

항공기 외장형 전자전 방향탐지장치 개발

The Development of an airborne-based direction-finding system
for EW application

전 병 태* 박 영 미* 최 도 원* 박 문 복* 임 중 수**
Jeon, Byeong-Tae Park, Young-Mi Choi, Do-Won Park, Moon-Bok Lim, Joong-Soo

ABSTRACT

An airborne-based Direction-Finding System is developed for the application of ELINT and ES(Electronic Support). The system takes the phase-comparison technology, and has the configuration of multi-based antenna array for the solution of ambiguity due to the increased Direction-Finding resolution. This thesis describes the design of optimized distances among antennas, the electrical characteristics, the method of compensation, the direction-finding accuracy, and et. al. under the condition of the airborne-based environment.

주요 기술용어 : 방향탐지장치(direction finding), 위상비교(phase comparison), 항공기 탑재(airborne based)

1. 서 론

전자전 장비에서 방위정보는 신호분석 및 ERP 증가를 위해 중요한 변수가 된다. 특히, 의도적으로 송신주파수와 펄스반복주기를 바꾸는 현대 레이다에서는 임의변경이 불가능한 방위정보는 위협표적식별을 위해 더욱 중요시 된다^[1].

일반적으로 전자전(EW) 응용에서 사용되는 방위정보 획득 방식은 수신신호의 진폭비교방식과 위상비교

펄스당 순시방탐이 되어야 할 뿐만아니라, 항공기 탑재 방식으로 크게 구별된다. 체계장치 요구조건이 광대역, 재환경 하에서 동작해야하므로 무게/부피 제한, 반사파 영향 등을 고려하여 위상비교방식을 채택하고, 순시방탐 가능한 방향탐지장치를 개발하였다.

본 논문에서는 위상비교 방탐의 구현 및 방위별 위상변화감도를 높이기 위해 Multi-base line 배열구조 안테나를 사용하였다. Multi-base line를 사용함으로써 발생하는 모호성 해결을 위한 최적 안테나 이격비 설계, 위상비교 방식에서 중요시되는 보정방법, 방탐 정확도에 에러를 주는 요인들, 그리고 전기적 성능 등에 대하여 기술하였다.

* 국방과학연구소 선임연구원

** 국방과학연구소 책임연구원

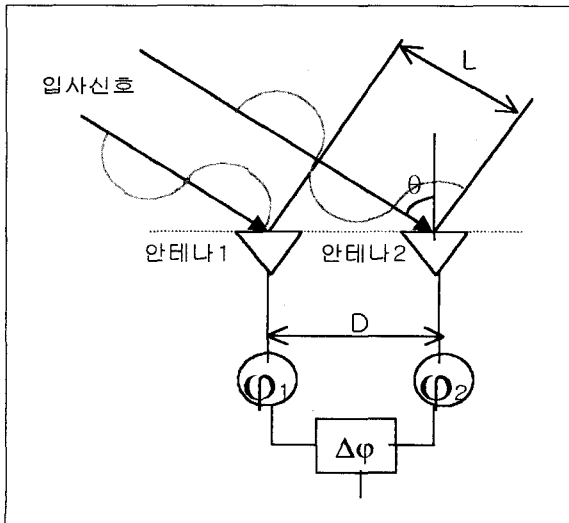
2. 위상비교방탐 및 안테나 이격비

위상비교방식은 그림 1의 개념도에서 보듯이 수신 신호의 각 안테나 도착시간 차를 위상값으로 변환하여 방위각과의 관계를 이용한 것이다. 입사신호의 방위각에 따라 그림에서 길이 L이 변화함으로 두 안테나사이의 위상차는 다음과 같은 관계성을 갖게 된다^[2].

