

# 무인기 탑재 안테나 어레이를 이용한 신호원의 위치 추정

임 광 재<sup>\*</sup>, 임 형 수<sup>\*</sup>, 신 천 식<sup>\*\*</sup>

## Signal Source Localization Using Unmanned Aerial Vehicle with Antenna Array

Kwangjae Lim<sup>\*</sup>, Hyoungsoo Lim<sup>\*</sup>, Cheon Sig Sin<sup>\*\*</sup>

요 약

본 논문은 안테나 어레이를 탑재한 무인기를 이용하여 신호원의 위치를 추정하는 방법을 제시하고 모의 실험을 통하여 그 성능을 분석하였다. 무인기를 비행 경로에 따라 운용하면서 탑재 안테나 어레이를 이용하여 신호의 도래각을 측정하고, 수집된 도래각과 무인기의 위치 및 자세로부터 신호원의 위치를 추정한다. 탑재 안테나 어레이로 선형, 원형, 평면 배열 안테나 어레이를 고려하였다. 도래각으로 방위각만을 측정하는 선형 배열 안테나 어레이를 이용하더라도 무인기의 자세 변화를 갖는 곡선 비행으로 신호원의 3차원 위치를 효과적으로 추정할 수 있음을 보였다.

**Key Words** : localization, unmanned aerial vehicle, antenna array, angle of arrival, position

### ABSTRACT

We propose a method of estimating the position of a signal source using an unmanned aerial vehicle equipped with an antenna array and analyzed its performance through simulation. The angle of arrival of the signal by using the mounted antenna array is measured while the UAV is flying according to a flight path, and the location is estimated based on the collected arrival angles and the posture and position of UAV. We consider a linear, circular, and planar antenna array for the mounted antenna array. We show that the linear array antenna array that only measures the azimuth angle can effectively estimate three dimensional position of signal source when the UAV flies on a curved path with a change of UAV posture.

### 1. 서 론

전파를 발생하는 신호원의 위치를 추정하는 방식은 간접 신호원의 위치를 찾거나 조난 및 탐색 등에 널리 이용될 수 있다. 특히, 무인기에 의한 신호원의 위치 탐색은 지상 기반의 탐색 방법에 비해 보다 광범위한 지역을 보다 정확하게 탐색할 수 있다는 장점을 갖는다.

지상에서 신호원의 위치를 추정하는 일반적인 방식

으로, 다수의 센서들에서 측정된 TDOA (Time Difference-Of-Arrival) 또는 FDOA (Frequency Difference-Of-Arrival)와 일반화된 삼각측정 (multilateral localization) 방식을 이용하여 신호원의 위치를 방법이 널리 이용되고 있다<sup>1,2)</sup>. 지상의 TDOA 또는 FDOA 기반 방식을 무인기에 의한 위치 추정에 적용할 경우, 지상의 다수의 센서들을 대신하여 다수의 무인기를 동시에 운용해야 한다. 다수의 무인기에

※ 본 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017-0-01077).

♦ First and Corresponding Author: Electronics and Telecommunications Research Institute, kjlim@etri.re.kr, 정회원

\* Electronics and Telecommunications Research Institute, lim@etri.re.kr, 종신회원

\*\* Electronics and Telecommunications Research Institute, cssin@etri.re.kr, 정회원

논문번호 : 201807-230-C-RN, Received July 26, 2018; Revised October 10, 2018; Accepted October 11, 2018

서 수집된 센서 데이터를 지상국 또는 무인기에서 위치를 추정하기 위해서는, 각 무인기는 센서들 사이에 동기화된 수신 샘플들을 광대역 무선 링크를 통해 지상 또는 무인기에 상시 전달해야 한다.

이와 달리, 제한된 크기의 안테나 어레이를 무인기에 탑재하여 일정 시간 동안 상공에서 운용하면서 신호의 도래각(DoA: Direction-of-Arrival)을 측정하고 이를 기반으로 신호원의 위치를 추정하는 방식을 고려할 수 있다. 이러한 도래각 기반의 위치 추정 방법은 다수 무인기의 동시 운용과 동기화된 광대역 링크의 운용에 대한 제약은 받지 않는다.

신호원의 위치 추정을 위하여 [4]에서는 3개의 기준국 또는 센서를 사용하여 2차원의 신호 위치를 TDOA 방식을 기반으로 추정하였다. [5]에서는 소형 선박 위치 추정을 위하여 FMCW(frequency modulated continuous wave) 레이더와 MUSIC(multiple signal classification) 알고리즘을 적용하였다. [6]에서는 전파 교란 재머의 DoA 추정하는데 있어 헬기 로터에 의한 간섭을 평균화 기법을 적용하여 완화시켰다.

본 논문에서는 안테나 어레이를 탑재한 단일 무인기를 이용하여 신호원의 3차원 위치를 추정하는 기법을 제시하고 모의실험을 통하여 추정 성능을 비교 분석한다. 안테나 어레이로 선형, 원형, 평면 배열 안테나를 고려하고, 특히, 방위각만을 측정할 수 있는 선형 배열 안테나로도 신호원의 3차원 위치를 효과적으로 추정할 수 있음을 보인다.

2장에서는 무인기에 탑재한 선형, 원형 또는 평면 배열 안테나 어레이를 이용하여 신호원의 도래각을 추정하는 방법에 대해 논한다. 3장에서는 안테나 어레이에 의해 추정된 도래각으로부터 신호원의 3차원 위치를 추정하는 방법을 제시한다. 4장에서는 모의실험을 통하여, 단일 무인기를 이용하여 신호원의 3차원 위치를 추정하는 경우 앞의 3가지 안테나 어레이에 대한 도래각 및 위치 추정 성능을 비교하고, 5장에서 결론으로 맺는다.

