

로터 영향 하에서의 DOA 추정 성능 개선을 위한 평균화 방법

윤 선 희*, 오 중 찬*, 김 준 오**, 최 상 욱**, 안 재 민^o

Averaging Methods for Enhancing the Performance of DOA Estimation Under the Rotor Effect

Seonhui Yun*, Jongchan Oh*, Jun O Kim**, Sangwook Choi**, Jae Min Ahn^o

요 약

전파 교란에 취약한 GNSS 시스템을 위하여 다양한 항재밍 알고리즘들이 존재하며, 배열 안테나를 이용한 방식이 가장 좋은 성능을 보인다. 그 중 재머의 위치를 파악하기 위한 DOA 추정 알고리즘의 역할이 매우 중요하다. 그러나 헬기의 경우 로터의 회전에 의해 정지 동체와 달리 진폭과 위상이 시간에 따라 변하는 무선 채널이 형성되어 기존 항재밍 알고리즘의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 로터 영향을 안테나 간 상관성에 따른 네 개의 시나리오로 모델링하였으며 로터 영향에 의해 DOA 추정 알고리즘의 성능이 저하되고 JNR에 관계 없이 성능이 포화됨을 확인하였다. 이의 해결을 위해 평균화 방식을 이용하였을 때 추정 샘플의 누적 수가 많아 질수록 성능이 향상되며 이동 평균 방식을 함께 이용할 경우 유사한 성능을 내면서도 필요한 메모리 수를 줄이고 DOA 추정 변동량이 완화됨을 확인하였다.

Key Words : DOA, rotor, MUSIC, ESPRIT, GNSS, 도래각 추정, 로터 영향

ABSTRACT

There are various anti-jamming algorithms for the GNSS system which is vulnerable to jamming, and the methods using array antenna show the best performance. Among them, the DOA estimation algorithms to identify the location of the jammer is very important. However, in case of the rotorcraft, the wireless channel which amplitude and phase changes with time is generated by the rotation of the rotor and it affects the performance of existing anti-jamming algorithms. In this paper, we modeled the effect of the rotor in four scenarios according to the correlation of antennas and assured that the performance of DOA estimation algorithms are degraded and saturated regardless of JNR due to the rotor effect. When we use the averaging method to solve this problem, the performance is improved as increasing samples for estimating. And in case of using moving average method with averaging, it shows similar performance. In addition, it reduces the required memory and moderates the variation of DOA estimation.

I. 서 론

GNSS(Global Navigation Satellite System)는 인공위성을 이용하여 위치 정보를 획득하는 체계로서^[1]

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 한국형 소형 무장헬기 위탁 연구 사업의 일환으로 수행되었습니다.

♦ 주저자 : 충남대학교 전자전과정보통신공학과 이동멀티미디어통신 연구실, shyun@cnu.ac.kr, 정회원

° 교신저자 : 충남대학교 전자전과정보통신공학과 이동멀티미디어통신 연구실, jmahn@cnu.ac.kr, 종신회원

* 충남대학교 전자전과정보통신공학과 이동멀티미디어통신 연구실, jcoh@cnu.ac.kr 준회원

** 국방과학연구소 제3기술연구본부 4부장실, jokim@add.re.kr, swchoi@add.re.kr

논문번호 : KICS2012-08-382, 접수일자 : 2012년 8월 28일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 15일

표 1. GPS 교란 주요 사례^[3]
Table 1. Major cases of GPS jamming

March and April 2003	Iraqi forces used GPS jammer to confuse on the U.S. military's weapons systems in Iraq War
January 2007	U.S. fleet operated GPS jammer to training the situation of the loss of communication. As a result, GPS receiver malfunction occurred around in San Diego harbor
23 to 25 August 2010	GPS signal reception is stopped for a few hours from Hongdo, Jeonnam to Taean, Chungnam due to GPS jamming signal from North Korea
March 4, 2010	GPS jamming signal from North Korea cause some GPS receivers to malfunction in northwestern of the metropolitan area. As a result, the clock of cellular phone didn't correct or the call quality was degraded

1970년대 초, 미 국방부가 군사 목적으로 GPS(Global Positioning System)를 구축하여 민간에 개방되었다. 러시아에서도 GLONASS(Global Navigation Satellite System)를 운용하고 있으며 유럽 연합을 중심으로 한 갈릴레오(Galileo)와 중국의 컴퍼스(Compass)가 개발 중에 있다.

