

항공 시스템 기반의 통신신호 방향 탐지를 위한 비행 보정 기법

In-Flight Calibration Method for Direction Finding of Communication Signals based on Aviation Systems

장 재 원 · 주 증 민

Jaewon Chang · Jeungmin Joo

요 약

신호를 송출하는 신호원의 방향을 추정하기 위하여 다수개의 안테나를 이용하는 방향 탐지 장치는 조난자를 구출하거나 규정된 송신원의 위치를 파악하기 위하여 사용된다. 방향 탐지를 수행할 때에는 방향 탐지 장치와 다수개의 안테나를 탑재한 시스템의 외형과 재질에 따라서 반사파가 존재하고 신호의 왜곡이 발생된다. 따라서 신호원의 방위각을 정확하게 추정하기 위해서는 방향 탐지 장치 개발 간에 안테나 배치와 시스템 외형에 따른 영향성을 반영하기 위한 보정을 수행해야만 한다. 본 논문에서는 항공 시스템을 이용한 통신신호 방향 탐지 장치 개발을 위하여 수행되는 비행 보정 기법을 설명하고, 비행 보정을 통하여 얻게 된 위상 보정 데이터를 적용할 경우의 방향 탐지 성능을 분석한다.

Abstract

Direction-finding equipment with multiple antennas are used to estimate the direction of a signal emitted by a source; they can be used to rescue a victim or locate a specified source. During direction finding, reflection waves are present and signal distortion is observed depending on the external shape and material of a system that incorporates the direction-finding equipment and multiple antennas. Therefore, to accurately estimate the azimuth of the signal source and develop the direction-finding equipment, a calibration should be performed to reflect the influence of the antenna arrangement(layout) and system contour. In this paper, we describe an in-flight calibration method to develop direction-finding equipment to locate communication signals using an aviation system, and we analyze the direction-finding performance when applying phase calibration data obtained through the in-flight calibration.

Key words: Communication Signal, Direction Finding, Aviation System, In-Flight Calibration

I. 서 론

무선 환경에서 방향 탐지(direction-finding: DF) 장치는 발생된 신호에 대한 신호원의 방향을 추정하고 그 결과를 이용하여 위치를 추정함으로써, 신호원의 위치를 파악하기 위하여 사용된다^{[1]~[7]}. 방향 탐지 방식으로 좁은 빔

폭을 갖는 지향성 회전 안테나를 이용하여 방향을 탐지하는 회전 방향 탐지^[8], 다수개의 안테나를 이용하여 수신된 신호 간 진폭 차이를 비교하여 방향 탐지를 수행하는 진폭비교 방향 탐지^[9], 수신된 신호 간 위상차를 이용하여 방향 탐지를 수행하는 위상비교 방향 탐지^[10], 수신된 신호 간 진폭 및 위상 차이를 모두 이용하는 진폭-위상비교

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 18, 2019 ; Revised March 11, 2019 ; Accepted April 4, 2019. (ID No. 20190118-008)

· Corresponding Author: Jeungmin Joo (e-mail: gangsang@add.re.kr)

방향 탐지^[11] 등의 다양한 방법이 연구 및 적용되어 왔다.

방향 탐지 장치는 일반적으로 방향 탐지를 수행하는 방식에 따라서 진폭이나 위상에 대한 보정 데이터를 이용하여 방위각을 추정하게 된다. 방향 탐지에 사용되는 보정 데이터를 생성하는 방법으로는 안테나 배치 및 특성을 고려한 수신신호 모델링을 통하여 획득하는 기법이 참고문헌 [12]~[14]와 같이 제시되었고, 정해진 위치에서 보정을 위하여 방사된 신호를 이용하여 방위각 별로 보정 데이터를 획득하는 방법이 참고문헌 [15], [16]과 같이 연구되었다.

복잡도 대비 우수한 방향 탐지 정확도로 다양한 시스템이 널리 적용되고 있는 위상비교 방향 탐지는 다수개의 안테나에 수신되는 신호 간 위상차를 이용하여 방향을 탐지하기 때문에, 수신 안테나들의 안테나 이득 패턴 및 안테나와 방향 탐지 장치가 설치되는 시스템 플랫폼의 형태와 재질의 영향을 많이 받는다^[17]. 신호원의 방향을 탐지할 때 시스템 플랫폼 외관의 구조물 형태에 따라 수신 신호의 반사파가 발생하고, 외관 재질 및 수신 안테나 이득 패턴에 의해서 수신 신호의 왜곡이 발생할 수 있기 때문이다. 따라서 신호원의 방향을 탐지하고자 하는 주파수 대역 및 방위각에 따라서 위상비교 방향 탐지를 위한 위상 보정을 방향 탐지 장치 개발 간에 수행하고, 위상 보정 데이터를 방향 탐지 장치에 장입해야만 한다.

방향 탐지 장치 개발 간에 획득되는 위상 보정 데이터는 그림 1의 전자파 무반향실(anechoic chamber)과 같이 주변 환경으로 인한 반사파가 없는 환경^{[18],[19]}에서 탐지하고자 하는 주파수 대역 및 방위각에 대하여 신호를 방사하고, 안테나와 방향 탐지 장치가 설치된 시스템에서 신호를 수신하여 얻게 되는 주파수 및 방위각 별 위상차 값으로 구성된다. 또한 통신 신호의 주파수 대역인 HF, V/UHF 대역에서 위상 보정 데이터를 획득하기 위해서는, 통신 대역의 긴 파장을 갖는 반사파 영향을 없앨 수 있는 규모의 전자파 무반향실을 확보하기가 어렵기 때문에 주변 환경에 의한 반사파의 영향이 최소화될 수 있는 개활지에서 위상 보정을 수행해야만 한다. 특히, 항공 시스템 기반의 통신신호 방향 탐지를 위하여 야외에서 위상 보정을 수행할 경우, 지표면 및 주변 환경에 의한 반사파의 영향을 최소화하기 위하여 수신 안테나들이 설치되어 있

는 해당 시스템 형상의 배면이 하늘 방향을 향하도록 그림 2와 같이 설치하여 위상 보정을 수행하게 된다.

