

## 3소자 및 4소자 위상인터페로미터 방탐시스템의 방탐모호성분석

이정훈<sup>\*,1)</sup> · 우종명<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 전자전체계개발단

<sup>2)</sup> 충남대학교 전자공학과

### The Direction Finding Ambiguity Analysis for 3 Element and 4 Element Phase Interferometer DF System

Jung-Hoon Lee<sup>\*,1)</sup> · Jong-Myung Woo<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *The Electronic Warfare PEO, Agency for Defense Development, Korea*

<sup>2)</sup> *Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University, Korea*

(Received 28 November 2013 / Revised 23 April 2014 / Accepted 13 June 2014)

#### ABSTRACT

In this paper, we have proposed a novel method which can analysis the direction finding ambiguity analysis for array geometry in 3 channel and 4 channel multiple baseline direction finding system. Generally, the direction finding ambiguity in the 3 element and 4 element phase interferometer direction finding system is calculated by the simulation for the array spacing or by the probability with the selected antenna array spacing. There are some restrictions to obtain the ambiguity of direction finding system in these methods. The former performs a simulation with every antenna array spacing and the latter calculates the ambiguity with the selected antenna array spacing. To overcome those restrictions, This paper proposed the novel method to calculate the ambiguity using the imaginary antenna array spacing and the phase difference prior to the modular operation in direction finder. Using the proposed method, we obtain the ambiguity probability for each of array geometry composed of multiple baseline. After performing the simulation with the selected antenna array spacing to verify the proposed method, we compared the calculated result data with the simulation data.

Key Words : Direction Finding Ambiguity Analysis, Multiple Baseline Direction Finding System, Phase Interferometer

#### 1. 서론

3소자 및 4소자로 구성되는 멀티베이스라인 위상인터페로미터 방탐시스템은 0.1°~3°[RMS]의 방탐정확도<sup>[1]</sup>가 구현가능하다. 이러한 이유 때문에 ES(Electronic Support)분야에서 위상인터페로미터 방탐시스템은 폭 넓게 사용되어져 오고 있다. 방탐시스템의 출력위상차

\* Corresponding author, E-mail: ifrain@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

오차가 큰 경우 방탐모호성이 발생한다. 방탐모호성은 방탐시스템의 방탐정확도를 규정할 때 중요한 요소이다<sup>[2]</sup>. 방탐모호성은 방탐시스템의 안테나배열간격 선정 시 시뮬레이션<sup>[3]</sup>이나 확률적방법<sup>[4]</sup>에 의해 구할 수 있다.

전자는 안테나 배열 간격마다 시뮬레이션을 수행해야 하고, 후자는 선정된 안테나 배열간격으로 방탐모호성을 구해야 하는 제한점이 있다. 이러한 제한점을 해결하기 위해 본 논문에서는 안테나 배열간격을 결정하기 전 방탐모호성확률 정도를 사전에 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 먼저 가상의 안테나 배열간격으로 방탐모호성확률을 구한 후 방탐시스템 성능에 적합한 안테나 배열간격을 선정할 수 있도록 한다. 이를 위해 제안된 방법은 방탐시스템의 모듈러연산 전 출력위상차와 실제의 안테나배열간격에서 확장된 가상의 안테나 배열간격을 사용하여 새 좌표계에서 방탐모호성을 구한다. 본 논문에서는 제안된 방법을 사용하여 3소자 멀티베이스라인을 구성하는 End phase 및 Mid phase대해 분석하였으며, 4소자 멀티베이스라인의 배열구조 중 Additive Mid Phase, Hybrid Mid Phase, Cascaded End Phase 및 Multiple End phase를 선정하여 방탐모호성분석을 수행하였다. 또한, 제안된 방법의 검증을 위해 3소자 및 4소자 멀티베이스라인을 구성하는 안테나 배열간격을 선정하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 이 결과와 제안된 방법에 대해 방탐모호성을 비교분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 3소자 위상인터페로미터

3소자 위상인터페로미터 배열에 대해 Fig. 1에 나타내었다.