## II. 안테나 어레이에 의한 도래각 추정

다수의 요소 안테나로 구성되는 안테나 어레이에 의한 신호의 도래각 추정은 안테나 어레이의 방향 벡터(steering vector)를 기반으로 이루어진다. 그림 1과 같이  $M$  개의 요소 안테나들로 구성되는 안테나 어레이에서 방위각  $\phi$  및 양각  $\theta$  에 대한 방향 벡터  $\mathbf{a}(\phi, \theta)$  는 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[3]</sup>.

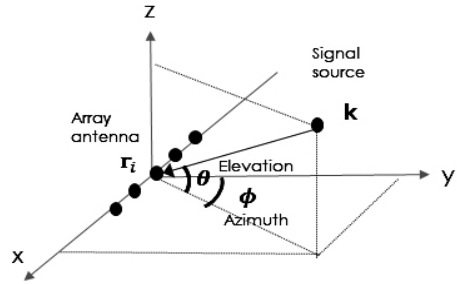


그림 1. 안테나 어레이에서 수신 도래각  
Fig. 1. Direction of arrival at antenna array

$$\mathbf{a}(\phi, \theta) = (a_1, a_2, \dots, a_M)^T \quad (1)$$

위 식에서

$$a_i(\phi, \theta) = \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}^T \mathbf{r}_i) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

$$\mathbf{k} = (\sin \phi \cos \theta \quad \cos \phi \cos \theta \quad \sin \theta)^T \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_i = (x_i \quad y_i \quad z_i)^T \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

이고,  $\lambda$ 는 파장이다.

$x$ 축 상에 안테나를 배치하는 선형 배열 안테나(ULA: Uniform Linear Array)의 경우 방향 벡터의 요소 값은

$$a_i^{ULA}(\phi, \theta) = \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} x_i \sin \phi \cos \theta) \quad (5)$$

이고,  $x$ - $y$  평면상에 원형으로 안테나를 배치하는 원형 배열 안테나(UCA: Uniform Circular Array)의 경우

$$a_i^{UCA}(\phi, \theta) = \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \phi \cos \theta + y_i \cos \phi \cos \theta)) \quad (6)$$

로,  $x$ - $z$  평면상에 격자 형태로 안테나를 배치하는 평면 배열 안테나(UPA: Uniform Planar Array)의 경우

$$a_i^{UPA}(\phi, \theta) = \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} (x_i \sin \phi \cos \theta + z_i \sin \theta)) \quad (7)$$

가 된다.

안테나 어레이를 이용한 도래각 추정 방법으로 잘 알려진 MUSIC 기법은 수신 신호의 공분산

(covariance) 행렬과 어레이의 방향벡터를 이용하여 (8)과 같이 도래각을 추정한다<sup>11)</sup>.

$$(\hat{\theta}, \hat{\theta}) = \operatorname{argmax}_{(\theta, \theta)} \frac{1}{|\mathbf{a}^H(\theta, \theta) \mathbf{U}_n|^2} \quad (8)$$

여기서  $\mathbf{U}_n$  는 수신 신호의 공분산 행렬에 대하여 잡음 성분에 해당되는 고유벡터(eigen vector)들로 이루어지는 행렬이다.

원형 배열 및 평면 배열 안테나 어레이의 경우 평면상의 2차원 배열이므로 방위각과 양각에 대한 2차원 방향 벡터를 이용하여 신호원의 도래각을 추정할 수 있다. 반면에, 선형 배열 안테나의 경우 직선상의 1차원 배열이기 때문에 (5)의 방향 벡터로 신호원의 방위각 및 양각 모두를 특정 지을 수 없다.

원형 배열 안테나 어레이를 무인기 탑재를 위해 무인기의 수평면(x-y-평면) 상에 탑재할 경우, 상향 양각과 하향 양각에 대해 대칭적인 방향 벡터를 갖기 때문에 상하향 양각을 구별하기 어렵다. 수 km 이하의 고도 차이와 비행 중 무인기의 자세 변화를 고려하면 상하향 양각 구별 문제는 피하기 어려울 수 있다. 또한, 수평 배치로 인하여 수평면에 가까운 양각에 대하여 상대적으로 큰 오차를 수반한다.

평면 배열 안테나 어레이를 무인기의 수직면(x-z-평면) 상에 배치할 경우, 원형 배열 안테나 어레이에서의 발생하는 상하향 양각 구별 문제를 피할 수 있다. 동일한 안테나 수를 배치할 경우 양각 측정을 위하여 수직면에 안테나를 배치하기 때문에 수평 방위각 측정을 위한 안테나 어레이의 크기의 감소로 인하여 방위각 측정 오차의 증가로 이어진다. 또한, 무인기의 크기와 구성에 따라 무인기 측면 또는 배면에 2차원 평면 안테나를 배치하는 데에 제약을 받을 수 있다.

원형 또는 평면 배열 안테나를 이용하는 경우 (8)에서 방위각과 양각을 동시에 추정해야 하므로 선형 배열 안테나에 비해 탐색해야 할 양각에 대한 개수의 배수로 계산량이 급격히 증가한다. 또한, 탑재 중량, 부피, 소비 전력에 제한을 갖는 무인기에 2차원 배열 안테나와 그를 위한 수신 장치를 탑재하는 것은 제약 사항이 될 수 있다.

