한국항행학회 논문지 제15권 제2호 2011년 4월

다수의 지상국(GS)을 이용한 무인 항공기(UAV) 추적 FDOA 기반의 CRLB 성능 분석 연구

Cramér-Rao Lower Bound (CRLB) Analysis for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Tracking with Randomly Distributed Ground Stations Using FDOA Measurements

민병윤*, 안찬호*, 홍석준**, 장진상***, 김동구*

Byoung-Yoon Min*, Chan-ho An* , Seok Jun Hong**, Jeen-Sang Jang*** and Dong-Ku Kim*

요 약

본 논문에서는 다수의 지상국을 이용하여 얻은 FDOA(Frequency Difference of Arrival) 측정값을 통해서 UAV(Unmanned Aerial Vehicle; 무인항공기) 추적 알고리즘의 이론적 경계인 CRLB(Cramér-Rao Lower Bound)를 분석하였다. 첫째로 FDOA 측정값을 시간을 두고 모았을 때 CRLB에 주는 영향을 관찰하였고, 둘째로 지상국이 일정한 범위 안에서 무작위적 위치를 가질 때 그 범위에 따른 FDOA의 측정값이 어떤 특성을 갖는지 확인할 수 있었다. 또한 CRLB의 크기를 측정하여 CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function)로 나타내어 성능을 비교, 분석하였다.

Abstract

In this paper, the performances of Cramér-Rao Lower Bound (CRLB) with Frequency Difference of Arrival (FDOA) measurements for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) tracking are investigated. We focus on two cases: the influence on CRLB with FDOA measurements collected by time, and random distribution of Ground Stations (GSs). We derived the performance by gauging the size of CRLB through Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF). From the simulation results, broader distribution of GSs and FDOA measurements by longer time bring about better performance.

Key words : CRLB, FDOA, UAV, GS, tracking

I. 서 론

최근 기술의 발전과 함께 군사전력체계는 전시상황을 빠르게 정찰하여 통제하는 네트워크 중심교전(NCW; Network Centric Warfare)으로 전환되고 있다. 교전상황의 정보를 실시간으로 송수신하기 위해 데이터링크의 중요성이 부각되고, 이에 따른 향상된 추

* 연세대학교 전기전자공학과 이동통신연구실(Mobile Communication Lab., Electrical and Electronics Eng., Yonsei University)
** 삼성탈레스(Samsung Thales)
*** 국방과학연구소 (Agency for Defense Development)
· 제1저자 (First Author) : 민병윤
· 투고일자 : 2011년 3월 14일
· 심사(수정)일자 : 2011년 3월 14일 (수정일자 : 2011년 4월 6일)
· 게재일자 : 2011년 4월 30일
※ 본 논문은 IEEE ICSAP 2011에서 일부 발표되었음 [6]

적성능을 요구하는 연구가 진행되고 있다[1].

특히 무인항공기(UAV; Unmanned Aerial Vehicle)를 운용하는 기술은 추적의 중요한 이슈이다. UAV의 전장상황 및 민간활동에서의 적용 가능성 때문에 이러한 기술은 뚜렷한 적용환경을 요하고 있다[2]. UAV와 지상국의 송수신 환경에서 도착하는 신호의 시간차이(TDOA; Time Difference of Arrival), 도플러 효과에 의한 주파수차이(FDOA; Frequency Difference of Arrival)는 추정에 널리 이용되어왔다. 특히 수신기가 3개 이상인 경우, 서로 다른 쌍에 의해 다수의 TDOA 혹은 FDOA의 쌍곡선의 교점을 이용하는 기법을 통해 방사체를 추정하게 된다[3].

특히 협대역 신호의 경우 FDOA 측정값이, 광대역 신호의 경우 TDOA 측정값이 좋다. 때문에 FDOA와 TDOA 측정값을 동시에 이용하여 각각의 장점을 이용할 수 있다[4]. 이 때 FDOA, TDOA 측정값을 통해서 방사체의 위치를 추정하는 문제는 복잡한 비선형 문제로 나타난다. 특정한 상황에서 다수의 센서를 이용하여 측정값을 얻은 뒤 방사체의 위치와 속도를 실시간으로 추정하는 연구도 진행되고 있다[5]. 그러나 이러한 측정값의 특성상 UAV와 달리 상태가 급변하는 물체를 추정하는데 많은 초점이 맞추어져 있다.