신호의 파장이  $\lambda$ 이고 입사되는 각이  $\theta$ 일 때, 두 안테나 배열 간격이  $d_i$ 인 위상차는 다음으로 주어진다.

$$\psi_i = \frac{2\pi}{\lambda} d_i \sin\theta, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

또한, 방탐시스템에서 출력되는 위상차는  $2\pi$ 모듈러연산에 의해 출력되기 때문에 식 (1)은 다음과 같은 위상차로 출력된다<sup>[5]</sup>.

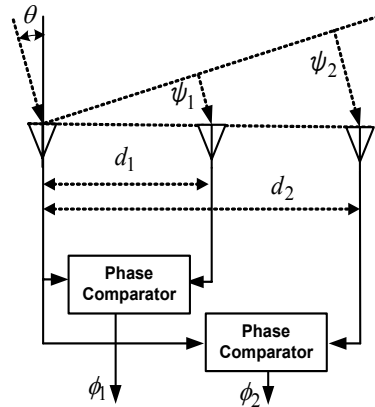


Fig. 1. Three element interferometer

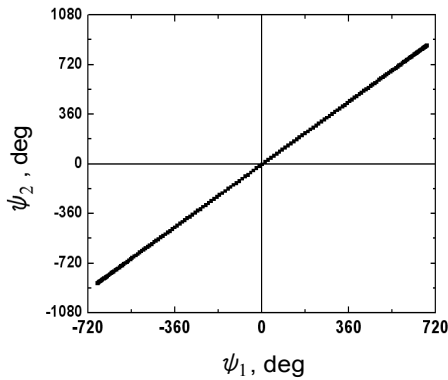
$$\phi_i = \psi_i \text{ mod } 2\pi \quad (2)$$

여기서,  $\psi_i = \phi_i + 2\pi M_i$ ,  $0 \leq \phi_i < 2\pi$ ,  $M_i$ 는 정수이다. FOV(Field Of View)가  $|\theta| < \pi/2$ 일 때, 안테나 배열간격이  $d_1 = 1.9\lambda$ ,  $d_2 = 2.4\lambda$ 으로 구성된 방탐시스템에서 출력하는  $\psi_1$  및  $\psi_2$ 에 대해 Fig. 2(a)에 도시하였다. Fig. 2(b)는  $2\pi$ 모듈러연산으로 생성된 위상차  $\phi_1$  및  $\phi_2$ 에 대해 도시한 것이다. Fig. 2(b)에서  $R$ 은 방탐모호성경계선과의 거리이고,  $\eta$ 는 위상차가 생성한 직선의 기울기로  $\eta = \text{atan}(d_2/d_1)$ 이다. 방탐모호성이 발생하지 않기 위해 방탐시스템의 출력위상차는 위상차선과 방탐모호성경계선과의 거리  $R/2$ 이내에 존재해야 됨을 알 수 있다<sup>[3,4]</sup>.

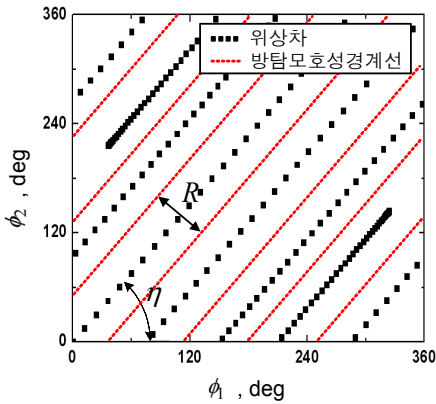
본 논문에서는 방탐모호성을 구하기 위해 방탐시스템에서 출력하는  $2\pi$ 모듈러연산하지 않은 위상차에 대해 식 (3)과 같이 회전변환을 수행한다.

$$\begin{bmatrix} \psi'_1 \\ \psi'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,  $\alpha = \pi/2 - \tan(d_2/d_1)$ ,이다. Fig. 3은 Fig. 2(a)에 대해 회전변환을 수행한 결과이다. Fig. 3에서 출력 위상차가  $\pm R/2$ 를 초과하면 방탐모호성이 발생하는 영역이므로, 새좌표계에서 방탐모호성은  $\psi'_1$ 의 위상차 오차 성분에 의해서만 결정된다. 따라서,  $\psi'_2$ 의 위상차 오차 성분은 방탐모호성과 관련이 없기 때문에 고려대상에서 제외된다.