일반적으로, 선형 배열 안테나의 경우 방위각만의 방향 벡터 (9)를 사용하여 신호원의 도래각을 추정한다<sup>11)</sup>.

$$\mathbf{a}_i^{\text{ULA}}(\phi'_{\text{ULA}}) = \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} x_i \sin \phi'_{\text{ULA}}) \quad (9)$$

그림 1과 같이 선형 배열 안테나 어레이에서 방향 벡터 (9)를 이용하여 측정한 도래각은 신호원의 양각 성분과 무관하게 방위각만을 추정할 수 있다. 반면에, 그림 2와 같이 무인기의 자세를 변화시키면, 무인기에 탑재된 선형 배열 안테나는 기준 좌표축(x축, y축, z축)에 대해 회전하게 되고 회전된 어레이에서 측정한 방위각은 기준 좌표축에 대한 방위각 및 양각의 조합으로 나타난 각도를 측정한 것이 된다.

무인기 위치  $(x_i, y_i, z_i)$ 에서 요(yaw)  $\alpha$ , 피치(pitch)  $\beta$ , 롤(roll)  $\gamma$  각도에 의해 회전된 어레이에 의해 측정된 방위각은 신호원의 위치와 다음 식 (10)의 관계를 갖는다.

$$\phi'_{\text{ULA}}(\mathbf{x}) = \tan^{-1} \frac{[\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{x}]_{1,1}}{[\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{x}]_{1,2}} \quad (10)$$

여기서

$$\mathbf{x} = (x - x_i, y - y_i, z - z_i)^T \quad (11)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha & -\cos \gamma \sin \alpha + \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha & \sin \gamma \sin \alpha + \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ \cos \beta \sin \alpha & \cos \gamma \cos \alpha + \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha & -\sin \gamma \cos \alpha + \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha \\ -\sin \beta & \sin \gamma \cos \beta & \cos \gamma \cos \beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

이고,  $[\mathbf{A}]_{ij}$ 는 행렬  $\mathbf{A}$ 에서  $i$ 행의  $j$ 열의 값을 의미한다. 무인기의 운항 중 다수의 위치에서 무인기의 자세를 변화시키면서 방향 벡터 (9)를 이용하여 측정한 다수의 방위각과 관계식 (10)을 이용하여 신호원의 3차원

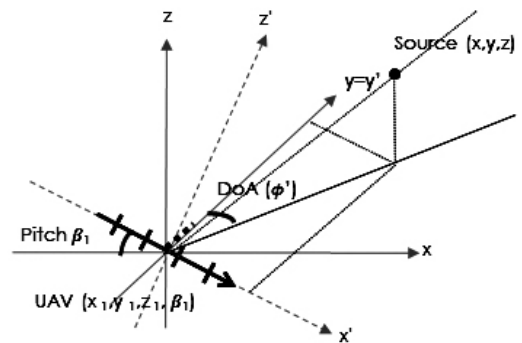


그림 2. 회전된 선형 어레이에 의하여 측정된 도래각  
Fig. 2. Direction of arrival at rotated array

위치를 추정할 수 있다.

회전된 선형 배열 안테나 어레이에서 방향 벡터 (9)에 의해 측정된 도래각  $\phi'_{ULA}$ 은 회전 좌표계에서 신호원의 실제 방위각  $\phi'$  및 양각  $\theta'$ 과 (13)의 관계를 갖는다.

$$\sin\phi'_{ULA} = \sin\phi' \cos\theta' \quad (13)$$

그림 3은 선형 배열 안테나 어레이에서 측정되는 도래각과 실제 방위각과의 차이를 양각별로 나타낸 것이다. 무인기가 신호원으로부터 20~30 km 떨어진 위치에서 비행하고 무인기와 신호원의 고도 차이가 2 km 이하인 경우 양각 크기는 3° 보다 작고 방위각 -60°~60° 범위에서 방위각과 측정 도래각의 차이는 0.25° 이하로 작다. 그러나 이러한 차이는 3 장의 위치 추정 과정에서 평균이 0이 아닌 편향된(biased) 오차로 영향을 주기 때문에 위치 추정 오차를 증가시키는 요인이 된다. 따라서 본 논문에서는 편향 오차를 줄이기 위해 일정한 명목 양각  $E$ 로부터 무인기 자세에 따라 회전된 명목 양각  $\theta'_{nom}$  을 구하고 측정된 방위각을 실제 방위각에 근접할 수 있도록 다음 식 (14)에 의한 방위각 보정을 추가적으로 고려한다.

$$\hat{\phi}'_{ULA} = \sin^{-1}(\sin\phi'_{ULA} / \cos\theta'_{nom}) \quad (14)$$

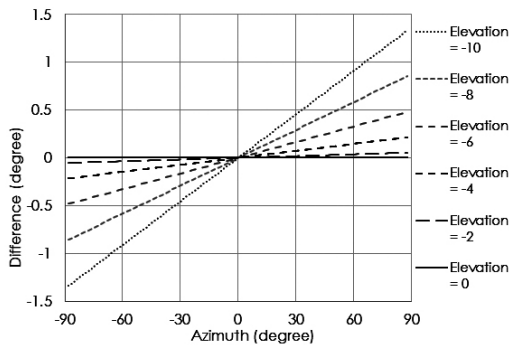


그림 3. 선형 배열 안테나 어레이에서 실제 방위각과 도래각과의 각도 차이  
Fig. 3. Angle difference between azimuth and DoA for a linear antenna array

### III. 도래각에 의한 위치 추정

어레이 안테나를 사용하여  $L$  개의 방위각을 측정하였을 때, 측정된 방위각과 신호원 위치와의 관계는 다음 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\Phi}'_{ULA} = \Phi'_{ULA}(\mathbf{x}) + \mathbf{n} \quad (15)$$

위 식에서

$$\hat{\Phi}'_{ULA} = (\hat{\phi}'_{ULA,1}, \hat{\phi}'_{ULA,2}, \dots, \hat{\phi}'_{ULA,L})^T \quad (16)$$

$$\Phi'_{ULA}(\mathbf{x}) = (\phi'_{ULA,1}(\mathbf{x}), \phi'_{ULA,2}(\mathbf{x}), \dots, \phi'_{ULA,L}(\mathbf{x}))^T \quad (17)$$

$$\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_L)^T \quad (18)$$

이고,  $n_l$ 는 추정 오차이다.