본 논문에서는 움직임의 변화가 적은 UAV의 추정에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 본 논문의 선행연구로 UAV와 지상국간의 거리와 FDOA 측정값이 CRLB에 주는 영향을 진행하였다[6]. 동일한 거리에 위치한 다수의 지상국이 서로 협동하는 상황을 가정하고, FDOA 측정값을 이용하여 UAV의 위치를 추정하는 기법으로 CRLB(Cramér-Rao Lower Bound)를 이용한다. 하지만 실제 UAV를 추정하는 환경에서는 지형적 또는 운용상의 제약으로 지상국의 위치가 비정형화된 분포를 나타내게 된다. 따라서 본 연구에서는 다수의 지상국이 일정 범위에 임의로 분포하는 경우와 거리에 따른 고려를 추가하여, CRLB의 성능을 분석하고 UAV의 GPS 위치정보가 없을 때 추정을 위한 기법을 제안한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서 이론적 통신 모델을 소개하고 가정한다. 3절에서는 FDOA의 개념과 측정값을 다루는 기법, 측정 오차, CRLB의 정의를 보여준다. 4절에서 시뮬레이션 환경과 결과를 보여주고 5절에서 본 논문의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 이론적 통신 모델

특정한 전시 상황에서 무인항공기(UAV)를 운용하기 위해서는 정확한 추적 알고리즘을 필요로 한다. UAV와 지상국(GS)은 각각의 안테나를 이용해 서로 통신하며, 지상국에서 신호를 분석하여 UAV의 위치를 추적한다. 본 논문에서는 평탄한 지상에 위치한 다수의 지상국과 UAV간의 통신을 가정한다. 이 때 신호가 전달되는 과정에 존재하는 지리적, 지형적 특성은 고려하지 않는다. 신호의 시간 지연과 도플러 효과에 의한 모델은 크게 송신단과 수신단 두 파트로 나뉜다. 송신단 $\widetilde{s_t}(t)$와 수신단 $\widetilde{s_r}(t)$의 신호 분석 모델은 다음과 같다.

$$\widetilde{s_t}(t) = E(t)e^{j[\omega_c t + \phi(t)]}, \tag{1}$$

$$\widetilde{s_r}(t) = E([1-v/c]t-\tau_d) \times e^{j\{\omega_c([1-v/c]t-\tau_d)+\phi([1-v/c]t-\tau_d)\}}. \tag{2}$$

여기서 $E(t)$는 시간 t에서 신호의 에너지를 나타내고, v는 UAV와 지상국 간의 상대속도, c는 빛의 속도, τ_d는 시간 지연, 그리고 ω_c는 반송 주파수를 의미한다. 위의 신호에 협대역 근사법[7]을 적용하면 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{s_r}(t) = e^{-j\omega_c\tau_d} \times e^{-j\omega_c(v/c)t} \times e^{-j\omega_c t} \times E(t-\tau_d)e^{j\phi(t-\tau_d)}. \tag{3}$$

수식 (3)에서 곱으로 연결되어 있는 4개의 항은 차례로 상수 값의 위상, 도플러 변화, 반송파, 그리고 송신 신호의 저역 통과 등가(LPE) 항을 의미한다.

따라서 수식 (3)의 수신 신호의 상호 상관도로부터 얻을 수 있는 복소수 모호성 함수(CAF)를 이용하여 도플러 변화와 시간 지연 값을 얻는 것을 가정한다. 본 논문에서는 위의 통신 모델을 기본으로 하여 CAF로부터 정확한 측정값을 얻을 수 있음을 가정하고 이

에 대한 자세한 알고리즘은 생략한다.

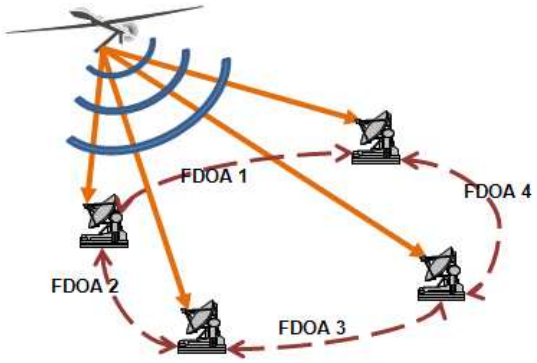


그림 1. 다수 지상국 대 단일 UAV 시스템
Fig. 1. Many(GSs)-to-one(UAV) system.