(a) phase-difference diagram



(b) phase-difference diagram after  $2\pi$  modulation

Fig. 2. Three-element interferometer and phase-difference diagram ( $|\theta| < \pi/2$ ,  $d_1 = 1.9\lambda$ ,  $d_2 = 2.4\lambda$ )

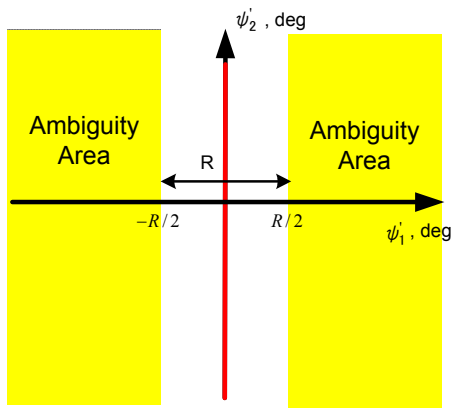


Fig. 3. Phase-difference diagram after rotation of coordinate axes

본 논문에서는 3소자 위상인터페로미터 방탐시스템의 배열구조 중 End phase과 Mid phase에 관해 분석을 수행하였다. 이들 배열구조는 Fig. 4에 도시하였다. End phase의 경우 오른쪽이나 왼쪽의 안테나가 기준 안테나로 사용될 수 있다. Mid phase의 경우 가운데 안테나가 공통으로 사용되는 구조이다.

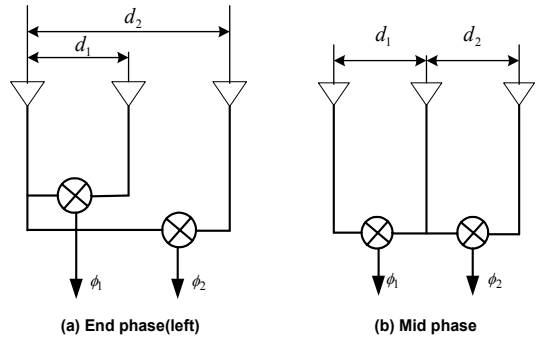


Fig. 4. Array configurations for three-element interferometer

3소자 멀티베이스라인 방탐시스템의 출력위상차는 위상차오차가 없는 항  $\psi_{1,n}$ ,  $\psi_{2,n}$ 과 위상차오차 항  $\Delta\psi_1$ ,  $\Delta\psi_2$ 으로 구성될 수 있으므로, 각각의 위상차는  $\psi_1 = \psi_{1,n} + \Delta\psi_1$ ,  $\psi_2 = \psi_{2,n} + \Delta\psi_2$ 이 된다. 여기서, 위상차오차는 방탐시스템내부에서만 발생한다고 가정하였으며, 새좌표계에서  $\psi'_1$ 의 성분은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \psi'_1 &= \cos\theta\psi_1 - \sin\theta\psi_2 \\ &= \{\cos\theta\psi_{1,n} - \sin\theta\psi_{2,n}\} + \{\cos\theta\Delta\psi_1 - \sin\theta\Delta\psi_2\} \\ &= \psi_{1,n} + \Delta\psi_1 \end{aligned} \quad (4)$$

새좌표계에서도 식 (4)와 같이 위상차오차가 없는 항과 위상차오차에 의한 항으로 구성된다. 계산을 단순화하기 위해 3소자 위상인터페로미터 배열구조에서 각 채널은 독립이고, 위상차오차의 평균이 0인 가우시안 분포를 가진다고 가정하였다. 또한, 수신신호의 편파, 수신신호세기 및 방탐시스템에서의 온도변화는 고려하지 않았다. 이때 위상차에 대한 분산은 다음과 같다고 가정하였다.

$$\sigma_{\Delta\psi_1}^2 = \sigma_{\Delta\psi_2}^2 = \sigma_{\Delta\psi}^2 \quad (5)$$

새 좌표계에서 위상차오차에 대한 분산은 식 (5)를

이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\Delta\psi_1}^2 = \begin{cases} \sigma_{\Delta\psi}^2(1 - \cos(\alpha)\sin(\alpha)), & \text{for End phase} \\ \sigma_{\Delta\psi}^2(1 + \cos(\alpha)\sin(\alpha)), & \text{for Mid phase} \end{cases} \quad (6)$$