신호원의 위치 추정은  $L$  개의 비선형 관계식 (15)에서 추정 오차를 최소화하는 NLS(Nonlinear Least Square)의 해 (19)에 의해 구할 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$\hat{\mathbf{x}} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} (\hat{\Phi}'_{ULA} - \Phi'_{ULA}(\mathbf{x}))^2 \quad (19)$$

위 식의 해는 Gauss-Newton 반복 기법에 의해 다음 (20)과 같이 얻을 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{F}(\mathbf{x}_k)(\hat{\Phi}'_{ULA} - \Phi'_{ULA}(\mathbf{x}_k)) \quad (20)$$

여기서

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_k) = [\mathbf{G}^T(\Phi'_{ULA}(\mathbf{x}_k))\mathbf{G}(\Phi'_{ULA}(\mathbf{x}_k))]^{-1}\mathbf{G}^T(\Phi'_{ULA}(\mathbf{x}_k)) \quad (21)$$

$$\mathbf{G}(\Phi'_{ULA}(\mathbf{x}_k)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial\phi'_{ULA,1}(\mathbf{x})}{\partial x} & \frac{\partial\phi'_{ULA,1}(\mathbf{x})}{\partial y} & \frac{\partial\phi'_{ULA,1}(\mathbf{x})}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial\phi'_{ULA,L}(\mathbf{x})}{\partial x} & \frac{\partial\phi'_{ULA,L}(\mathbf{x})}{\partial y} & \frac{\partial\phi'_{ULA,L}(\mathbf{x})}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (22)$$

이다.

이와 같은 반복 기법은 초기 값에 민감하며, 초기 값에 따라 지역 최소(local minima)에 빠지거나 해를 찾기 위한 반복 회수가 증가할 수 있다. 실제 신호원의 위치에 근접한 초기 위치 설정을 위해 본 논문에서는 3차원 비선형 관계식 (15)을 선형 근사화한 2차원 선형 관계식 (23)에 의해 신호원의 초기 위치를 ( $x_0, y_0, z_0=0$ )로 설정한다. 측정된 다수의 도래각과 관계식 (23)에 의해 얻어진 2차원 초기 위치를 얻고, (20)의 반복 기법에 의해 신호원의 위치를 추정한다.

$$(\mathbf{x}_0 \ \mathbf{y}_0)^T = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (23)$$

위 식에서

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\phi}'_{ULA,1}) & -\cos(\hat{\phi}'_{ULA,1}) \\ \vdots & \vdots \\ \sin(\hat{\phi}'_{ULAL}) & -\cos(\hat{\phi}'_{ULAL}) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\phi}'_{ULA,1}) x_1 - \cos(\hat{\phi}'_{ULA,1}) y_1 \\ \vdots \\ \sin(\hat{\phi}'_{ULAL}) x_L - \cos(\hat{\phi}'_{ULAL}) y_L \end{bmatrix} \quad (25)$$

이다.

원형 또는 평면 배열 안테나 어레이를 사용하는 경우, 안테나 어레이에 의해 추정된 신호원의 방위각뿐만 아니라 양각 또한 사용한다. 무인기 운항 중  $L$  개의 위치 및 자세에서 측정된 방위각과 양각으로부터, (15)와 유사하게  $2L$  개의 비선형 관계식을 얻을 수 있고, 선형 배열 안테나 경우와 유사한 방법으로 신호원의 3차원 위치를 추정할 수 있다.

#### IV. 모의 실험

2장에서 논의된 안테나 어레이에 의한 도래각 추정과 3장에서 제시된 위치 추정 방식의 성능을, 선형, 원형, 평면 배열 3가지의 안테나 어레이에 대하여 비교하는 모의 실험을 수행하였다.

##### 4.1 모의 실험 환경

무인기는 그림 4와 같이 측정 시작 위치 (-5 km, 0 km, 1.5 km)에서 측정 종료 위치 (5 km, 0 km, 1.5 km)까지  $x$ 축 방향으로 10 km 거리를 속도  $v_x = 60$  km/h로 비행하며, 10분 동안 0.1초 간격으로 총  $L = 6,000$  회 도래각을 측정하였다.

모의실험을 위하여 c++언어를 이용하여 무인기의 운항, 신호원의 신호 발생, 안테나 어레이 및 방향 벡

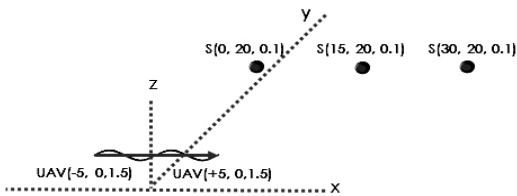


그림 4. 모의실험을 위한 무인기 비행 궤적과 신호원의 위치  
Fig. 4. UAV flight path and signal source location for simulation

터, MUSIC 방식에 의한 도래각 측정, 초기 위치 설정, 가우스 뉴턴 반복 기법에 의한 신호원 위치 추정 과정을 구현하였다.

신호원은 ( $x$  km, 20 km, 0.5 km)에 위치에 있으며  $x = 0, 5, \dots, 30$  km인 각각에 대하여 모의실험을 수행하였다. 신호원은 대역폭 100 kHz인 FM 신호를 발생한다. 신호는 최근접 위치에서 무인기의 안테나 어레이에 신호대 잡음비 SNR = 10 dB로 수신되고, 최근접 위치에서 멀어질수록 자유공간 손실 모델에 따라 감쇄된다.