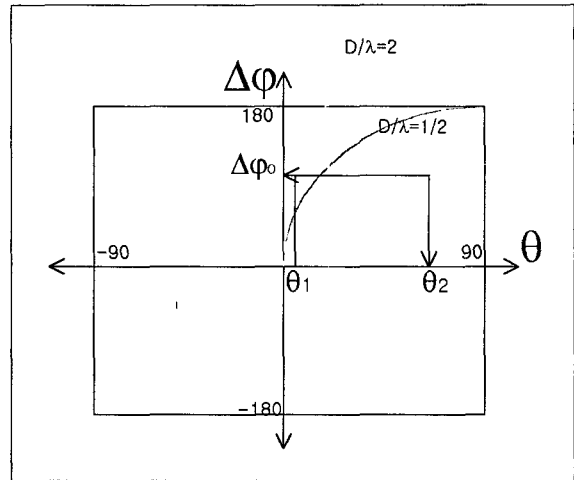
$$\Delta\psi = \psi_1 - \psi_2 = k \times L = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin \theta \quad (1)$$

방위각을 위상차 변화로 변환하였으며, 측정되는 위상차는 $\frac{D}{\lambda}$ 변수에 따라 그림 2에 표현한 것처럼 나타난다.

$\frac{D}{\lambda}$ 값이 크면 $\frac{d(\Delta\psi)}{d\theta}$ 이 커지게 되므로 측정방위각 해상도가 향상되지만, 반면에 1/2 값을 넘어서면 동일 위상값을 갖는 방위각이 2개 이상 존재하게 되므로 모호성이 발생하게 된다.



[그림 1] 위상비교 방식의 개념도



[그림 2] 방위각 변화에 따른 측정위상차변화

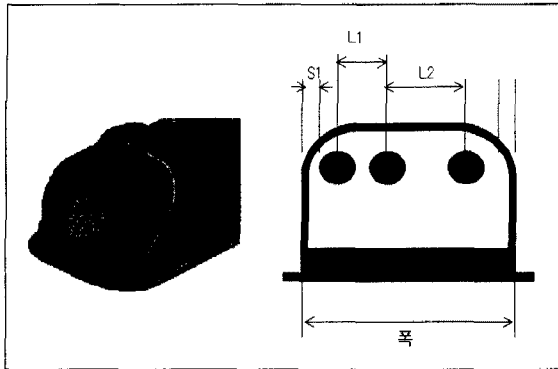
$\frac{D}{\lambda} = \frac{1}{2}$ 의 값에 대한 해상도로는 장치요구조건을 만족시키지 못하기 때문에 해상도를 만족시키는 안테나 간격을 유지시키고, 발생된 모호성을 해결하기 위해 안테나 하나를 추가시켜 위상차 측정값을 하나를 더 얻음으로서 두 번째 측정위상값으로 모호성을 해결하는 Multi-base line 배열방식을 채택하였다. 부가적인 장점으로서 방탐성능이 안테나 이득패턴에 영향을 받지 않고 다중경로 등의 환경적 내성이 강한 특징이 있다. 개발 장치에서는 해상도 증가보다 위상값 측정예러에 대한 방위각 영향을 감소시키는 관점에서 중요성이 있다.

항공탐재환경에 의하여 크기에 제한성을 갖고 있기 때문에 그림 3에 나타난 것처럼 기구적으로 우선 만족시켜야 하는 안테나 간격 조건을 얻는다.

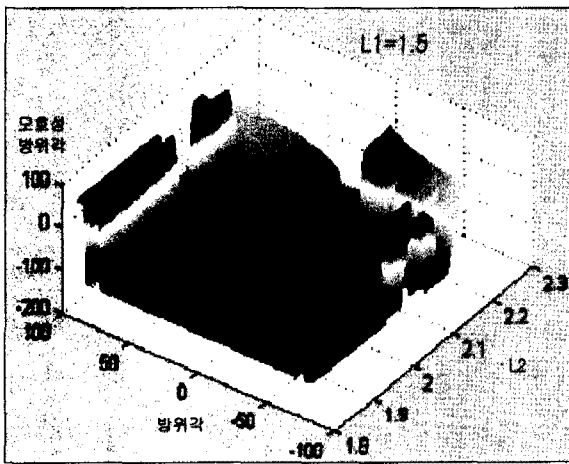
$$L_1(\text{짧은 간격}) > \text{안테나직경}$$

$$L_2(\text{넓은 간격}) < \text{폭} - L_1 - \text{안테나직경} - 2 \times s_1$$

위 조건을 만족한 범위내에서 동작주파수 및 탐지 방위각 범위내에서 모호성이 발생되지 않는 L_1, L_2



[그림 3] multi-base line 배열 안테나 기계적 형상



[그림 4] 안테나 이격비 L_2 변화에 대한 모호성 발생 방위각 분포($L_1=1.5$)