여기서,  $d_2 > d_1 \neq 0$  이다. Fig. 3의 새좌표계에서  $\Delta\psi_1$ 가  $-R/2 < \Delta\psi_1 < R/2$ 라면 방탐모호성은 존재하지 않기 때문에 모호성없는 확률은 다음과 같다.

$$P_{noambig}\{-R/2 < \Delta\psi_1 < R/2\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta\psi_1}} \int_{-R/2}^{R/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_{\Delta\psi_1}^2}\right) dx \quad (7)$$

또한, 상관이 없는 두 채널에서 위상차분산과 SNR (Signal to Noise Ratio)의 관계는 식 (8)과 같이 주어진다.<sup>[6~8]</sup>

$$\sigma_{\Delta\psi}^2 = 1/SNR \text{ in radians} \quad (8)$$

각 채널의 SNR이 동일한 경우 식 (8)을 사용하여 정리한 모호성확률은 식 (9)와 같다.

$$P_{ambiguity} = 1 - P_{noambig} = \text{erfc}\left(\frac{R}{2\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{S}{N}\right)_x}\right) \quad (9)$$

여기서,

$$\left(\frac{S}{N}\right)_x^{-1} = \begin{cases} (S/N)^{-1}(1 - \cos(\alpha)\sin(\alpha)), & \text{for End phase} \\ (S/N)^{-1}(1 + \cos(\alpha)\sin(\alpha)), & \text{for Mid phase} \end{cases}$$

이고,  $\text{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-t^2} dt$  이다. 식 (9)를 적용하여 방탐모호성을 계산하기 위해  $\alpha$ 가  $15.64^\circ$ 인 안테나 배열간격  $d_1 = 0.7\lambda$ ,  $d_2 = 2.5\lambda$ 로 계산한 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

방탐모호성 계산 결과  $R$  및 SNR이 증가할수록 방탐모호성확률이 낮으며, End phase의 배열구조가 Mid phase보다 모호성 확률이 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한, 계산된 결과를 검증하기 위해 검증에 필요한 안테나의 배열간격과  $R$ 은 축변환방법<sup>[10]</sup>을 사용하여 구하였다.  $R = 44.6^\circ$ 인 안테나 배열간격  $d_1 = 0.5\lambda$ 와  $d_2 = 4\lambda$ 로  $|\theta| < \pi/2$ 의 범위에서 시뮬레이션결과를 Fig.

5의  $R$ 이 약  $44.6^\circ$ 인 지점에 도시하였다. 시뮬레이션수행 결과는 식 (9)의 계산결과와 유사함을 알 수 있다. 또한, 계산에 사용된 안테나 배열간격의 방탐모호성경계선간 거리  $R$ 이  $41.6^\circ$ 이므로, Fig. 5에서 이지점외의 방탐모호성경계선간 거리에 대한 방탐모호성확률은 가상의 안테나 배열간격이 된다. 가상안테나 배열간격에 의한 방탐모호성확률이므로 이를 만족하는 안테나 배열간격이 존재하지 않을 수 있다. 하지만, 임의의 방탐모호성확률 선정 후 Fig. 5를 참조하여 안테나 배열간격을 선정할 수 있다. 예를 들자면, SNR이 22[dB]에서 방탐모호성확률이 약  $10^{-4}$ 정도를 충족시키기 위해서는 축변환방법<sup>[10]</sup>에 의해 방탐모호성경계선간 거리  $R$ 이  $40^\circ$ 이상인 안테나 배열간격을 선택하면 된다. 따라서, 방탐모호성확률을 충족하는 배열구조는 End phase와 Mid phase가 가능함을 알 수 있다.