GNSS는 무기 유도, 병력 배치 및 보급 등의 군사 목적뿐만 아니라 GIS(Geographic Information System)와 결합하여 교통 안내 시스템, 항공기 및 선박 유도 등 민간 항법 분야에 활발히 이용되고 있으며 이동통신망, 전력망, 금융망, 물류 등의 국가 기간 시설에도 활용되는 등 민·군의 광범위한 영역에서 다양하게 응용된 방식으로 사용되고 있다. 그러나 GNSS는 지상 2만 km 이상에서 운용되는 중궤도 위성을 이용하므로 위성파와 GNSS 수신기간 거리가 매우 멀어 위성 신호는 약 -130dBm 정도로 수신되며^[2], 이는 잡음 레벨보다 낮은 수신 신호 전력으로서 의도적·비의도적 간섭에 매우 취약하다. 따라서 전 세계적으로 GNSS에 대한 전파 교란(jamming) 문제가 지속적으로 대두되고 있으며^{[3][4]} 이러한 전파 교란에 의한 간섭 영향을 받을 경우 산업 및 사회 전반에 큰 타격을 입을 수 있다. 또한 최근 들어 북한의 GPS 전파 교란으로 남북 긴장감이 고조되기도 하였는데, 현재 군의 각종 무기 및 장비 중 GPS 교란에 취약한 상용 GPS를 쓰는 경우가 많아 이에 대한 대책 마련이 시급한 상태이다.

이에 따라 전파 교란에 대응하기 위한 다양한 항재밍 기술들이 연구 및 개발되어 왔으며^{[5][6]} 특히

배열 안테나 기법을 이용한 협대역 간섭 처리 기술이 가장 효과적인 항재밍 성능을 보인다. 전파 교란에 대응하기 위해서는 재밍 신호의 위치 파악이 중요하며 이를 처리하기 위한 DOA(Direction of Arrival) 추정 알고리즘 또한 많은 연구 결과가 존재한다. DOA 추정 알고리즘들은 스펙트럼 추정(spectral estimation) 방법, MVDR(Minimum-Variance Distortionless response) 추정 방법, 선형 예측(linear prediction) 방법, ME(Maximum Entropy) 방법, ML(Maximum Likelihood) 방법, 고유치 구조(eigenstructure) 방법 등이 있다^[7].

현재까지 연구되어온 DOA 추정 알고리즘은 정적(static) 환경 및 선형, 원형 등의 단순 이동 환경을 대상으로 한 성능 연구가 주를 이룬다. 그러나 헬기의 경우 로터의 회전 영향에 의해 기존의 위성-수신기간 무선채널과 다른 형태의 유사 페이딩 채널이 형성되고 이 영향으로 수신 신호 형태가 변화한다는 연구 결과^[8]에 따라 로터에 의해 생성되는 채널이 기존에 연구되었던 DOA 추정 알고리즘 성능을 악화시키는 요인이 될 것으로 예상할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 GPS를 사용하는 헬기에 장착된 배열 안테나에 대한 로터 영향을 고려하여 로터 영향 하에서의 DOA 추정 알고리즘의 성능 변화 및 개선 방법에 대한 연구를 진행하였다. 앞서 언급한 DOA 추정 알고리즘들 중 MUSIC(Multiple Signal Classification)의 경우 DOA 추정 해상도 및 성능이 가장 좋고, ESPRIT(Estimation Signal Parameter via a Rotational Invariant Technique)의 경우 다른 고유치 구조 알고리즘들에 비해 성능이 다소 떨어지나 계산 효율성이 높고 강건하다는 장점 때문에 두 알고리즘이 가장 많이 연구되고 있으므로 두 알고리즘을 대상으로 제시한 방법을 적용하여 로터 채널 환경 하에서의 추정 성능을 분석하였다.

2장에서 본 논문의 대상 배열 안테나에 대한 수신 신호와 로터 회전 영향을 모델링 하는 과정에 대하여 서술하였으며, 3장에서는 MUSIC 및 ESPRIT 알고리즘에 대하여 간략히 기술하였다. 4장에서는 로터 영향을 반영하였을 때 DOA 추정 알고리즘의 성능을 개선시키기 위한 평균화 방식을 설명한 후 5장에서 로터 영향 및 평균화 방식들을 적용한 DOA 추정 알고리즘들의 성능을 모의실험을 통해 분석하고 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다. 연구를 통해 로터 영향에 의해 기존 DOA 추정 알고리즘의 성능이 상당히 저하되며, 추정값의 평균화

및 이동 평균을 통해 추정 성능의 개선이 가능함을 확인하였다.