항공 시스템 기반의 통신신호 방향 탐지를 위하여 위상 보정을 수행할 경우 실제 운용될 시스템을 보정에 사용하기 어렵기 때문에, 그와 동일한 외관 형태 및 재질의 목업(mock-up)을 사용하게 된다. 그러나 목업을 사용할 경우 실제 운용될 시스템과 외관 상 차이가 존재하게 되고, 보정을 수행할 때의 야외 환경 신호 및 실제 운용될 시스템과는 상이한 전원공급 및 접지 등의 요소들이 위상 보정을 위하여 수신되는 신호의 위상 값에 영향을 줄 수 있다. 이와 같은 영향을 최소화하기 위하여 신호 방사 및 목업을 이용한 야외 환경에서의 방사 보정을 수행함

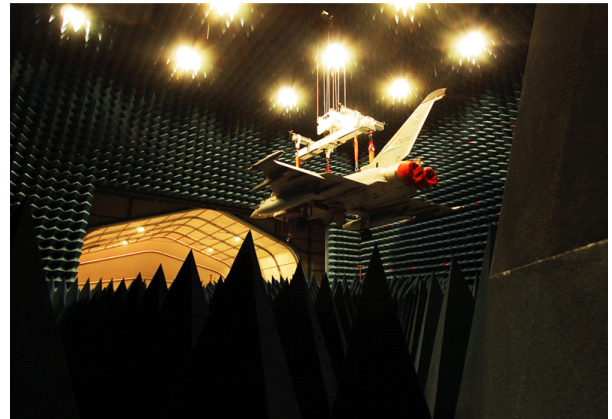


그림 1. 전자파 무반향실(anechoic chamber) 시험 시설
Fig. 1. Electromagnetic anechoic chamber test facility.



그림 2. 항공 시스템 기반의 야외 시험 시설(BAE systems)
Fig. 2. Outdoor test facility based on aviation systems(BAE systems).

과 동시에 실제 비행하는 항공 시스템을 이용하여 비행 보정을 수행한다^[20].

본 논문에서는 항공 시스템을 이용한 통신신호 방향 탐지를 위하여 비행 보정을 수행할 때 필요한 보정 시스템 구성 및 위상 보정 기법을 설명하고, 비행 보정으로 얻게 된 위상 보정 데이터를 위상비교 방향 탐지 알고리즘에 적용할 경우의 방향 탐지 성능을 분석한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 방향 탐지의 원리 및 위상 보정 데이터에 대하여 설명하고, III장에서는 비행 보정을 위한 시스템 구성을 기술하며, IV장에서는 비행 보정에서 획득된 위상 보정 데이터를 분석한다. V장에서는 획득된 위상 보정 데이터를 이용할 경우의 방향 탐지 성능을 분석하고, VI장에서 결론을 맺는다.

II. 방향 탐지 원리 및 위상 보정 데이터

다수개의 안테나에 수신된 신호 간 위상차를 이용하는 위상비교 방향 탐지는 넓은 주파수 대역에서 신호원의 방향을 정확하게 추정할 때 사용되는 가장 보편적인 방식이다. 신호원에서 송신되는 신호가 그림 3과 같이 특정 방위각에서 방향 탐지 장치의 N 개의 안테나에 도달했을

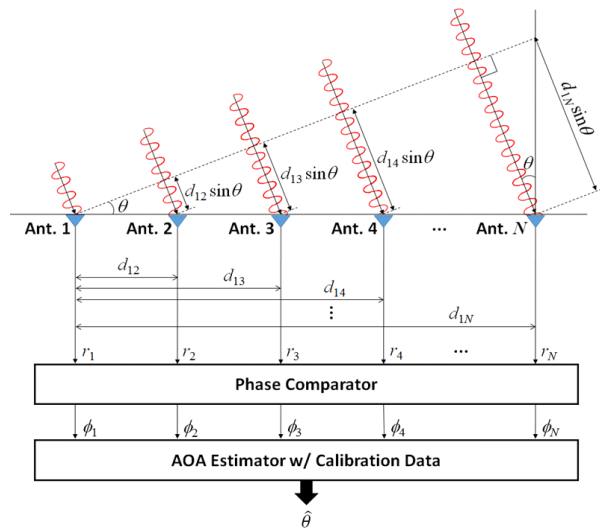


그림 3. N 개 수신안테나를 이용한 위상비교 방향 탐지 장치의 블록도

Fig. 3. Block diagram of correlative interferometer DF equipment using N receive antennas.

때, 각 안테나에 수신된 신호의 도착시간 차이에 의하여 수신되는 신호 사이의 위상차가 결정된다. 이러한 안테나에 수신된 신호 간 위상차 ϕ 는 수신 신호의 주파수 f 와 입사방위각 θ , 안테나 사이의 떨어진 거리 d 의 함수로 결정되기 때문에, 해당 주파수별 N 개의 안테나에 도달한 신호 사이의 위상차 ϕ 로 입사방위각 θ 를 추정하는 것이 가능하다. 따라서 신호원의 방위각에 따라서 결정되는 위상 보정 데이터를 방향 탐지 장치는 사전에 알고 있어야만 하며, 수신 안테나들의 이득 패턴과 시스템 외관 플랫폼 형태, 재질에 따른 영향성이 모두 반영된 위상차 $\tilde{\phi}$ 로 구성된 주파수 및 방위각별 위상 보정 데이터가 필요한 것이다.