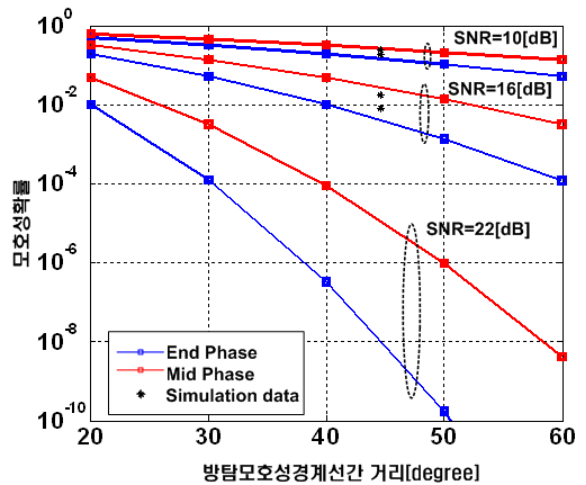


Fig. 5. Ambiguity probability for each three-element interferometer( $d_1 = 0.7\lambda$ ,  $d_2 = 2.5\lambda$ ,  $\alpha \approx 15.64^\circ$ )

### 2.2 4소자 위상인터페로미터

4소자로 구성되는 위상인터페로미터 방탐시스템은 3개의 출력위상차를 사용한다. Fig. 6은 3개의 출력위상차로 도시한 것이다. 3소자 위상인터페로미터와 동일한 방법으로 회전변환을 수행하기 위해 위상차는  $\phi_1$ 축으로  $\alpha$ [deg]회전과  $\phi_2$ 축으로  $\beta$ [deg]회전이 필요하다.

4소자 위상인터페로미터 방탐시스템의  $2\pi$ 모듈러연산된 출력위상차에 대한 회전변환은 식 (10)과 같이 수행할 수 있다.

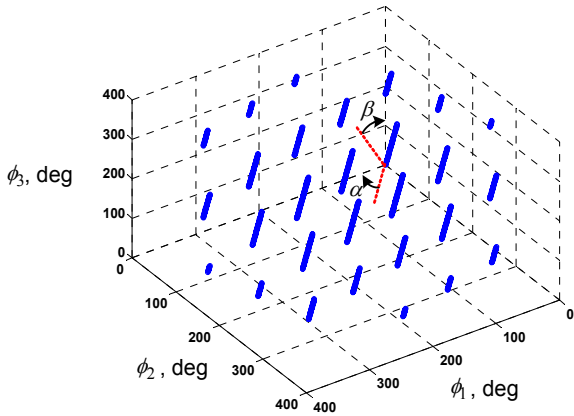


Fig. 6. Phase-difference diagram after  $2\pi$  modulation ( $d_1 = 3\lambda, d_2 = 5\lambda, d_3 = 8.5\lambda \quad |\theta| < \pi/2$ )

$$\begin{bmatrix} \phi'_1 \\ \phi'_2 \\ \phi'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha)\cos(\beta) & \cos(\alpha)\cos(\beta) & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\sin(\beta) & -\cos(\alpha)\sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $\alpha = -\tan^{-1}(d_1/d_2), \beta = -\text{atan}(\sqrt{d_1^2 + d_2^2}/d_3)$ ,  $d_3 > d_2 > d_1 \neq 0$ 이다. 회전변환에 의해 새좌표계에서 위상차가 생성한 직선은  $\phi'_3$ 과 평행이 되고,  $(\phi'_1, \phi'_2)$ 평면에 투영된 위상차는 Fig. 7에서와 같이 하나의 점으로 형성된다. Fig. 7에서 방탐모호성경계선과 거리는  $R$ 이기 때문에, 위상차오차가  $R/2$ 를 넘는다면 방탐모호성이 발생할 것이다. 새좌표계에서 방탐모호성은  $\phi'_1$  및  $\phi'_2$ 의 위상차오차 성분에 의해서만 결정되므로,  $\phi'_3$ 축은 방탐모호성과 관련이 없기 때문에 고려대상에서 제외된다.

3소자 위상인터페로 방탐시스템과 동일한 과정으로 방탐모호성을 구하기 위해,  $2\pi$ 모듈러연산 전 위상차로 회전변환한 위상차를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8에서 반지름  $R/2$ 이상은 방탐모호성영역이 된다.

