Agilent Technologies, Inc., *Advanced Design System 2011. 10 Version*.
- [5] ST Oelektron Corp., "IFS-9830 160 MHz digital phase detection system".

#### 박 범 준



합성기 등

1994년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)  
 2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2001년 1월~현재: 국방연구소 선임연구원  
 [주 관심분야] 초고주파 수신기, 주파수

#### 이 정 훈



1996년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학사)  
 1998년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)  
 1998년 2월~현재: 국방연구소 선임연구원  
 [주 관심분야] 방향탐지, 전자전 등

이 규 송



1989년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)

1991년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학석사)

2010년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)

1991년 2월 ~ 현재: 국방연구소 책임연구

원

[주 관심분야] 초고주파 능동 및 수동 회로 설계, 방향탐지 시스템, 전자전 시스템