입사방위각 θ 로 신호가 수신될 때 i 번 안테나에 수신된 신호 r_i 의 위상이 ρ_i 인 경우 기준 안테나(1번 안테나) 대비 i 번 안테나에 수신되는 신호는 그림 3과 같이 $d_{i1}\sin\theta$ 의 거리만큼 시간지연이 발생하며, 기준 안테나와 i 번 안테나에 수신되는 신호 간 위상차 ϕ_i 는 입사신호의 파장이 $\lambda = c/f$ (c : 전파속도)일 때 식 (1)과 같이 발생한다.

$$\phi_i = \rho_i - \rho_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d_{i1} \sin\theta \quad (1)$$

기준 안테나와 i 번 안테나에 수신된 신호의 위상차 ϕ_i 와 전 방위각에 대하여 방향 탐지 장치 개발 간 획득된 기준 안테나와 i 번 안테나 사이 위상 보정 데이터의 위상차 $\tilde{\phi}_i^{f,\theta}$ 를 이용하여 N 개 수신안테나 간 위상차 데이터에 대한 상관도 $\Psi(\theta)$ 를 식 (2)와 같이 산출하고, 위상차간 상관도 $\Psi(\theta)$ 값이 최대인 θ 를 찾아 신호의 입사방위각을 추정한다^{[21][22]}.

$$\arg \max_{0^\circ \leq \theta < 360^\circ} \Psi(\theta) = \arg \max_{0^\circ \leq \theta < 360^\circ} \sum_{i=1}^N \cos(\phi_i - \tilde{\phi}_i^{f,\theta}) \quad (2)$$

III. 비행 보정을 위한 시스템 구성

항공 시스템 기반의 비행 보정을 위해서는 지상에서 방사 신호 발생 장비를 제어하고, 항공 시스템에서 송신한 위상 보정 데이터를 원격으로 수신하여 위상 보정 데이터를 생성하는 지상 운용 장비, 지상에서 보정 신호를 송신하는 방사 신호 발생 장비, 항공 시스템에서 신호를

수신하여 수신 안테나별 위상 보정 데이터를 생성하는 보정 신호 수신 장치(방향 탐지 장치)로 구성된다.

지상 운용 장비는 그림 4와 같이 위상 보정 데이터 수집에 필요한 송신 신호를 항공기 방향으로 방사하기 위하여 방사 신호 발생 장비의 지향성 안테나 제어기와 신호발생기를 제어한다. 또한 방사 신호 발생 장비의 지향성 안테나 제어를 위하여 항공기로부터 무선 데이터링크를 통하여 항법 정보(longitude, latitude, altitude, roll, pitch)를 수신한다. 지상 운용 장비는 항공기에 탑재된 보정 신호 수신 장치로 위상 보정 데이터 수집을 위한 제어 명령을 전송하고, 항공기에서 전송한 위상 보정 데이터를 수신하는 기능을 수행하며, 수집된 위상 보정 데이터를 오프라인으로 분석하고, 방향 탐지에 사용 가능한 유효성 있는 위상 보정 데이터로 후처리하는 기능을 수행한다.

방사 신호 발생 장비는 유선망으로 연결된 지상 운용 장비의 제어 명령에 따라 위상 보정에 필요한 주파수로 신호를 발생시키는 신호발생기와 발생된 신호를 고출력으로 증폭시키기 위한 고출력 증폭기, 발생되어 증폭된 신호를 항공기 위치로 지향하여 방사하기 위한 지향성 안테나로 구성된다. 또한 신호발생기와 항공기의 보정 신호 수신 장치의 송수신 시간동기화를 확보하기 위한 GPS

수신기와 GPS 수신안테나를 탑재한다.

항공기에 탑재된 보정 신호 수신 장치는 항공기 외부에 장착된 다수개 안테나에 수신된 신호를 이용하여 위상 보정 데이터 생성에 필요한 수신 신호 간 위상차와 신호세기 값을 측정하는 기능을 수행한다. 방사 신호 발생 장비에 탑재된 신호발생기와 시간 동기화를 위하여 보정 신호 수신 장치는 항공기의 항법장치로부터 GPS 시간 정보를 제공받게 되고, 방사 신호 송신과의 시간 동기화를 통하여 수집된 위상 보정 데이터는 항공기의 항법 정보와 함께 무선 데이터링크를 통하여 지상 운용 장비로 전송된다. 보정 신호 수신 장치와 방향 탐지 장치는 다수개의 안테나로 수신된 신호의 위상차 데이터를 수집하는 동일한 신호처리 과정이 필요하기 때문에, 방향 탐지 장치 개발 시 비행 보정을 위한 보정 신호 수신 장치 기능을 고려하여 설계 및 개발하는 것이 효율적이다.

IV. 비행 보정에서 획득된 보정 데이터 분석

위상비교 방향 탐지를 위하여 필수적으로 요구되는 위상 보정 데이터는 주변 환경의 반사와 영향이 없는 조건에서 방향 탐지 장치와 수신안테나가 탑재된 시스템 플랫폼의 외관 및 재질 영향성이 반영된 상태에서 획득되어야 한다. 이를 위하여 전파의 파장 60 cm 이하로 짧은 500 MHz 이상의 높은 주파수 대역에서 위상 보정하고자 할 경우, 해당 시스템이 들어갈 수 있는 규모의 주변 환경 신호 영향이 차단된 전자파 무반향실을 활용한다. 그러나 500 MHz 이하의 통신 신호 주파수 대역에서는 방사 신호의 파장이 길기 때문에, 해당 주파수 대역에 대한 위상 보정을 수행할 수 있는 규모의 전자파 무반향실을 확보하는 것이 어렵다. 따라서 주변 환경에 의한 반사파의 영향을 최소화하기 위하여 개활지에 수신 안테나들이 설치되어 있는 해당 시스템 목업(mock-up) 형상의 배면이 하늘 방향을 향하도록 설치하여 위상 보정을 수행한다.

목업을 사용한 위상보정은 낮은 주파수 대역의 야외 환경 신호 및 실제 운용될 시스템과는 상이한 전원공급 및 접지 등의 요소들이 위상 보정 제한 조건으로 작용하기 때문에, 신호 방사 및 목업을 이용한 야외 환경에서의 방사 보정을 수행함과 동시에 실제 비행하는 항공 시스템을 이용하여 비행 보정을 수행한다.