4소자 위상인터페로미터 방탐시스템의 배열구조는 많은 수의 조합이 가능하다. 하지만, 본 논문에서는 Goodwin<sup>[6]</sup>이 분류한 것 중 4가지 구조에 대해 분석을 수행할 것이다. 4가지 구조에 대한 것은 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9에서 Multiple End Phase는 하나의 기준안테나에서 3개의 배열간격을 두고 위상차를 추출하는 방식이고, Additive Mid Phase는 안테나의 순서대로 배열간격을 설정하여 3개의 위상차를 추출하는 방

식이고, Cascaded End Phase는 양끝단의 안테나를 기준으로 배열간격을 설정하여 위상차를 추출방식이며 Hybrid Mid Phase는 3소자 인터페로미터의 구성에서 Mid Phase와 End phase가 혼합으로 구성되어 위상차를 추출하는 방식이다. 이들 배열구조에서 출력위상차에 오차가 존재하면,  $\psi_1 = \psi_{1,n} + \Delta\psi_1, \psi_2 = \psi_{2,n} + \Delta\psi_2, \psi_3 = \psi_{3,n} + \Delta\psi_3$ 이므로 새 좌표계에서  $\psi'_1$  및  $\psi'_2$ 는 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \psi'_1 &= \cos(\alpha)\psi_1 + \sin(\alpha)\psi_2 = \psi'_{1,n} + \Delta\psi'_1 \\ \psi'_2 &= -\sin(\alpha)\cos(\beta)\psi_1 + \cos(\alpha)\cos(\beta)\psi_2 + \sin(\beta)\psi_3 \\ &= \psi'_{2,n} + \Delta\psi'_2 \end{aligned} \quad (11)$$

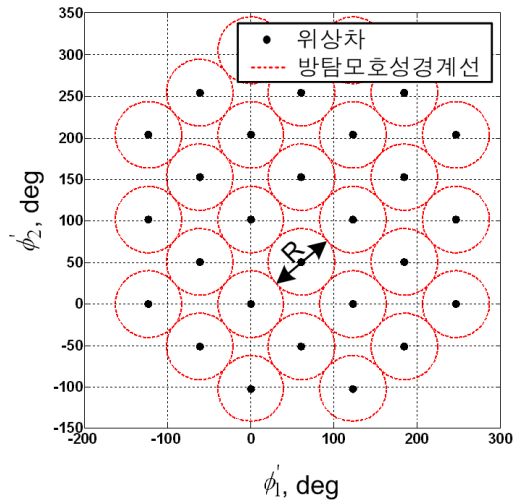


Fig. 7. Phase-difference diagram at the plane  $(\phi'_1, \phi'_2)$  after rotation of coordinate axes

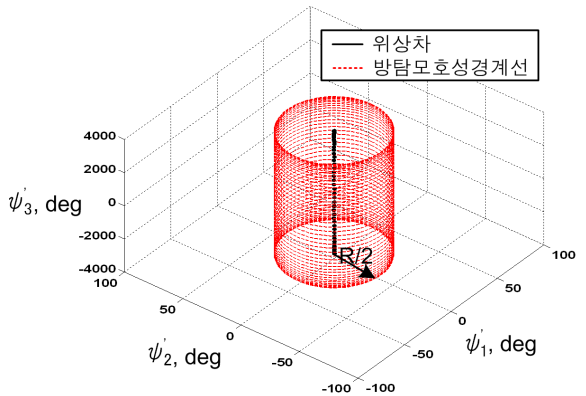


Fig. 8. Phase-difference diagram before  $2\pi$  modulation

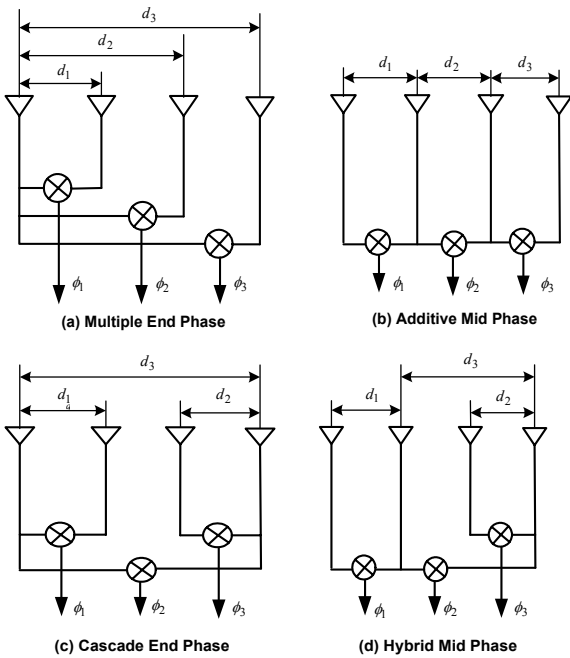


Fig. 9. Array configurations for each four-element interferometer

또한, 위상차에 대한 분산은 3소자 위상인터페로미터의 가정과 동일하다.