Ⅲ. FDOA를 이용한 CRLB 분석 기법

3-1 Frequency Difference of Arrival

지상국과 UAV간의 통신에서 사용되는 반송 주파수는 상대속도에 의해 도플러 효과를 받게 되고 수신 주파수에 변화가 나타난다. 지상국에서는 센서를 통해 변화된 반송 주파수를 측정하고 이를 FOA (frequency of arrival)라 한다. 본 논문에서는 다수의 지상국을 이용하여 측정되는 주파수의 차이를 데이터로 이용한다. FDOA를 측정하기 위해 고정된 다수의 지상국 간의 쌍체 비교(pairwise) 네트워크를 그림 1에서 나타내고 있다. 쌍체 비교 네트워크는 중앙 집중 네트워크와 달리 별도의 사령부가 존재하지 않기 때문에 각 측정치 간의 상관도가 낮다.

본 논문에서는 FDOA를 측정하기 위해 필요한 위치와 속도 정보를 포함한 벡터를 이용한다. 실제 모델을 단순화하여 2차원 공간을 가정했을 때, 지상국 i의 벡터 $\mathbb{G}^i$와 UAV의 벡터 $\mathbb{U}$는 다음과 같다.

$$\mathbb{G}^i = \left[x_G^i \;\; y_G^i \;\; 0 \;\; 0\right]^T, i = 1, \ldots, N, \tag{4}$$

$$\mathbb{U} = \left[x \;\; y \;\; v_x \;\; v_y\right]^T. \tag{5}$$

여기서 $[\,\bullet\,]^T$는 전치행렬이고, x_G^i와 y_G^i는 i번째 지상국의 위치를 나타낸다. 또한 x와 y는 UAV의 위치를 나타내며, v_x와 v_y는 각각 UAV의 x, y축 속도를, N은 자연수로 지상국의 수를 의미하고, 이는 쌍체 비교 네트워크에서 측정치를 얻을 수 있는 쌍의 개수를 나타낸다.

따라서 지상국 i, j의 쌍에서 얻을 수 있는 FDOA 측정값($\nu_{i,j}$)은 다음과 같다. (UAV의 위치는 매 시간 샘플(t)마다 변하지만 수식의 간략화를 위해 표기는 생략한다.)

$$\nu_{i,j} = \frac{f_0}{c}\frac{d}{dt}(R_i - R_j), \tag{6}$$

여기서 f_0는 송신 신호의 주파수이고, R_i(또는 R_j)는 UAV와 지상국 i(또는 j) 간의 거리로 다음과 같이 나타낼 수 있다..

$$R_i = \frac{\left(x - x_G^i\right)v_x + \left(y - y_G^i\right)v_y}{\sqrt{\left(x - x_G^i\right)^2 + \left(y - y_G^i\right)^2}}. \tag{7}$$

3-2 FDOA 측정 오차

수식 (6)으로부터 얻은 각 쌍의 FDOA 측정값을 통해서 얻은 M-차원의 벡터는 다음과 같다.

$$\vec{s} = \left[\nu_{1,2} \;\; \nu_{2,3} \;\; \cdots \;\; \nu_{M-1,M} \;\; \nu_{M,1}\right]^T. \tag{8}$$

여기서 M은 자연수이고 FDOA 측정값의 개수를 나타낸다. 이러한 FDOA를 실제 측정에서는 기상조건이 악화되거나 데이터링크의 약화 등 많은 변수로 인해 측정 오차가 발생하게 된다.