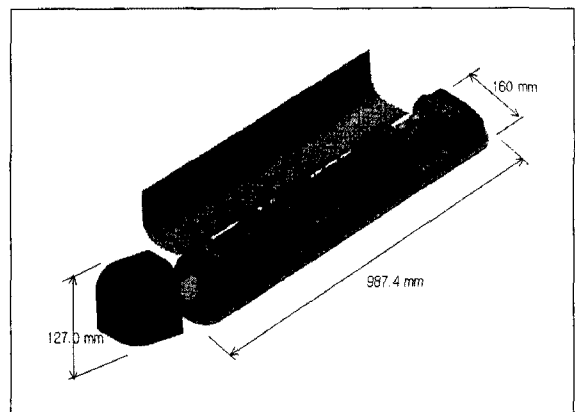
간격을 얻어야 한다. 그림 2와 같은 위상차-방위각 그래프를 안테나 이격비를 각각 L_1 , L_2 으로 하여 그린 후, 위상차 값이 서로 위상차측정에러범위(예로 20도) 내에 분포될 때 모호성이 발생된 것으로 간주하고 그림을 그린 것이 그림 4이다. 그림 4에서 보듯이 $L_1=1.5$ 일 때, L_2 의 범위가 1.8 ~ 2.1사이의 값은 방위각 $-70^\circ \sim 70^\circ$ 사이에서 모호성발생이 없는 것을 알 수가 있다. 위와 같은 3차원 그림을 L_1 을 변화시키면서 모호성이 없는 방위각범위가 최대가 되면서 모호성 발생지역에서 떨어진 L_1 , L_2 값을 선택하여야 기구적으로 발생하는 에러에 대한 면역성을 가진다.

위상차1-위상차2를 x-y축으로 하는 그래프를 그려보면 방위각변화에 따라 여러 직선들이 그려진다. 각 직선 간격은 측정 위상값에 에러가 포함되더라도 모호성이 발생되지 않는 에러범위가 된다. 이 에러범위가 즉 각 직선간격이 전체 방위각에서 균등히 배열되도록 L_1 , L_2 값을 최적화 시켜야 한다.

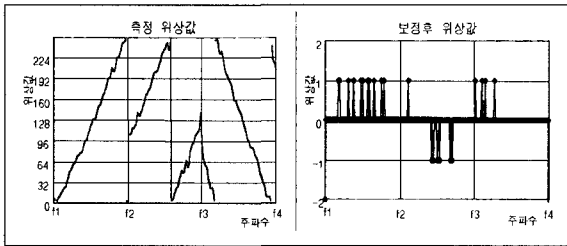
3. 채널 보정 및 안테나 보정

그림 5에 개발된 방향탐지기의 외형도 및 안테나가 장착된 사진이 나타나있다.

방향탐지 장치는 항공기 표면에서 반사된 신호가 존재하게 됨에 따라 입사된 신호가 영향을 받게 된다. 측정되는 위상값에 에러를 주는 부분은 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 반사파 등의 외부요인과 고주파 부품들로 구성된 신호가 지나는 장치 내부 채널요인이 있으며, 내부채널은 주파수와 진폭변화에 따라 측정위상값에 영향을 주지만 방위각 변화에 따른 영향은 없다. 반면, 외부요인은 다소 복잡한 형상을 지니게 된다. 안테나끼리의 위상특성차이, 편파에 따른 안테나 위상특성변화, 편파에 따른 반사파 위상특성변화,



[그림 5] 방향탐지기 외형도



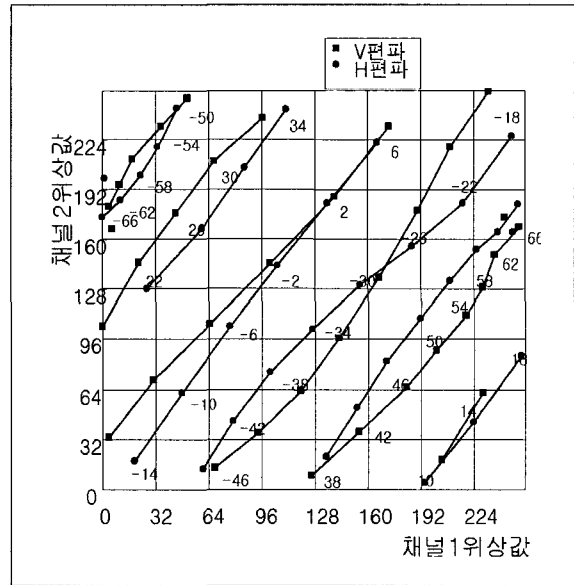
(가) 측정 위상값 (나) 보정 완료된 위상값
[그림 6] 방위각 0도에서 주파수 변화에 따른 위상값