신호원의 발생 신호는 무인기 탐재 어레이에 수신되고, 도래각은 무인기의 탐재 프로세스에서 0.1 초마다 1,000 개의 수신신호 샘플을 이용하여 2장의 MUSIC 방식에 의해 추정된다. 신호원 개수 검출 방법으로는 [7]에서 제시한 방법을 사용하였다. 무인기 또는 지상국은 수집된 도래각과 무인기의 위치 및 자세로부터 3장의 위치 추정 방식에 따라 신호원의 위치를 추정한다.

안테나 어레이의 안테나 수는  $M=5$  개 이고, 선형 배열 안테나 어레이에서 안테나 사이의 간격은  $\lambda/2$ , 원형 배열 안테나 어레이의 경우  $x^2 + y^2 = \lambda^2$ 를 만족하도록 안테나를 배치하였다. 평면 배열 안테나 어레이의 경우 양각보다 방위각의 정확도를 높이기 위해 수평 방향으로 4 개의 안테나를  $\lambda/2$  간격으로 배치하고, 수직 방향으로  $\lambda/2$  간격으로 1 개의 안테나를 배치하였다.

무인기의 곡선 비행에 따른 무인기 자세(요, 피치, 롤)를 변화시키기 위해, 시간에 따라 무인기 위치를 (26)에 의해 변화시켰다.

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x t \\ -Y_m \sin(\omega t) / 2 \\ Z_m \sin(\omega t) / 2 \end{pmatrix} \quad (26)$$

여기서  $\omega$ 는 10분 동안 2 회의 주기를 갖도록 설정하고,  $Y_m = Z_m = 0, 50, 100, 200$ m로 하였다. 무인기의 피치와 롤은 각각 비행 궤적의  $z$ 축과  $y$ 축의 기울기로 하였다.  $Y_m = Z_m = 0$ m 인 경우는 무인기가 완전한 직선 비행을 하는 경우이고,  $Y_m = Z_m = 50, 100, 200$ m 인 경우는 완전한 정현파 형태의 곡선 비행인 경우로, 각각에 대하여 무인기의 롤 및 피치는  $-3.6^\circ \sim 3.6^\circ, -7.2^\circ \sim 7.2^\circ, -14.1^\circ \sim 14.1^\circ$ 의 범위를 가지며 변화한다.

무인기는 항법 센서에 의해 자신의 위치와 자세를 측정한다. 실험에서 위치 정보에 대한 오차는 각각의

좌표축에 대해 독립적이고 평균 0 및 표준편차 2.5m를 가지는 가우시안 분포이다. 무인기 자세 정보에 대한 오차는 요에 대해 1°, 피치에 대해 0.5°, 롤에 대해 0.5°의 표준편차를 가지는 가우시안 분포로 발생시켰다.

#### 4.2 모의 실험 결과

그림 5에서 그림 10은 선형 배열 안테나를 사용하는 경우 각각 방위각, 양각, x 좌표, y 좌표, z 좌표, 위치에 대한 RMS(root-mean-square) 오차를 나타낸 것이다. 방위각 보정에서 사용된 명목 양각에 대해  $E = 0^\circ, -1^\circ, -2^\circ$ 인 3가지 경우에 대하여 비교하였다. 선형 배열 안테나의 경우 실질적으로 양각을 추정하지 않으나, 그림 6의 양각 오차는 무인기 자세에 따라 회전된 명목 양각  $\theta_{nom}$ 과 회전된 실제 양각과의 차이를

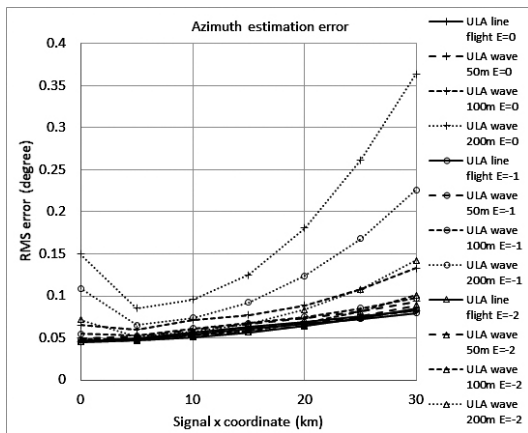


그림 5. 선형 배열 안테나 어레이에 의한 방위각 추정 오차  
Fig. 5. Azimuth estimation error for linear antenna array

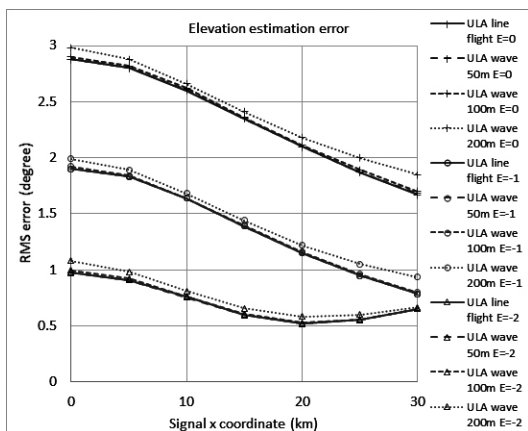


그림 6. 선형 배열 안테나 어레이에 의한 양각 추정 오차  
Fig. 6. Elevation estimation error for the linear antenna array