본 논문에서는 더 나은 성능을 위해 측정값을 일정한 시간간격 T를 두고 모으는 기법을 제안하고, M을 다음과 같이 정의한다.

$$M = N \times T. \tag{9}$$

FDOA의 측정 오차는 M-차원의 벡터로 표현이 가능하며, 측정값에 더해져 다음과 같은 수신 벡터를

형성한다.

$$r_i = s_i + \epsilon_i, \;\; i = 1, ..., M. \tag{10}$$

여기서 r_i는 수신 벡터의 i번째 원소이고, $\vec{\epsilon}$은 측정 오차 벡터로 $N(0, \mathbb{C})$의 다변수 정규분포를 갖는다. $\mathbb{C}$는 공분산 행렬을 의미하며 다음과 같은 구조를 갖는다. 충분히 긴 시간과 대역폭을 가정할 때, 수신 신호와 잡음 프로세스는 이상적인 SNR (Signal-to-Noise Ratio)을 갖는다. 이 때 다중 FDOA 측정값은 근사적으로 독립을 가정할 수 있다.

$$\mathbb{C} = diag\{\mathbb{C}_1, \mathbb{C}_2, ..., \mathbb{C}_M\} = \begin{bmatrix} \mathbb{C}_1 & \mathbb{O} & \mathbb{O} \\ \mathbb{O} & \ddots & \mathbb{O} \\ \mathbb{O} & \mathbb{O} & \mathbb{C}_M \end{bmatrix}. \tag{11}$$

공분산 행렬은 각각의 FDOA 측정값이 서로 상관도가 0이라는 가정 하에 블록 대각형태를 갖는다.

3-3 Cram□r-Rao Lower Bound

CRLB는 모든 비편향 추정(Unbiased estimator)의 분산의 하계값을 갖는 것으로 잘 알려져 있다. 근사를 통하여 CRLB의 형식을 단순화하고, FIM(Fisher Information Matrix)를 이용하여 CRLB를 정의한다[8].

본 논문에서는, 확정적 신호와 가우시안 잡음의 경우 CRLB를 유도하면 공분산 항의 영향을 무시하고 평균값에 의해 결정되는 특성을 이용한다. 따라서 CRLB 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbb{C}_{CRLB}(\overrightarrow{x_e}) = \left[\mathbb{H}^T \mathbb{C}^{-1} \mathbb{H}\right]^{-1}. \tag{12}$$

여기서 $\overrightarrow{x_e}$는 UAV의 위치와 송신 주파수를 원소로 갖는 벡터 $[x \;\; y \;\; z \;\; f_0]^T$이고, $\mathbb{H}$는 측정값 벡터 $\vec{s}$의 야코비안 행렬이며 다음과 같다.

$$\mathbb{H} = \frac{\partial \vec{s}(\overrightarrow{x_e})}{\partial \overrightarrow{x_e}} = \left[\frac{\partial \vec{s}(\overrightarrow{x_e})}{\partial x} \;\; \frac{\partial \vec{s}(\overrightarrow{x_e})}{\partial y} \;\; \frac{\partial \vec{s}(\overrightarrow{x_e})}{\partial z} \;\; \frac{\partial \vec{s}(\overrightarrow{x_e})}{\partial f_0} \right]. \tag{13}$$

본 논문에서는 결과의 가시화를 위해 2차원 공간 상황을 가정하고, 수식 (12)로부터 도출된 4×4 행렬을 2차원 공간으로 투영한다. 투영된 CRLB 성능을 관찰하기 위한 2차원의 오차 타원은 다음과 같다.

$$\overrightarrow{\theta}^T \mathbb{C}_{CRLB}^{-1} \vec{\theta} = -2\ln(1 - P_e) = k. \tag{14}$$

여기서 $\vec{\theta}$는 x, y를 갖는 2차원 위치벡터이고, $\mathbb{C}_{CRLB}^{-1}$는 2차원 공간에 투영된 CRLB 행렬의 역행렬이며, P_e는 추정된 위치가 오차 타원 내에 들어갈 확률을 의미한다. 본 논문에서는 CRLB의 성능을 분석하기 위해 $\mathbb{C}_{CRLB}$의 고유벡터와 고유값을 이용한다. 2차원의 오차 타원의 2개의 고유벡터는 타원의 축을 의미하고, 각 축의 길이는 $\sqrt{k\lambda_i}$로 구할 수 있다. 이 때 λ_i는 i번째 고유벡터에 대응되는 고유값을 나타낸다.