II. 배열 안테나 수신 신호 및 로터 회전 영향 모델링

2.1. 배열 안테나 수신 신호 모델링

본 논문에서는 실제 헬기에 장착되는 배열 안테나 형태를 참고하여 수신 신호를 모델링 하였다. 모델링 대상 배열 안테나의 배열 형태는 그림 1과 같이 중앙 안테나를 포함한 5개의 안테나가 2차원으로 배열되어 있으며 인접 안테나에 주는 영향을 최소화하기 위하여 외부 사각형의 한 변을 이루는 두 개의 안테나 사이의 거리가 $\lambda/2$ 되도록 배치되어 있다.

중앙 안테나 (3)을 기준으로 하여 각 안테나에 수신되는 신호의 모델링은 그림 2를 참고하여 수식 (1)~(3)과 같이 구할 수 있다.

$$S_i(t) = S_c(t)e^{j\beta_i} \quad (1)$$

$$\beta_i = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta (x_i \cos\phi + y_i \sin\phi) \quad (2)$$

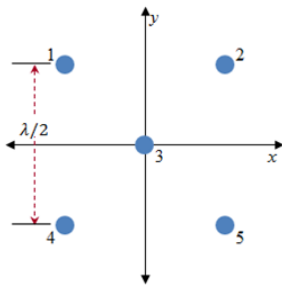


그림 1. 헬기 장착 배열 안테나 배치 형태
Fig. 1. Arrangement of array antenna on the rotorcraft

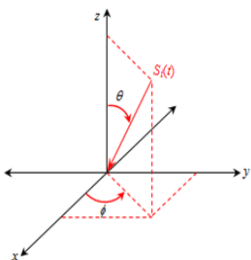


그림 2. 배열 안테나의 I번째 안테나의 신호 모델링
Fig. 2. Modeled signal for i-th element of the array antenna

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T = \begin{bmatrix} -\lambda/2 & \lambda/2 & 0 & -\lambda/2 & \lambda/2 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5]^T = \begin{bmatrix} \lambda/2 & \lambda/2 & 0 & -\lambda/2 & -\lambda/2 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

여기서 $S_c(t)$ 는 중앙 안테나에 입사된 수신신호이며 $S_i(t)$ 는 번째 안테나에 수신되는 신호이다. β_i 는 중앙 안테나를 기준으로 i 번째 안테나에 입사되는 수신 신호의 위상 변화를 나타내며 λ 는 GPS 신호의 파장이다. x_i 와 y_i 는 i 번째 안테나의 위치를 의미하며 각 안테나 번호에 따른 위치는 식 (3)과 같다. ϕ 는 방위각, θ 는 고도각을 의미한다.

2.2. 로터 회전 영향 모델링

정지해 있는 헬기와 달리, 이동하는 헬기의 경우 로터 회전에 의한 신호의 반사 등으로 기존의 헬기 동체와 다른 무선 채널이 형성된다. 이 채널은 헬기 날개의 모양과 개수, 회전 속도에 영향을 받게 된다^[8]. 논문 [8]에서는 로터 회전의 영향을 살펴보기 위해 그림 3과 같이 일정한 크기의 날개 4개를 90도 간격으로 배치하여 일정한 속도로 회전시킨 후 단일 안테나에 수신되는 신호 형태의 변화를 측정 하였으며 그림 4와 같은 실험 결과를 얻었다.

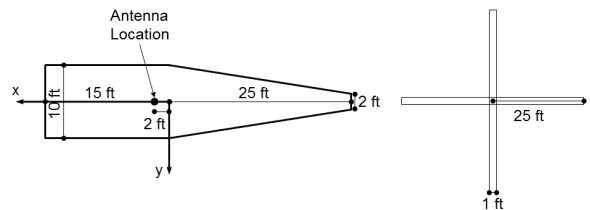


그림 3. 모의실험 플랫폼^[8]
Fig. 3. Simulated platform

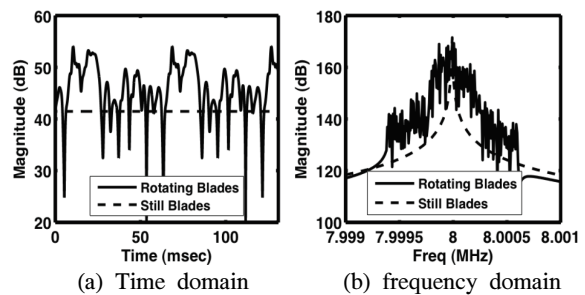


그림 4. CW 신호가 입사될 때의 안테나에서의 수신 신호 형태^[8]
Fig. 4. Signal received by the antenna when the incident signal is a CW signal