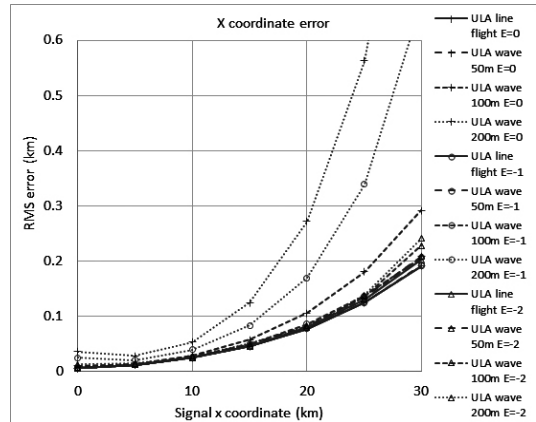


그림 7. 선형 배열 안테나 어레이에 의한 x좌표 추정 오차  
Fig. 7. X-coordinate estimation error for linear antenna array

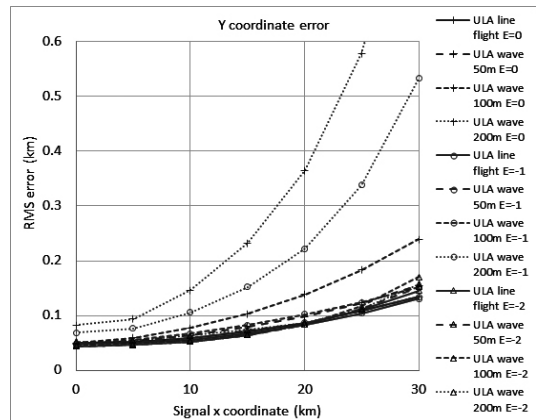


그림 8. 선형 배열 안테나 어레이에 의한 y좌표 추정 오차  
Fig. 8. Y-coordinate estimation error for linear antenna array

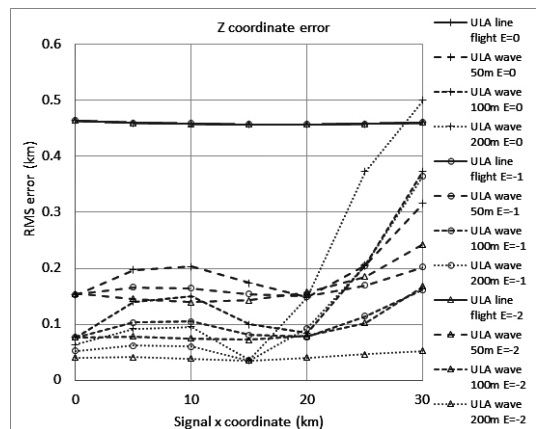


그림 9. 선형 배열 안테나 어레이에 의한 z좌표 추정 오차  
Fig. 9. Z-coordinate estimation error for linear antenna array

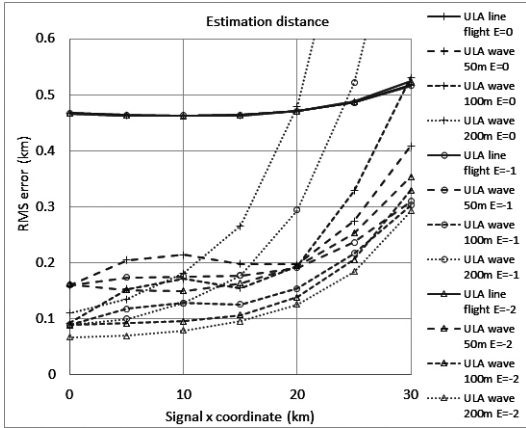


그림 10. 선형 배열 안테나 어레이에 의한 위치 추정 오차  
Fig 10. Distance error for linear antenna array

나타낸 것이다. 신호원 x 좌표 0~30 km 범위에 대해 기준 좌표계에 대한 실제 양각은  $-2.9^{\circ} \sim -1.6^{\circ}$  범위의 값을 갖는다.

그림 5와 그림 6에서 명목 양각을 실제 양각에 근접한  $E = -2^{\circ}$ 로 설정할 경우 방위각과 양각의 오차가 감소되고, 곡선 비행의 변이 범위가 클수록 안테나 어레이의 회전이 커지므로 그 오차는 증가한다.

그러나 곡선 비행을 시켰을 경우, 어레이에서 측정된 방위각은 자세에 따라 x, y 좌표뿐 만 아니라 z 좌표 성분을 포함하기 때문에, 그림 9에서 같이 직선 비행의 경우에 비해 z 축 오차의 감소와 그림 10에서 볼 수 있듯이 위치 추정 성능의 개선이 이루어진다. 모의 실험에서 z 좌표 추정 값은 0~1 km의 범위로 한정하였기 때문에, 직선 비행의 경우 z 좌표를 찾을 수 없다는 것을 나타낸다고 볼 수 있다. 곡선 비행을 위한 y축 및 z축 위치 변화가 커질수록 무인기의 롤 및 피치가 커지게 되고 탑재 어레이는 수평이 아닌 보다 많은 수직 방향을 포함한 방위각을 측정하게 된다. 따라서, 곡선 비행을 위한 위치 변화가 클수록 z 좌표 오차는 감소하고 x 및 y 좌표 오차가 증가하게 된다.

명목 양각을 실제 양각에 근접하게 설정한 경우, 곡선 비행의 변화가 클수록 다양한 안테나 어레이의 자세에서 방위각을 측정하므로 가장 우수한 성능을 보인다. 반면에 명목 양각이 실제 양각과 다를 경우, 보다 큰 변화를 갖는 곡선 비행( $Y_m=Z_m=200m$ )보다는 보다 작은 변화를 갖는 곡선 비행( $Y_m=Z_m=50m$  또는  $100m$ )이 오히려 위치추정 성능이 우수하다.