반사파 구조에 따른 반사파 변화 등은 모두 수신신호의 방위각에 따라 변하게 되며, 따라서 방위각에 따라 측정 위상값이 이상적 곡선에서 벗어나게 된다.

위에 언급한 것처럼 측정위상값의 주파수, 진폭, 방위각에 따른 변화를 최소화하기 위해서 보정단계가 필요하게 된다. 방향탐지기의 위상 변별기에 측정된 위상값을 신호처리기에서 보정을 한 후에 최종 방위값을 출력하게 된다. 이때, 보정처리는 채널보정과 외부영향 보정(방위보정)으로 나뉘어지며, 채널보정에서는 주파수 변화에 따른 채널 길이차의 위상변화와 고주파 부품들의 위상특성의 주파수 의존성을 상쇄시켜준다.

안테나 입력단에 신호를 분배기로 나누어 각 채널에 주입하여 주파수에 따른 측정된 위상값과 채널보정후 위상값을 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 채널보정된 위상값의 변화는 위상변별기의 양자화 에러량 정도만 보인다.

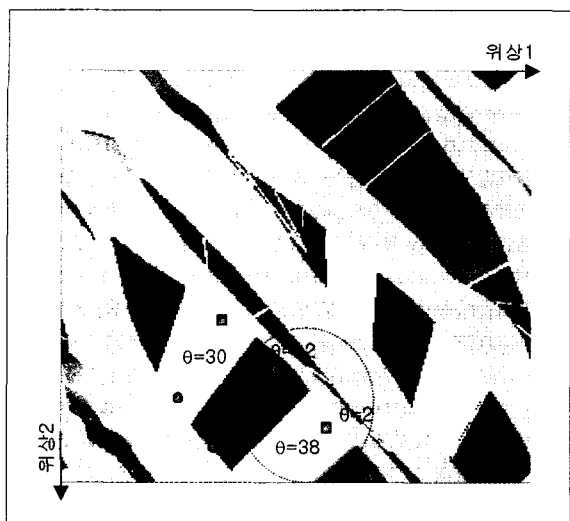
채널보정 다음 단계인 방위보정은 여러 가지 요인들이 합쳐져 나타나는 영향들을 보정해야한다. 이러한 요인들 중 방위각 및 주파수에 따른 안테나 위상변화, 기구적인 안테나 위치에러는 보정이 가능한 반면, 편파에 따른 위상변화, 반사파 영향에 의한 위상변화, 고각에 따른 방위각편이오차(conning effect)들은 보정이 불가능하므로 방위정확도에 에러로 포함되게 된다.



[그림 7] 방위각 변화에 따른 채널 1/2 위상값 변화 (freq = fo)

다. 그림 7은 주파수 f_0 에서 측정된 V, H 편파신호의 방위각에 따른 채널위상값 Φ_1, Φ_2 를 각각 x, y축으로 그린 그림이다.

그림에서 방위각이 증가함에 따라 V와 H편파 차이가 커짐과 동시에 그래프가 서로 엇갈리는 현상을 보인다. 이는 외부 구조의 반사파 영향이 나타난 것이다. 방위보정 데이터 획득을 위해 측정된 그림 7를 바탕으로 그림 8과 같은 방위보정 map을 생성시키게 된다. 그림 8은 한 개의 주파수 f_0 에 대한 예제이며, 실제 사용하는 전체 주파수범위에 대한 보정 map을 갖고 있어야 한다. 그림 8은 방위각 4도 간격에 대한 간단한 예제이며, 실제 방위각 간격이 세밀한 경우 그림은 복잡한 모양을 갖게 된다. 이때 방위 보정 map의 방위각 간격은 측정위상값들의 랜덤에러와 관계가 있다. 랜덤에러보다 작게 방위각 간격을 설정할 필요가 없다.