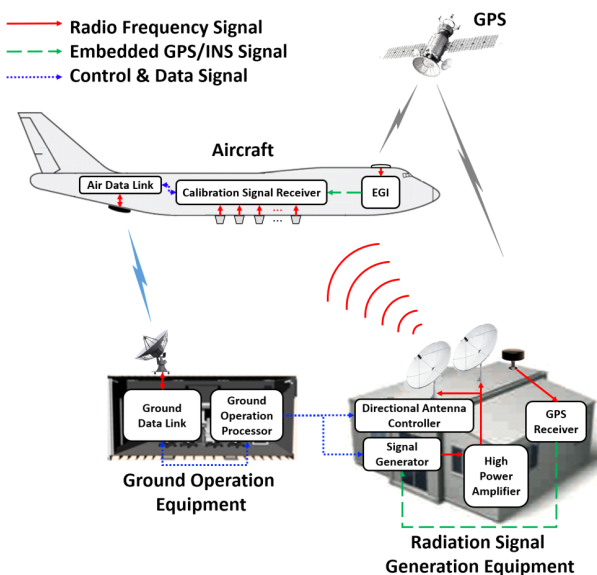


그림 4. 비행 보정을 위한 시스템 구성도

Fig. 4. System configuration for in-flight calibration.

방향 탐지 장치에 적용될 위상 보정 데이터를 얻기 위해서 필요한 비행 보정을 위한 순서도는 그림 5와 같다. 안테나 배치를 고려하여 수학적으로 계산된 위상 보정 데이터와 지상에서 목업을 이용하여 얻은 위상 보정 데이터를 비교하고, 비행 보정이 필요한 주파수 및 방위각을 먼저 식별하여 필요한 주파수 및 방위각에 대하여 비행 보정이 가능한 항공-지상 시스템을 구성해야 한다. 그리고 지상에서 방사되는 보정 신호가 항공기의 전 방위각에 대하여 수신될 수 있도록 항공기의 이동 경로를 설정해야 한다. 또한 방향 탐지를 수행할 때의 항공기 비행 자세를 고려하여, 비행 보정 시 이동하는 항공기의 자세(roll, pitch) 및 고도(altitude), 속도가 일정하게 유지된 상태의 위상 보정 데이터를 획득하는 것이 중요하다. 이와 같은 비행 보정 수행 시 고려 사항들을 반영하여 $0^\circ \sim 360^\circ$ 의 전 방위각에 대한 위상 보정 데이터를 얻기 위하여 이동한 비행 보정 항공기의 이동 경로는 그림 6과 같다. 반시계방향으로 이동 비행하면서 $0^\circ \sim -180^\circ$ 방위각의 위상 보정 데이터를 수집하고, 시계방향으로 이동 비행하면서 $0^\circ \sim 180^\circ$ 방위각의 위상 보정 데이터를 수집하였다.

비행 보정을 통하여 위상 보정 데이터를 수집할 때, 항

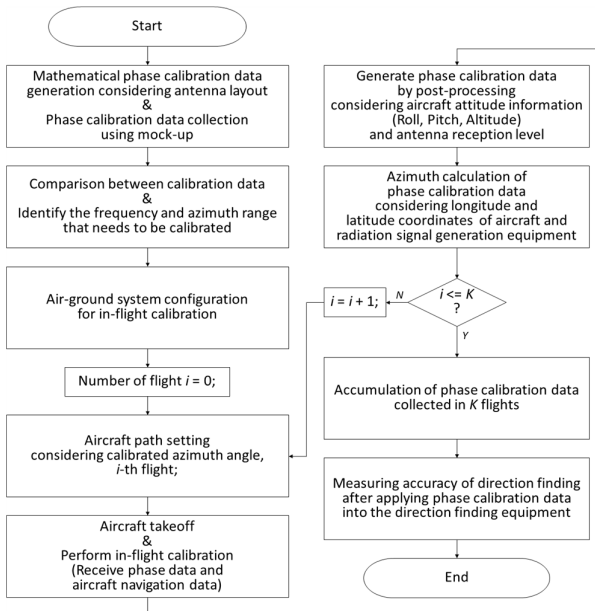


그림 5. 비행 보정을 위한 순서도
Fig. 5. Flow chart for in-flight calibration.

공기의 자세 및 고도의 변화는 각 안테나로 수신되는 신호들 간의 위상차에 영향을 주게 된다. 그림 7은 비행 보

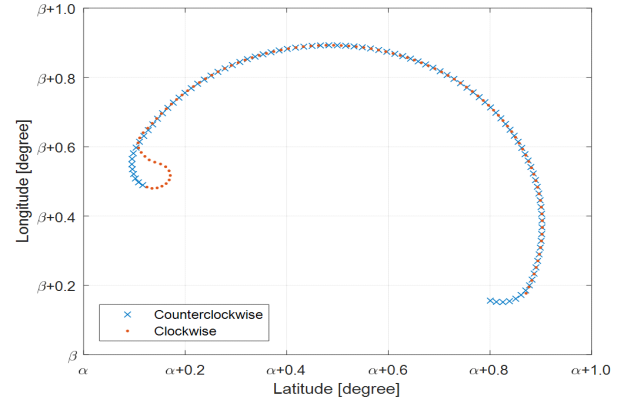


그림 6. 비행 보정을 위한 항공기의 이동 경로
Fig. 6. Flight path of the aircraft for in-flight calibration.