Ⅳ. 시뮬레이션 분석

4-1 UAV-지상국간의 운동 모델

UAV의 전장상황 임무를 수행하기 위하여 정해진 주로를 운용하는 환경은, 보통 직선운동이나 완만한 커브를 갖는 곡선운동으로 설정된다. 본 논문에서는 기상 조건이나 운용 오차 등을 고려한 직선운동을 가정하고 다음과 같은 운동 모델을 이용한다.

$$\mathbb{U}[k+1] = \mathbb{A} \bullet \mathbb{U}[k] + \vec{\eta}. \tag{15}$$

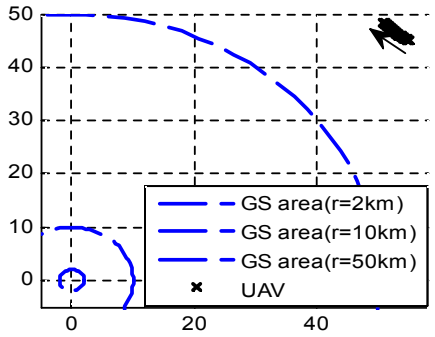
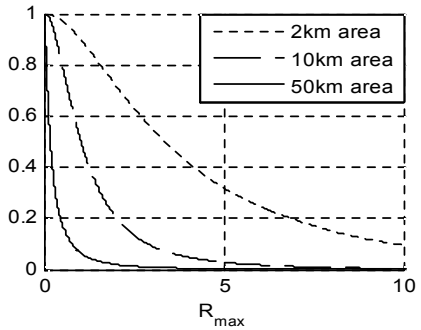
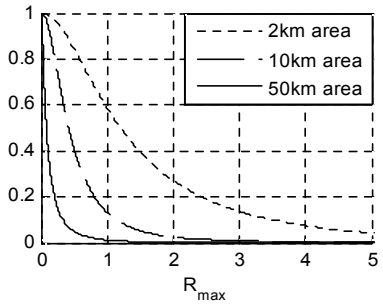


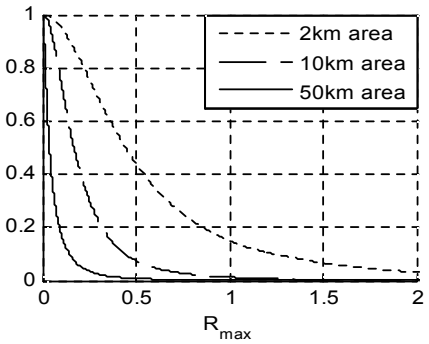
그림 2. UAV 운동모델 및 GS 분포영역(km)
Fig. 2. UAV movements and GS distribution area.



(a) 1초 (20 samples)



(b) 2초 (40 samples)



(c) 4초 (80 samples)

그림 3. GS 분포영역과 측정시간{(a) 1초,(b) 2초, (c) 4초}에 대한 $R_{\max}$(km)의 CCDF 성능
Fig. 3. CCDF of $R_{\max}$ through the area of GS distribution and FDOA collection time (a) 1sec, (b) 2sec, (c) 4sec.

수식 (16)에 나타낸 바와 같이 $\mathbb{A}$는 UAV의 위치와 속도에 대한 상태 변이 행렬을, $\vec{\eta}$는 평균이 0인 백색 가우시안(White Gaussian) 오차 벡터를 나타내며, 속도 성분에만 영향을 미친다.

$$\mathbb{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \vec{\eta} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \eta_x \\ \eta_y \end{bmatrix}. \tag{16}$$

여기서 η_x, η_y는 각각 $N(0, \sigma_{\eta_x}^2), N(0, \sigma_{\eta_y}^2)$의 정규분포를 갖는다. UAV가 급격히 움직이지 않는 특성을 고려하여 적절한 분산값을 취해서 운동 모델에 이용할 수 있다. 그림 2에서는 UAV와 지상국간의 분포를 알 수 있다. 지상국은 일정한 원 모양의 범위 안에 임의로 분포한다.

4-2 시뮬레이션 환경

본 시뮬레이션의 환경은 다음과 같다. UAV의 평균 속도는 120km/h이고, $\sigma_{\eta_x}^2, \sigma_{\eta_y}^2$는 각각 1.8km/h의 분산값을 갖고, (55, 45)km에서 출발하여 약 100초간 운행한다. 송신 주파수는 15GHz를 사용하고, P_e는 0.95로 설정했다. 지상국에서 FDOA를 측정하는 간격은 0.05초이며, FDOA를 수집하여 CRLB를 그리는 주기 T는 1, 2, 4초로 변화시켰다. 또한 4개의 지상국은 일정한 범위 내에 무작위로 분포하며 반지름의 크기는 2, 10, 50km로 가변시켰다. FDOA 측정오차ϵ_i는 일정시간동안 수집된 값의 5% RMS(Root Mean Square)값을 분산으로 갖는다.