그림 11에서 그림 16은 선형, 원형, 평면 배열의 3가지 배열 안테나에 대해 방위각, 양각, 위치 추정 오차를 비교하여 도시한 것이다. 선형 배열 안테나의 경

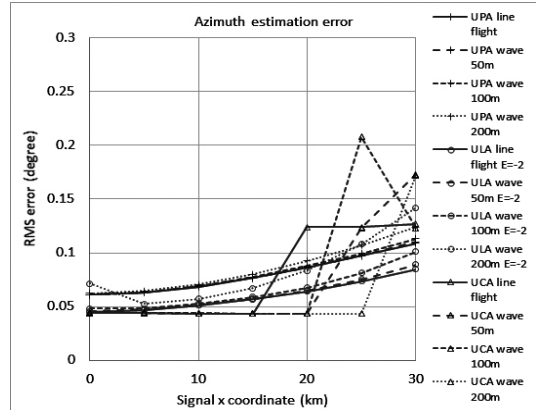


그림 11. 선형, 원형, 평면 배열 안테나 어레이에 대한 방위각 추정 오차 비교  
Fig 11. Azimuth estimation error for linear, circular, and plane antenna arrays

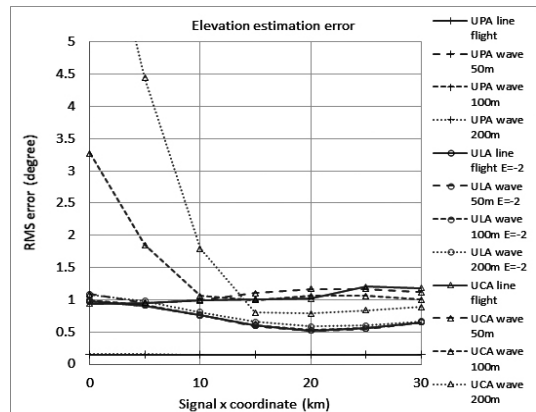


그림 12. 선형, 원형, 평면 배열 안테나 어레이에 대한 양각 추정 오차 비교  
Fig. 12. Elevation estimation error for linear, circular, and plane antenna arrays

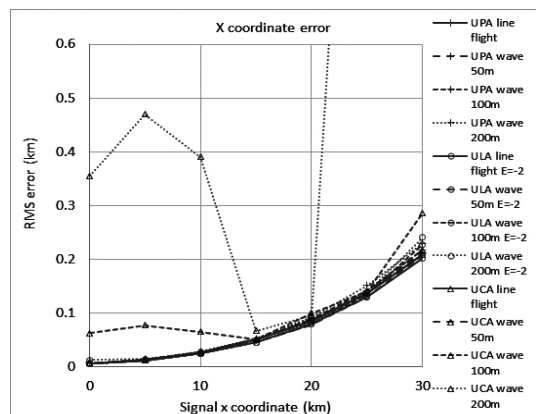


그림 13 선형, 원형, 평면 배열 안테나 어레이에 대한 x좌표 추정 오차 비교  
Fig. 13. X-coordinate estimation error for linear, circular, and plane antenna arrays

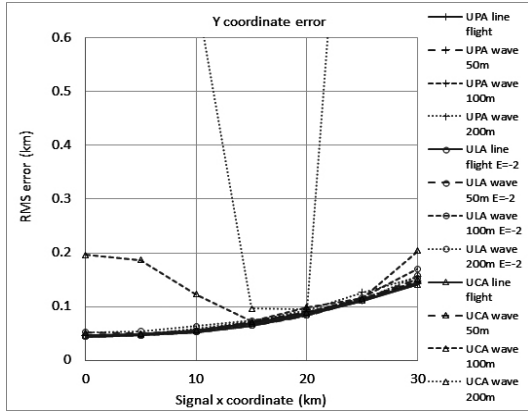


그림 14. 선형, 원형, 평면 배열 안테나 어레이에 대한 y좌표 추정 오차 비교  
 Fig. 14. Y-coordinate estimation error for linear, circular, and plane antenna arrays

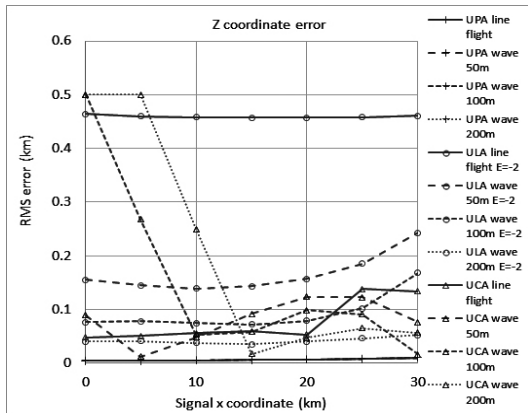


그림 15. 선형, 원형, 평면 배열 안테나 어레이에 대한 z좌표 추정 오차 비교  
 Fig. 15. Z-coordinate estimation error for linear, circular, and plane antenna arrays

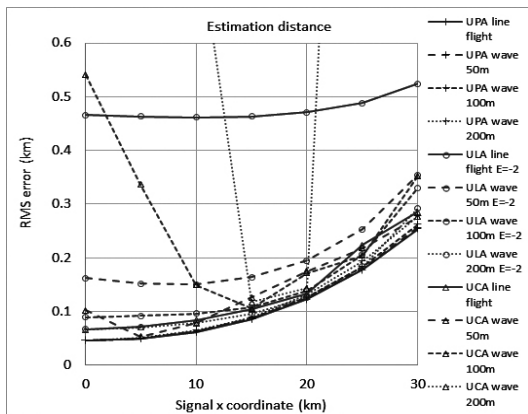


그림 16. 선형, 원형, 평면 배열 안테나 어레이에 대한 위치 추정 오차 비교  
 Fig. 16. Distance error comparison for linear, circular, and plane antenna arrays

우 명목 양각  $E = -2^\circ$  경우에 대한 결과이다.