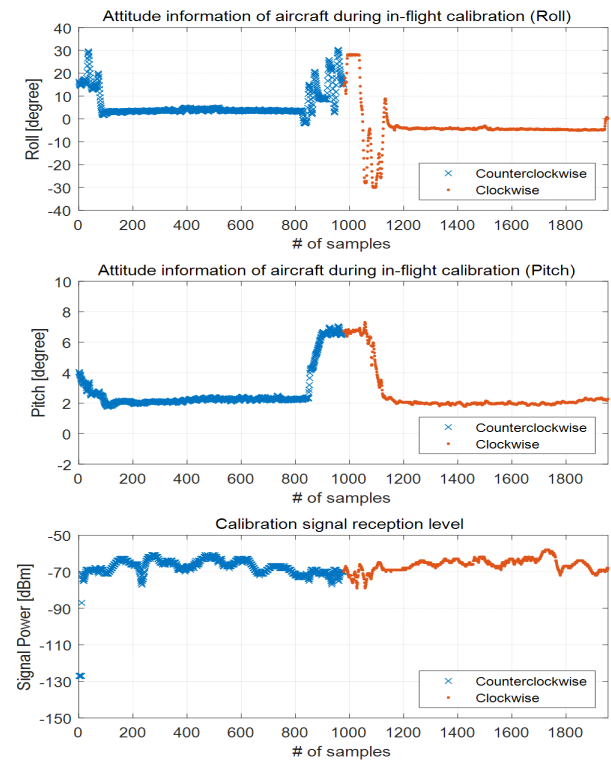


그림 7. 비행 보정 수행 시 항공기의 자세정보(roll, pitch) 및 보정 신호의 항공기에서의 수신 레벨
Fig. 7. Aircraft attitude information(roll, pitch) and calibration signal reception level during in-flight calibration.

정 수행 시 항공기의 자세정보 및 수신 신호의 세기를 나타낸 것으로, 항공기가 비행 보정 경로에 진입(0~100번째 샘플)하거나 반시계방향에서 시계방향으로 이동 비행하기 위하여 급 기동(850~1,120번째 샘플)할 때 roll과 pitch가 급격하게 변화하는 것을 알 수 있다. 항공기가 급 기동할 경우 수집하고자 하는 위상 보정 데이터에도 영향을 주게 되며, 이 때 발생하는 위상차 패턴의 변화는 그림 8과 같다. 지상에서 방사된 보정 신호를 1번 안테나와 2번 안테나에서 수집했을 때, 1번 안테나와 2번 안테나 수집 신호 간 위상차 패턴이며, 비행 보정을 수행하는 항공기가 급 기동하는 시점에서 위상차 패턴의 품질이 급격히 저하되는 것을 확인할 수 있다.

비행 보정을 통하여 수집된 위상 보정 데이터를 방향 탐지에 적용할 수 있는 유효한 데이터로 만들기 위해서는, 수집된 데이터의 후처리를 통하여 항공기가 일정한 자세이고, 충분한 수신 신호 레벨이 확보되었을 경우 수집된 데이터만을 위상 보정 데이터 생성에 이용해야만 한다. 그림 9는 반시계방향으로 비행할 때 $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 범위, 시계방향으로 비행할 때 $-5^{\circ} \sim -2^{\circ}$ 범위의 roll 조건과 $1.5^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 범위의 pitch 조건을 만족함과 동시에 보정 신호 수신 레벨이 -80 dBm 이상 확보되었을 경우의 데이터로 후처리한 경우의 결과이다.

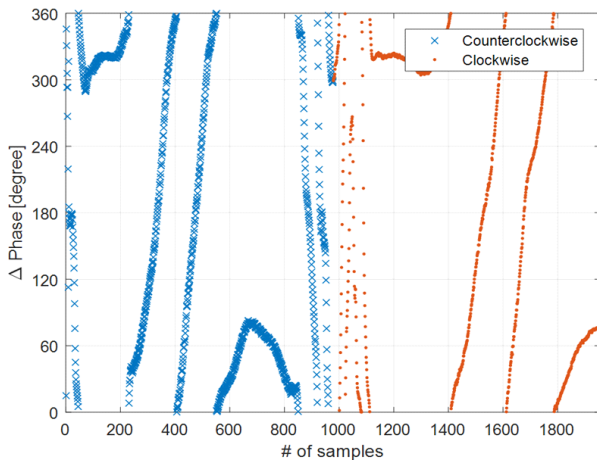


그림 8. 비행 보정을 통하여 수집된 50 MHz 주파수에 대한 위상차 패턴 (1번 vs. 2번 안테나)
Fig. 8. Phase difference pattern at 50 MHz frequency collected through in-flight calibration.

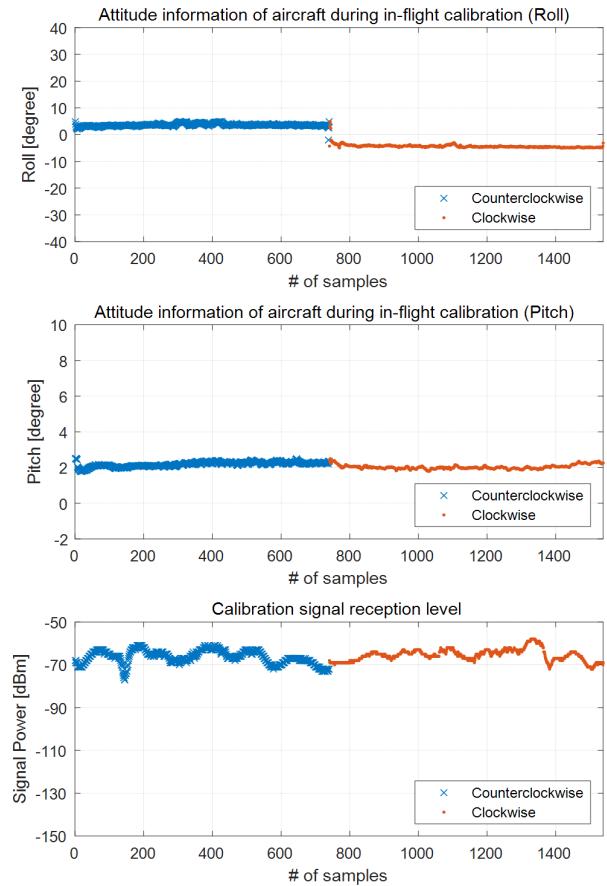


그림 9. 비행 보정 데이터 생성을 위한 유효 범위의 항공기 자세 및 보정 신호 수신 레벨 필터링
Fig. 9. Aircraft attitude and calibration signal reception level filtering of the effective range for in-flight calibration data generation.