4-3 시뮬레이션 결과

그림 3은 $R_{\max}$에 대한 CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function)를 나타낸다. CCDF는 누적분포함수(CDF)와 상보관계를 가지며, 본 결과에서는 '$R_{\max}$를 넘는 CRLB 오차 타원의 축이 존재할 확률'로 해석된다. 여기서 $R_{\max}$는 CRLB 오차 타원의 축의 길이의 최대값을 의미한다. 그림 3-(a), (b), (c)에서 공통적으로s 지상국이 분포하는 영역의

반지름에 대한 CCDF를 확인할 수 있다. 지상국이 넓은 영역에 분포할 가능성이 높을수록 오차 타원의 크기가 작을 확률이 높다는 것을 확인할 수 있다. 또한 각각의 결과를 통해 FDOA 측정값을 수집하는 시간에 대한 결과 비교를 할 수 있다. FDOA를 긴 시간동안 모을수록 타원의 크기가 작아지는 것을 알 수 있다. 예를 들어 지상국이 10km 원에 분포할 때, R_{max}가 2km보다 작은 값을 갖는 확률은 FDOA 수집시간이 1초일 때 약 0.8이다. 동일한 조건에서 수집시간이 2초가 되면 그 확률은 약 0.96이 되고, 수집시간이 4초인 경우 거의 1의 확률로 수렴한다. [6]의 결과와 달리 본 연구는 측정값의 수집시간 뿐만 아니라 지상국이 운용되는 지역적 특성을 고려하여 실험하였다. 실제 지상국은 산악지형, 절벽 등의 지리적 조건에 의해 임의의 위치를 가질 수 있고, 본 실험에서는 다양한 조건의 평균 결과를 다루고 있다.

그림 4는 지상국이 분포하는 영역의 크기에 따른 $\pm 1^{\circ}$ 오차율을 나타낸다. 지상국에서 UAV를 지향하는 안테나를 이용하여 위치를 추정할 때, $\pm 1^{\circ}$를 갖는 CRLB 오차 타원의 최대 길이는 약 1.24km이다. 즉, 1.24km를 넘는 R_{max}가 존재할 확률을 의미한다. 오차율은 지상국이 분포하는 영역이 작을수록 1에 가깝고 영역이 넓어질수록 거의 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 단, 4개의 지상국이 일정 영역에서 임의로 분포하므로 만약 지상국 간의 거리가 가깝게 분포하는 경우에는 영역이 넓더라도 성능이 떨어지는 경우가 발생한다. 이러한 이유로 오차율은 완전히 0에 붙지 못하고 작은 오차율을 내재하게 된다.

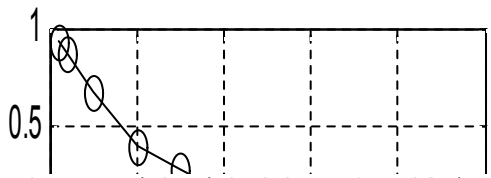


그림 4. GS 영역크기에 대한 $\pm 1^{\circ}$ 오차율 (1sec)
Fig. 4. $\pm 1^{\circ}$ angle error probability about the area of GS distribution (1sec).

V. 결 론

본 논문은 FDOA 측정값을 이용한 CRLB로 UAV의 추적을 위한 기법을 제안하고 분석하였다. UAV의 운용환경에서 CRLB의 크기를 오차 타원의 축을 이용하여 구하고, 분포를 CCDF 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. CCDF와 각도 오차율에 대해서 모두 지상국이 넓은 영역에 분포할수록 좋은 성능을 보였다. 또한 FDOA 측정값을 시간을 두고 많이 모을수록 CRLB의 성능이 좋아졌다. 다만 일정 영역에서 지상국은 임의로 분포하기 때문에 가까운 거리의 지상국 쌍이 있는 경우, 오차율을 내재하게 되는 결과를 얻었다. 즉, 다양하고 독립적인 FDOA 측정치를 이용하여 CRLB를 얻을수록 정확한 추정 성능이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 향후 연구로 FDOA 측정값만 뿐만 아니라 다양한 종류의 측정값을 선택적으로 활용하는 알고리즘을 제시하고, 다양한 환경을 내재한 결과를 분석할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 삼성탈레스(데이터링크 안테나 빔 고속 추적 및 안정화 알고리즘 최적화 방안)의 지원으로 수행하였음.