[그림 8] 방위보정 map(주파수=f₀)

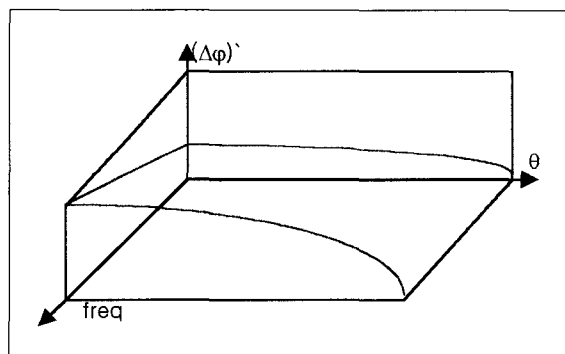
4. 방위각 탐지 에러요인과 성능

측정된 위상값 ϕ_1, ϕ_2 를 이용하여 그림 8의 방위보정 map에서 방위각을 유도하게 된다. Multi-base line 배열에서 일반적인 방위각 유도방법은 안테나 간격비가 작은 채널의 위상값으로 모호성 해결 구간을 설정하고, 안테나 간격비가 큰 채널의 위상값으로 방위각을 결정하게 된다. 안테나 간격비가 클수록 방위각 해상도가 향상되므로 이와 같은 방식일 경우 기구적으로 허용되는 최대의 안테나 간격을 이용하게 된다. 그러나 이런 경우는 극히 제한적인 응용일 때만 적용될 수 있다. 편파 또는 반사파에 의하여 측정위상값의 변화범위가 존재하게 될 경우 변화범위가 곧 방위각 에러로 존재하게 되게된다. 따라서 개발된 장치는 측정위상값 ϕ_1, ϕ_2 를 동시에 방위보정 map에 적용하여 방위각을 유도하였다.

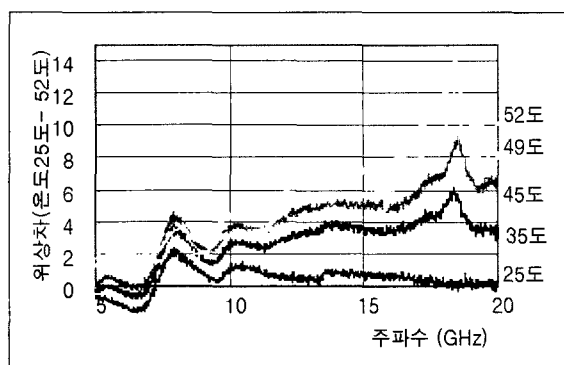
방탐정확도에 영향을 주는 에러요인들은 여러 가지가 있다. 측정위상값이 에러를 포함하면 직접적으로

방위각에 에러로 영향을 주는데, 그 민감도는 주파수와 방위각에 따른 함수로 유도된다. 그림 9에 주파수와 방위각변화에 따른 $\frac{d(\Delta\phi)}{d\theta}$ 의 그래프를 나타내었다. 이는 특정주파수, 특정 방위각에서 방위각 1도 당 변화되는 위상값 변화폭을 나타낸다. 그림 9에 의하면 측정 위상값 에러에 대한 방위각 변화 민감도가 낮은 쪽은 높은 주파수와 낮은 방위각일 때이다. 이는 방탐정확도의 주파수 및 방위각 의존성을 의미한다

측정위상값에 에러를 주는 요인들은 첫째 온도변화에 따른 고주파 부품들의 위상변화가 있을 수 있다. 그림 10의 결과에 의하면 주파수에 따라 의존성을 보인다. 두 번째로 Intermodulation 신호가 영향을 준



[그림 9] 방위각, 주파수에 따른 측정위상값의 감도

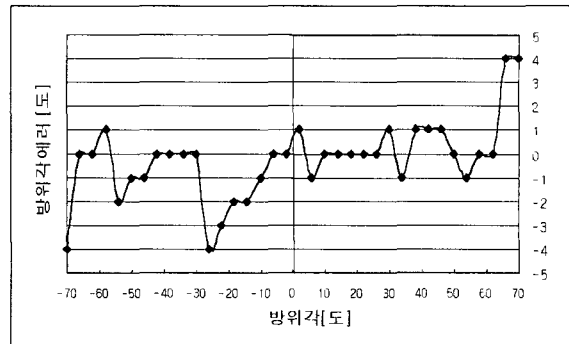


[그림 10] 고주파 증폭기의 온도에 따른 위상변화

다. 수신신호와 Intermodulation 신호의 주파수가 겹치게 될 때 측정위상에 변화를 발생시키게 되고 에러가 발생된다. 위상변별기의 양자화 에러도 하나의 요인이다.