이와 같은 후처리를 통하여 그림 10과 같이 위상 보정 데이터로 사용 가능한 유효성 있는 데이터를 얻는 것이 가능하다. 그림 8에서는 항공기가 비행 보정 경로에 진입하거나 급 기동할 때 발생하는 0~100번째와 850~1,120번째의 불필요한 위상차 패턴이 포함되어 연속적인 위상차 패턴으로 나타나지만, 그림 10에서는 후처리를 통하여 불필요한 위상차 패턴이 제거되고, 방향 탐지에 활용 가능한 보정 데이터로 구성되었기 때문에 그림 10과 같은 위상차 패턴을 얻을 수 있다. 그림 10에서 샘플수가 약 730번째에서 불연속한 위상차 패턴이 나오는 원인은 항공기가 반시계방향으로 이동 비행하면서 $0^{\circ} \sim -180^{\circ}$ 방

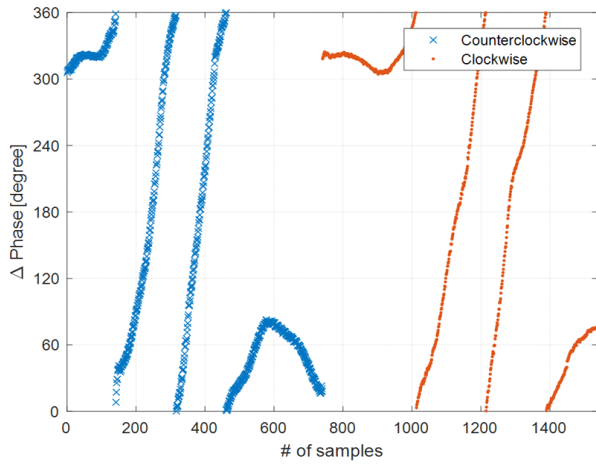


그림 10. 필터링된 50 MHz 주파수에 대한 위상차 패턴(1번 vs. 2번 안테나)

Fig. 10. Filtered phase difference pattern at 50 MHz frequency(Ant. 1 vs. Ant. 2).

위각의 위상 보정 데이터를 수집하다가 시계방향으로 이동 비행하면서 $0^\circ \sim 180^\circ$ 방위각의 위상 보정 데이터를 수집하는 과정에서 -180° 에서 0° 의 위상차데이터로 급변하는 불연속점이기 때문이다.

위상 보정 데이터의 신뢰도를 향상시키기 위하여 앞서 언급된 방법으로 여러 횟수의 데이터 수집 및 후처리를 수행하고 누적하는 것이 추가적으로 필요하다. 비행 보정을 통한 위상 보정 데이터 수집 및 데이터 후처리를 5회 수행하고, 누적하여 얻게 된 $0^\circ \sim 360^\circ$ 전 방위각에 대한 위상 보정 데이터의 위상차 패턴 예시는 그림 11 및 그림 12와 같다. 비행 보정 수행 시 신호를 수신하는 1번 안테나와 2번 안테나 사이의 전 방위각에 대한 위상차 패턴을 나타내는 그림이며, 수신 안테나 배치를 고려하여 수학적으로 계산된 위상 보정 데이터의 위상차 패턴과 비교하였다. 수학적으로 계산된 위상 보정 데이터의 위상차 패턴은 시스템 외형과 재질의 영향성 없이 수신 안테나들의 배치만을 고려하여 획득된 수신 신호들의 위상차 데이터를 이용하였다.

그림 11은 50 MHz에서 신호를 방사하여 수집된 위상 보정 데이터의 1번 안테나와 2번 안테나 간 위상차 패턴을 나타내는 그림이며, 그림 12는 450 MHz에서 방사 신호를 수집한 위상 보정 데이터의 1번 안테나와 2번 안테나

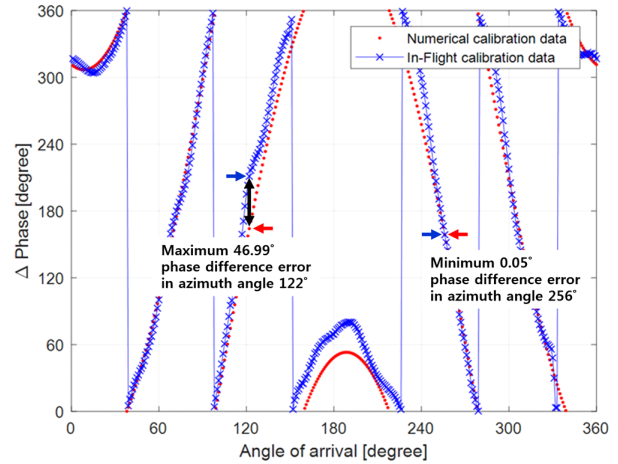


그림 11. 50 MHz 주파수에 대한 방위각 별 위상 보정 데이터 비교(1번 vs. 2번 안테나 간 위상차)

Fig. 11. Comparison of phase calibration data by azimuth angle at 50 MHz frequency(Phase difference between ant. 1 and ant. 2).

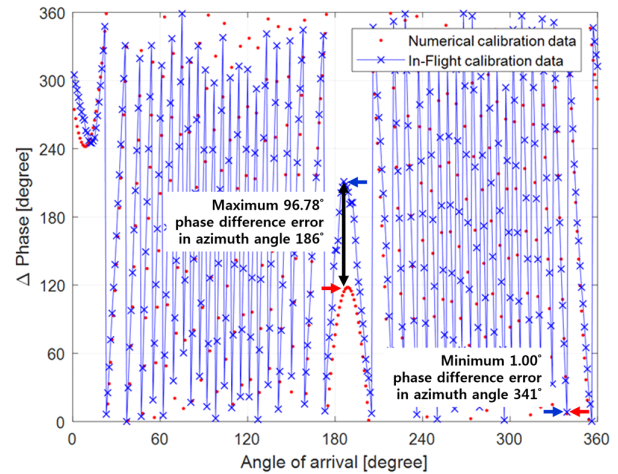


그림 12. 450 MHz 주파수에 대한 방위각 별 위상 보정 데이터 비교(1번 vs. 2번 안테나 간 위상차)

Fig. 12. Comparison of phase calibration data by azimuth angle at 450 MHz frequency(Phase difference between ant. 1 and ant. 2).