참 고 문 헌

[1] 민병윤, 안찬호, 박의영, 김동구, “도플러 주파수를 이용한 GPS 기반 시스템에서의 무인항공기(UAV)-중계 UAV(Relay)간의 추적 알고리즘,” *한국통신학회 하계종합학술발표회 2010*, 제주도, vol.42, pp.585, 2010.6월.

[2] C.-H. An, J.H. Yang, D.K. Kim, U.Y. Pak and K. Kwon, "Numerical analysis of transmission efficiency to guarantee the QoS for densely distributed UAV with randomly located ground station," in Proc. *IEEE ICCAE 2010, Singapore,* vol.2, pp.426-429, Feb.2010.

[3] K. Ho and Y. Chan, "Solution and performance analysis of geolocation by TDOA," *IEEE Trans. Aerosp. Electro. System*, vol.29, no.4, pp. 1311-1322, Oct.1993.

[4] D. Musicki, R. Kaune, and W. Koch, "Mobile emitter geolocation and tracking using TDOA and FDOA measurements," *IEEE. Trans. on Signal Process,* vol.58, no.3, Mar.2010.

[5] K. Ho, X. Lu, and L. Kovavisaruch, "Source localization using TDOA and FDOA measurements in the presence of receiver location errors: Analysis and solution," *IEEE Trans. Signal Precess*., vol.55, no.2, pp.684-696, Feb.2007

[6] B.Y. Min, C.-H. An, S.J. Hong, J.S. Jang, U.Y. Pak, and D.K. Kim, "Cramér-Rao Lower Bound analysis for many-to-one UAV tracking using FDOA measurements," in Proc. *IEEE ICSAP 2011, Singapore*, vol.2, pp.427-431, Feb.2011.

[7] S. M. Kay, Fundamental of Statistical Signal Processing: Estimation Theory, *Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA*, 1993.

[8] W. Gardner, "Likelihood sensitivity and the Cramér-Rao bound (Corresp.)," *IEEE Trans. Info. Theory,* vol.25, no.4, pp.491, Jul.1979

민 병 윤 (閔丙潤)

2010년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2010년 3월~현재 연세대학교 전자공학과 석,박사 통합과정
관심분야 : 통신 신호처리 시스템, Interference Alignment, Cooperative MIMO 기술, 추적 알고리즘

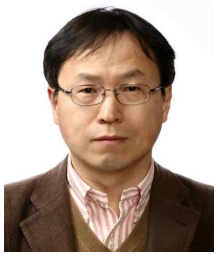
안 찬 호 (安贊濩)

2006년 2월 경희대학교 전자정보학부 (공학사)
2008년 2월 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2008년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
관심분야 : 통신 신호 처리 기술, Lattice Reduction, Compressed Sensing, UAV 추적 기술

홍 석 준 (洪碩晙)

1997년2월 : 광운대학교 전자공학과 (공학사)
2006년2월 : 연세대학교 전자공학과 (석사)
2008년 9월 ~ 현재 : (주)삼성탈레스 전문연구원
관심분야 : 초고주파, 무선통신, 안테나

장 진 상 (張振相)



1985년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1987년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
2003년 12월 Univ. of Toledo 전기컴퓨터과학과 졸업(공학박사)
1987년 2월~현재 국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 통신네트웍, OFDM, MIMO

김 동 구 (金東九)

1983년 2월 : 한국항공대학교 통신공학과 (공학사)
1985년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 석사
1992년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 박사
1994년~현재 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 교수
관심분야 : 4세대 이동통신 시스템, 협력 MIMO 기술, 무선 이동 Relay 기술, Compressed Sensing, 차세대 에너지 효율 무선 시스템 기술