$$\sigma_{\Delta\psi_1}^2 = \sigma_{\Delta\psi_2}^2 = \sigma_{\Delta\psi_3}^2 = \sigma_{\Delta\psi}^2 \quad (12)$$

$\Delta\psi_1'$  및  $\Delta\psi_2'$ 가 랜덤변수(Random Variable)이면 이들 사이의 상관계수는 식 (13)으로 표현된다.

$$\rho' = \frac{E[\Delta\psi_1'\Delta\psi_2'] - E[\Delta\psi_1']E[\Delta\psi_2']}{\sigma_{\Delta\psi_1'}\sigma_{\Delta\psi_2'}} \quad (13)$$

따라서, 두 랜덤변수에 대해 다음의 밀도함수를 사용할 수 있다<sup>9)</sup>.

$$P_{XY}(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho_{xy}^2}} \exp\left\{-\left[\frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2} - \frac{2\rho_{xy}(x-m_x)(y-m_y)}{\sigma_x\sigma_y}\right]\right\} \quad (14)$$

새좌표계에서 위상차오차가  $0 \leq r \leq R/2$  및  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ 의 범위내에 있다면, 방탐모호성은 존재하지

않는다. 식 (14)를 사용하여 방탐모호성을 구하기 위해  $x = r\cos\theta$ ,  $y = r\sin\theta$ 로 치환하여 구한 방탐모호성 없는 확률은 식 (15)와 같다.

$$P_{noambi} = \frac{1}{2\pi\sigma_{\Delta\psi_1'}\sigma_{\Delta\psi_2'}\sqrt{1-(\rho')^2}} \int_0^{R/2} \int_0^{2\pi} \exp\left\{\frac{-r^2\left[\frac{\cos^2(\theta)}{\sigma_{\Delta\psi_1'}^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{\sigma_{\Delta\psi_2'}^2} - \frac{2\rho'\cos(\theta)\sin(\theta)}{\sigma_{\Delta\psi_1'}\sigma_{\Delta\psi_2'}}\right]}{2(1-(\rho')^2)}\right\} r dr d\theta \quad (15)$$

식 (15)를 사용한 방탐모호성확률은

$$P_{ambiguity} = 1 - P_{noambi} \quad (16)$$

이다. Matlab dblquad()함수를 사용하여 안테나 배열간격이  $d_1 = 2.5\lambda$ ,  $d_2 = 3\lambda$ ,  $d_3 = 7\lambda$ 이고  $\alpha \approx -39.8^\circ$ 과  $\beta \approx -29.1^\circ$ 로 4가지 배열구조에 대해 식 (15)로 방탐모호성을 구하였다. Fig. 10은 방탐모호성 경계선간거리( $R$ )에 대해 SNR별로 계산한 결과이다. 3소자 위상인터페로미터의 방탐모호성확률과 마찬가지로 Fig. 10에서  $R$  및 SNR이 증가할 때 와 적은 상관계수일 때 방탐모호성확률이 낮다는 것을 알 수 있다. 한 예로 SNR이 16[dB]인 경우 약 1[%]의 방탐모호성이 있는 방탐모호성 경계선간거리는 약 60[도]이상을 선택해야 됨을 알 수 있다. SNR이 22[dB]인 경우 방탐모호성은 거의 존재하지 않고 수치해석에 의한 오차로 인한 방탐모호성만 존재한다. 이러한 이유는 SNR이 22[dB]인 경우 위상차오차는 약 4.55°[RMS]로 낮은 오차를 가지기 때문이다. 배열구조의 경우 Multiple End phase의 상관계수가 타 배열구조보다 낮기 때문에 방탐모호성 확률이 제일 적다는 것을 알 수 있다. 또한, 계산결과를 검증하기 위해 축변환방법<sup>10)</sup>을 적용하여 안테나배열간격과  $R$ 을 충족하는 것 중에서,  $R = 70^\circ$ 인 안테나 배열간격  $d_1 = 2\lambda$ ,  $d_2 = 3\lambda$ ,  $d_3 = 8.5\lambda$ 을 선정하였다. 선정된 안테나배열간격의  $R = 70^\circ$ 이지만, 이 시뮬레이션에서는  $R = 65^\circ$ 이상이 되는 위상차오차에 대해 방탐모호성이 발생한다고 가정하였다. 시뮬레이션결과는 계산치와 유사한 결과를 나타내었으며 Fig. 10에 도시하였다. 또한, 계산에 사용된 안테나 배열간격의 방탐모호성경계선간 거리  $R$ 이  $70^\circ$ 이므로, Fig. 10에서 이 값외의 방탐모호성경계선간 거리에 대한 방탐모호성확률은 가상의 안테나 배열간격이 된다.