나 간 위상차 패턴이다. 1번 안테나와 2번 안테나 사이의 고정된 간격 대비 450 MHz 신호의 파장이 50 MHz 신호의 파장 대비 9배 짧기 때문에, 위상차 패턴이 더욱 급격하게 변화하며, 항공기의 머리(0°)와 꼬리(180°) 방향에서

위상 보정 데이터의 위상차 패턴 간 오차가 더욱 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 위상차 패턴 간 유사성은 존재하지만 50 MHz에서 수집한 위상차 패턴 간 오차는 256° 방위각에서 최소 0.05°, 122° 방위각에서 최대 46.99° 발생되는 것으로 확인되었고, 450 MHz에서 수집한 위상차 패턴 간 오차는 341° 방위각에서 최소 1.00°, 186° 방위각에서 최대 96.78° 발생되는 것으로 확인되었다. 이는 방향 탐지 장치에 위상 보정 데이터를 장입하고 방향 탐지를 수행할 경우 방향 탐지 오차로 작용하게 되며, 이와 같은 요인들을 고려할 때 정확한 방향 탐지를 위해서는 비행 보정을 통하여 수집된 위상 보정 데이터를 반드시 사용해야만 하는 것이다.

V. 비행 보정 데이터를 이용한 방향 탐지 성능

비행 보정 및 후 처리를 통하여 얻게 된 위상 보정 데이터를 항공기에 탑재된 방향 탐지 장치에 장입할 경우, 방향 탐지 성능을 0°~360° 전 방위각에 대하여 살펴보았다. 수학적으로 계산된 위상 보정 데이터를 방향 탐지 장치에 장입할 경우의 방향 탐지 정확도 성능을 비행 보정을 통한 위상 보정 데이터 장입 시 방향 탐지 정확도 성능과 비교 평가하였다. 항공기에 탑재된 방향 탐지 장치에 장입된 위상 보정 데이터 종류의 변화에 따른 방향 탐지 정확도 성능은 그림 13 및 그림 14와 같다. 장입된 위상 보정 데이터 종류에 따른 50 MHz 신호에 대한 방향 탐지 오차의 확률 분포는 그림 13과 같으며, 450 MHz 신호에 대한 방향 탐지 오차의 확률 분포는 그림 14와 같다. 비행 보정을 통하여 얻게 된 위상 보정 데이터 적용 시 방향 탐지 오차의 분포는 수학적으로 계산된 위상 보정 데이터를 적용한 경우와 상대적으로 비교할 때 방향 탐지 오차가 0에 가깝게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 비행 보정을 통하여 더욱 정확하게 측정하여 방향 탐지 장치에 적용한 위상 보정 데이터의 신뢰도 향상에 의한 것이라 판단될 수 있다. 위상 보정 데이터의 종류 별 방향 탐지 오차 성능을 식 (3)과 같이 계산할 수 있다^[9].

$$DF_{Accuracy} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{k=1}^L |\tilde{\theta}_k - \theta_k|^2} \quad (3)$$

방향 탐지 장치를 이용하여 식 (2)의 방법으로 추정된

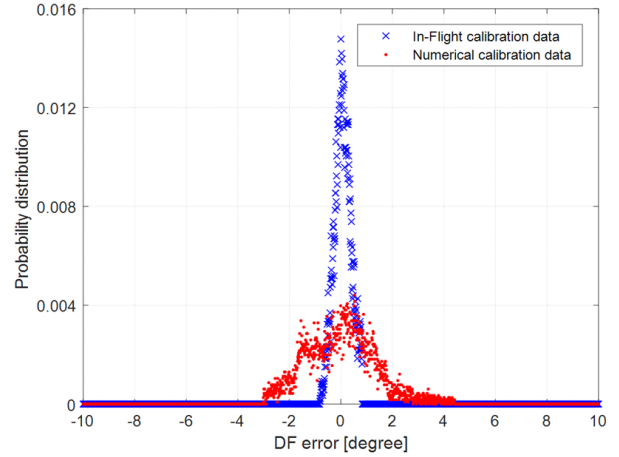


그림 13. 항공기에 적용된 위상 보정 데이터 종류에 따른 방향 탐지 오차의 확률 분포(50 MHz)

Fig. 13. Probability distribution of DF error according to phase calibration data type applied to aircraft(50 MHz).

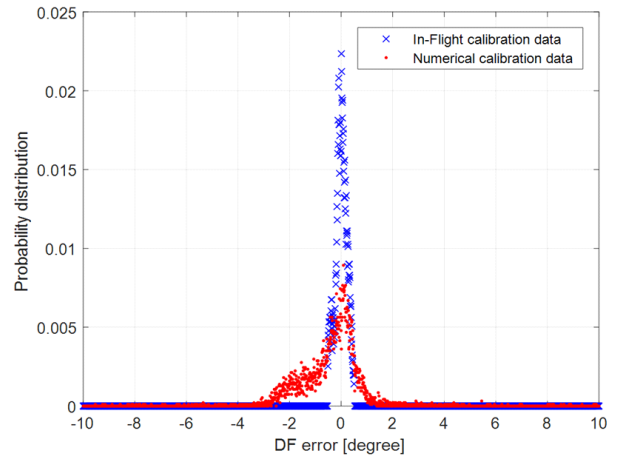


그림 14. 항공기에 적용된 위상 보정 데이터 종류에 따른 방향 탐지 오차의 확률 분포(450 MHz)

Fig. 14. Probability distribution of DF error according to phase calibration data type applied to aircraft(450 MHz).