그림 11과 그림 12에서 원형 배열 안테나 경우 앞서 2장에서 언급한 바와 같이, 수평 배치로 인하여 수평 면상의 도래각 추정 성능이 좋지 못하기 때문에 방위각 또는 양각 추정 성능이 다른 배열 안테나에 비해 열화된 성능을 보인다. 평면 배열 안테나 경우 수평면 배열 안테나 수가 선형 배열 안테나의 경우보다 적기 때문에 방위각 추정 성능은 선형 배열 안테나보다 크나, 수직으로 안테나를 배치하였기 때문에 양각 추정 성능은 보다 우수하다. 그림 13에서 그림 16의 위치 추정 성능 측면에서, 평면 배열 안테나의 경우가 무인기의 비행 형태와 관계없이 안정되고 우수한 성능을 보인다. 그러나 무인기의 밑면 또는 측면에 수평 및 수직 배열을 위한 영역이 확보되어야 한다. 원형 배열 안테나의 경우 수평면 상의 방위각 또는 양각 오차가 크고 상하향 양각 구별이 어렵기 때문에 곡선 비행의 변이가 커질수록 성능이 열화되고, 롤 및 피치  $\pm 3.6^\circ$  이하의 ( $Y_m = Z_m = 50m$ ) 무인기의 자세 변화가 거의 없는 비행의 경우에 대해서만 위치 추정 성능이 가능하다고 볼 수 있다.

선형 배열 안테나의 경우 곡선 비행의 변이를 크게 함으로써 다양한 안테나 어레이에서의 방위각 측정으로 평면 배열 안테나의 성능에 근접함을 볼 수 있다. 평면 배열 안테나에 근접한 성능을 얻기 위해서는 명목 양각에 대한 정보를 필요로 하나, 신호원 탐색 지역의 대략적인 고도와 무인기의 운항 고도로부터 간단히 명목 양각을 설정할 수 있다.

## V. 결론

신호원 위치를 추정하는데 있어서 선형, 원형, 평면 배열 어레이 안테나를 탑재한 단일 무인기를 이용하여 신호원의 도래각을 측정하고 이를 기반으로 신호원의 위치를 추정하는 방법에 대하여 논의하였다.

수평면 상의 원형 배열 어레이 안테나의 경우 수평면 상의 방위각 및 양각 추정 성능이 상대적으로 크고 상하향 양각을 구별할 수 없기 때문에, 무인기의 자세 변화가 거의 없는 직선 비행에 대해서만 위치 추정이 가능하다. 수평 및 수직 배열을 포함한 평면 배열 안테나의 경우 가장 우수한 성능을 보이나, 무인기 밑면 또는 측면에 2차원으로 안테나의 배치가 가능하여야 한다.

선형 배열 어레이 안테나의 경우, 선형 배열로 무인기 탑재가 용이하고, 양각을 제외한 방위각만을 측정하기 때문에 복잡도 측면에서 유리하다. 또한, 무인기



의 곡선 비행에 의한 자세 변화를 이용하면 선형 배열 어레이 안테나에 의한 방위각 만의 측정으로도 신호원의 3차원 위치를 효과적으로 추정할 수 있다.

### References

- [1] T. E. Tuncer and B. Friedlander, *Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation*, Elsevier Academic Press, 2009.
- [2] S. A. Zekavat and R. M. Buehrer, *Handbook of Position Location - Theory, Practice, and Advances*, IEEE Press, 2012.
- [3] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing*, John Wiley & Sons Inc., 2002.
- [4] Y. Lee, et. al., "A BLUE estimator for passive localization by TDOA method," *J. KICIS*, vol. 36, no. 11, pp. 702-711, Nov. 2011.
- [5] S. Lee, S. R. Lee, and S.-C. Kim, "Ship positioning estimation using phased array antenna in FMCW radar system for small-sized ships," *J. KICIS*, vol. 40, no. 06, pp. 1130-1141, Jun. 2015.
- [6] S. Yun, et. al., "Averaging methods for enhancing the performance of DOA estimation under the rotor effect," *J. KICIS*, vol. 37C, no. 12, pp. 1245-1255, Dec. 2012.
- [7] M. Wax and T. Kailath, "Detection of signals by information theoretic criteria," *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Sign. Process.*, vol. ASSP-33, no. 2, Apr. 1995.

### 임 광 재 (Kwangjae Lim)



1992년 2월 : 인하대학교 전자 공  
학과 졸업  
1994년 2월 : 인하대학교 전자 공  
학과 석사  
1999년 2월 : 인하대학교 전자공  
학과 박사  
1999년 2월~현재 : 한국전자통신  
연구원 근무

<관심분야> 무선 및 이동 통신, 무인기 ICT

### 임 형 수 (Hyungsoo Lim)



1992년 2월 : 포항공과대학교 전  
자전기공학과 학사  
1994년 2월 : 포항공과대학교 전  
자전기공학과 석사  
1999년 2월 : 포항공과대학교 전  
자전기공학과 박사  
1999년 3월~2000년 9월 : 한국  
전자통신연구원 근무

2000년 9월~2001년 12월 : DXO 텔레콤 근무

2002년 1월~현재 : 한국전자통신연구원 근무

<관심분야> 무선 및 이동 통신, 측위, 지상파 및 이  
동 방송

### 신 천 식 (Cheon Sig Sin)



1990년 2월 : 한양대학교 전자  
공학과 졸업

2000년 8월 : 한양대학교 전자  
통신공학과 석사

2013년 2월 : 한양대학교 전자  
통신공학과 박사수료

1990년 2월~현재 : 한국전자통  
신연구원 근무

<관심분야> 위성통신, 위성항법 및 GPS 전파교란