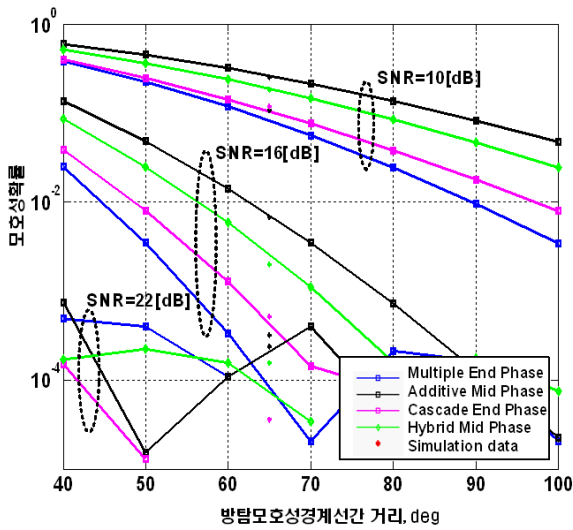


Fig. 10. Ambiguity probability for each four-element interferometer( $d_1 = 2.5\lambda$ ,  $d_2 = 3\lambda$ ,  $d_3 = 7\lambda$ ,  $\alpha \approx -39.8^\circ$ ,  $\beta \approx -29.1^\circ$ )

### 3. 결론

본 논문에서는 방탐시스템의  $2\pi$  모듈러연산전 출력 위상차와 실제의 안테나 배열간격에서 확장된 가상의 안테나 배열간격을 사용하여 재좌표계에서 방탐모호성을 분석하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법으로 3소자 및 4소자 위상인터페로미터 방탐시스템의 각 배열구조에 따른 방탐모호성확률을 구하였다. 또한, 제안방법을 검증하기 위해 선정된 안테나 배열간격으로 시뮬레이션을 수행하여 제안방법과 비교분석을 수행하여 제안방법의 효용성을 확인하였다.

### References

- [1] Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook, Naval Air Warfare Center, 1997.
- [2] "Parameters of and Measurement Procedures on H/V/UHF Monitoring Receivers and Stations," ITU-R Report SM.2125, 2007.
- [3] C. S. Park, W. Jang, and S. P. Nah, "Study on Performance Analysis and System Design of Multibaseline DF Techniques," Agency for Defense Development Report, TEDC-409-010343, 2001.
- [4] Robert L. Goodwin, "Ambiguity-resistant Three and Four-channel Interferometers," Naval Researcher Laboratory Report 8005, 1976.
- [5] K. R. Sundaram et al., "Modulo Conversion Method for Estimating the Direction of Arrival", IEEE Trans. on Aeros. and Elect. Sys., AES-36, pp. 1391-1396, 2000.
- [6] Stephen E. Lipsky, Microwave Passive Direction Finding, JSciTech Publishing, Raleigh, NC, pp. 165-167, 1987.
- [7] Richard G. Wiley, ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals, Artech House, Norwood, MA, pp. 131-139, 2006.
- [8] L. G. Bullock et al., "An Analysis of Wide-band Microwave Monopulse Direction-finding Techniques," IEEE Trans. on Aeros. and Elect. Sys., AES-7, pp. 188-203, 1971.
- [9] Alberto Leon-Garcia, Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering, Pearson Education, Inc. p. 278, 2008.
- [10] J. H. Lee and J. M. Joo, "Method for Calculating Spacing Ratio of Interferometer Array Antenna for Direction Finder," Korea Patent 10-1357690-0000, Jan. 17, 2014.