L 개의 추정방위각 샘플에 대하여 k 번째 추정된 방위각은 $\tilde{\theta}_k$ 이며, 그때 정확한 방위각은 θ_k 이다. 앞서 기술된 방향 탐지 오차 분포의 결과와 유사하게, 표 1의 방향 탐지 오차에 대한 방향 탐지 정확도 성능도 50 MHz에서 약 1.17°, 450 MHz에서 약 2.55° 우수한 것을 확인할 수 있으며, 420 MHz에서는 최대 약 6.42°의 성능 개선을 확인할 수 있다.

표 1. 비행 보정을 통한 위상 보정 데이터 적용 시 방향 탐지 정확도 개선량

Table 1. Improved DF accuracy when applying phase calibration data through in-flight calibration.

DF Freq. (MHz)	Improved amount of DF accuracy	DF Freq. (MHz)	Improved amount of DF accuracy
50	1.1710°	60	1.5270°
380	0.6753°	390	0.9168°
400	0.9127°	410	2.0546°
420	6.4244°	430	1.9104°
440	5.6591°	450	2.5454°

VI. 결 론

본 논문은 항공 탑재형 통신신호 방향 탐지 장치 개발에 필요한 위상 보정 데이터를 얻기 위하여, 실 비행하는 항공기를 이용한 비행 보정 기법에 대하여 기술하였다. 정확한 위상 보정 데이터 획득을 위한 비행 보정의 필요성을 기술하고, 비행 보정 수행 시 필요한 절차와 고려사항에 대하여 제시하였으며, 비행 보정에 따른 위상 보정 데이터에 대한 분석과 개선된 방향 탐지 정확도 성능을 확인하였다.

References

- [1] C. H. Cotter, *Principles and Practice of Radio Direction Finding*, London, Pitman, 1961.
- [2] W. Read, "Review of conventional tactical radio direction finding systems," *Defense Research Establishment Ottawa*, DREO-TN-89-12, May 1989.
- [3] P. J. D. Gething, *Radio Direction Finding and Superresolution*, London, The Institution of Engineering and Technology, 1991.
- [4] J. L. Volakis, *Antenna Engineering Handbook*, New York, McGraw Hill Professional Pub., 2007.
- [5] J. M. Won, "The performance analysis of burst error elimination CVDF algorithm using switching remote direction finding antenna in VHF," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 129-138, 2007.
- [6] Y. T. Lo, S. W. Lee, *Antenna Handbook: Theory, Applications, and Design*, Boston, Springer, 2013.
- [7] K. Ghaemi, R. Ma, and N. Behdad, "A small-aperture, ultrawideband HF/VHF direction-finding system for unmanned aerial vehicles," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 10, pp. 5109-5120, Oct. 2018.
- [8] C. W. Earp, D. L. Copper-Jones, "The practical evolution of the commutated-aerial direction-finding system," in *Proceedings of the IEE-Part B: Radio and Electronic Engineering*, Mar. 1958, vol. 105, no. 9, pp. 317-332.
- [9] S. E. Lipsky, *Microwave Passive Direction Finding*, Raleigh, NC, Scitech Publishing, 2004.
- [10] E. Jacobs, E. W. Ralston, "Ambiguity resolution in interferometry," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, vol. AES-17, no. 6, pp. 766-780, Nov. 1981.
- [11] H. H. Jenkins, *Small-Aperture Radio Direction-Finding*, Boston, Artech House, 1991.
- [12] B. C. Ng, C. M. S. See, "Sensor-array calibration using a maximum-likelihood approach," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, no. 6, pp. 827-835, Jun. 1996.
- [13] A. J. Weiss, B. Friedlander, "Eigenstructure methods for direction finding with sensor gain and phase uncertainties," *Circuit Systems and Signal Processing*, vol. 9, no. 3, pp. 271-300, 1990.
- [14] J. Kim, H. J. Yang, B. W. Jung, and J. Chun, "Blind calibration for a linear array with gain and phase error using independent component analysis," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 1259-1262, 2010.
- [15] J. Pierre, M. Kaveh, "Experimental performance of calibration and direction-finding algorithms," in *ICASSP 91: 1991 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Toronto, ON, 1991, vol. 2, pp. 1365-1368.
- [16] S. Hu, G. Hong, and W. Jian, "Antenna calibration and

- digital beam forming technique of the digital array radar," in *2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC 2013)*, KunMing, 2013, pp. 1-5.
- [17] S. Germishuizen, D. C. Baker, "Practical accuracy limitations in airborne microwave interferometric direction finding," in *Proceedings of IEEE. AFRICON'96*, Sep. 1996, vol. 1, pp. 266-271.
- [18] J. P. Lie, T. Blu, and C. M. Samson, "Single antenna power measurements based direction finding," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58. no. 11, pp. 5682-5692, Nov. 2010.
- [19] *Test Procedure for Measuring Direction Finder Sensitivity in the VHF/UHF Frequency Range*, ITU-R SM.2096-0, 2016.
- [20] J. H. Lee, J. M. Joo, K. Kim, J. H. Lee, and Y. J. Park, "Practical consideration factors to design array configuration of direction finding system for airborne signal intelligence," *Security and Communication Networks*, p. 9185760, 2018.
- [21] D. C. Schleher, *Electronic Warfare in the Information Age*, Norwood, Artech House, 1999.
- [22] L. Dinoi, A. D. Vito, and G. Lubello, "Direction finding of ground based emitters from airborne platforms," in *2008 IEEE Radar Conference*, Rome, pp. 1-6, 2008.

장 재 원 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8677-3263>



2003년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 2011년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 2011년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 통신정보 신호처리, 방향 탐지, 디지털 통신

주 증 민 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7152-9660>



1999년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월: 광주과학기술원 정보통신학 (공학석사)
 2005년 2월: 광주과학기술원 정보통신학 (공학박사)
 2005년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 통신/전자정보 신호처리, 안테나