반면에 위상값 측정이 정확할 지라도 방위각이 실제 값과 다르게 하는 에러요인들이 있다. 첫째, 외부 구조물의 반사파에 의하여 입력되는 신호의 위상이 어긋날 경우 측정된 방위각에 에러가 포함된다. 반사파의 영향은 그림 7의 모호성그래프에서 다른 방위각 곡선영역으로 위상값을 이동시켜 모호성을 발생시킬 수도 있다. 둘째, 다른 요인으로 주파수 부정확성이 있다. 채널보정을 할 때 수신신호의 주파수 정보가 필요하게 된다. 이 때, 측정된 주파수에 에러가 포함되면 채널보정에서 정확한 값으로 보정을 할 수가 없다. 그림 6에서 유도하면 개발된 장치는 4GHz 주파수 변화폭에 약 360도 위상 변화가 발생하였다. 따라서 한 채널을 구성하는 두 경로상의 길이차에 의하여 발생하는 시간차는 $\frac{2\pi}{2\pi \times 4GHz} = 0.25nsec$ 정도이며, 이는 제작상의 두 경로상의 케이블 길이차에 의하여 발생되고, 그 길이차는 약 $0.25ns \times 3 \times 10^{10} cm/s = 7.5cm$ 임 알 수 있다. 채널보정에 의하여 측정위상값이 1도 에러가 발생하는 주파수 에러값을 계산하면, $\frac{4GHz}{2\pi} \times \frac{\pi}{180} = 11[MHz/도]$ 로 계산된다. 만약 측정주파수의 정확도가 낮다면 제작시 두 경로상의 길이차를 작게 하면 될 것이다.

방위각 편이를 일으키는 또 다른 요인은 conning effect를 들 수 있다. 방위각이 90도 일 때 안테나 배열장선과 수신신호의 파면이 수직을 형성하지 않으면 conning effect가 발생되기 시작한다. 이는 송신안테나의 고각각도에 의하여 발생되며, 수신안테나의 고



[그림 11] 측정된 방위각정확도(주파수=8.4GHz)

각과는 무관함을 주의하여야 한다. 송신안테나의 고각을 Ψ 라고 하면 두 경로에 의하여 발생하는 위상차는 식(1)에서 $\cos(\Psi)$ 을 곱해야 한다. Conning effect에 의하여 발생하는 방위각 에러량은 방위각이 클수록 커진다.

반사파가 측정 위상값에 주는 영향이 일반적으로 방위각에 따라서 달라지므로 그림 7에서처럼 불균일한 곡선이 나타나게 된다. 따라서 그림 8에서처럼 각 방위각마다 불균등한 영역이 할당되게 된다. 방위보정 알고리즘에 따라 방위각 정확도에 영향을 주게 된다.

그림 11에 개발된 장치의 측정된 방위각정확도를 나타내었다. 일반적으로 그림 9에 보인 것처럼 방위각이 큰 쪽에서 방위각에러가 커지지만 그림 11에서처럼 양상을 보인 것은 반사파가 존재하고, 또한 반사파의 영향이 방위각에 따라 달라지기 때문이다.

5. 결 론

본 논문은 항공기 탑재환경에서 운용되는 방향탐지 장치에 대하여 최적의 안테나 이격비 설계와 채널보정 및 방위보정에 대하여 설명하였다. 반사파 환경에

서 방위보정 map형성과 그리고 방향탐지의 어려운
들에서 대하여 살펴보고, 최소화 시킨 방탐정확도 결
과를 보였다.

Defense Systems, Artech House, 1991.

[2] STEPHEN E. LIPSKY, *MICROWAVE
PASSIVE DIRECTION FINDING*, JOHN
WILEY & SONS, 1987.

참 고 문 헌

[1] Filippo Neri, *Introduction to Electronic*