그림 4에 따르면, 날개가 멈춰 있을 때와 비교하여 신호의 진폭이 달라짐을 확인할 수 있다. 시간 영역에서는 날개 회전에 따라 약 60ms의 주기로 수신 신호의 진폭이 변화하며 주파수 영역에서는 약 500Hz 범위 내에서 진폭이 변화함을 알 수 있다. 이러한 수신 신호의 진폭 변화는 시변 평면 페이딩(time-variant flat fading)과 유사하며, 따라서 이러한 페이딩 특성을 반영할 수 있는 Jakes 모델을 응용하여 로터의 회전 영향을 모델링하였다.

Jakes 모델은 도플러 효과의 영향으로 인한 레일리(Rayleigh) 페이딩을 모델링하기 위한 모델이며 여러 개의 정현파를 합성하여 페이딩 채널을 생성하게 된다. 수식 (4)는 Jakes 모델의 페이딩 채널 형성을 위한 모델링 식이다.

$$h(t) = \frac{E_0}{\sqrt{2N_0+1}} \{h_I(t) + jh_Q(t)\} \quad (4)$$

여기서 N_0 는 도플러 천이된 정현파의 수이며 E_0 는 페이딩 채널의 평균 크기이다. 채널 실수부 $h_I(t)$ 와 채널 허수부 $h_Q(t)$ 는 식 (5)와 식 (6)과 같이 모델링한다.

$$h_I(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} (\cos \phi_n \cos w_n t) + \sqrt{2} \cos \phi_{N_0} \cos w_d t \quad (5)$$

$$h_Q(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} (\sin \phi_n \cos w_n t) + \sqrt{2} \sin \phi_{N_0} \cos w_d t \quad (6)$$

여기서 ϕ_n 과 ϕ_{N_0} 은 각각 n 번째 도플러 천이된 정현파의 초기 위상과 최대 도플러 주파수의 초기 위상을 나타낸다. 최대 도플러 주파수 f_m 을 이용하여 만든 각주파수 $w_d = 2\pi f_m$ 에 대하여 도플러 천이된 정현파의 각주파수 w_n 을 $w_n = w_d \cos \theta_n = 2\pi f_m \cos(2\pi n/N)$ 와 같이 구하며 여기서 $N=1, 2, \dots, N_0$ 이다⁹⁾.

그림 4의 주파수 영역에서, 중심 주파수를 기준으로 낮은 주파수 성분을 가지는 정현파는 높은 주파수 성분을 가지는 정현파에 비해 상대적으로 큰 크기를 갖는다. 따라서 기존의 Jakes 모델의 각 주파수 성분에 로터 영향을 반영할 수 있도록 가중치를 적용한다.

$$h_I(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \alpha_n (\cos \phi_n \cos w_n t) + \sqrt{2} \alpha_{N_0} \cos \phi_{N_0} \cos w_d t \quad (7)$$

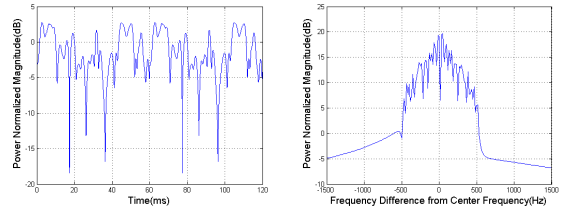


그림 5. 수정된 Jakes 모델을 이용한 레일리 채널 모델링
Fig. 5. Modeled Rayleigh channel using modified Jakes model

$$h_Q(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \alpha_n (\sin \phi_n \cos w_n t) + \sqrt{2} \alpha_{N_0} \sin \phi_{N_0} \cos w_d t \quad (8)$$

가중치 $\alpha_N, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N_0}$ 는 각 천이 주파수가 높아질수록 지수 형태로 감소하도록 설정하며, 모의 실험에서는 최대 도플러 천이 주파수와 최소 천이 주파수에 해당하는 가중치가 약 55배 차이가 나도록 설정하였다. 이렇게 생성한 채널 모델값은 60ms 단위로 반복되게 하여 로터의 회전에 따른 진동 주기를 반영하도록 하였다. 모델링한 결과는 그림 5와 같으며 실험으로 얻은 로터 영향 측정치와 유사한 형태임을 확인할 수 있다.

2.3. 배열 안테나 상관성 적용 모델링

단일 안테나에 대한 모델링 후 배열 안테나의 특성을 적용할 수 있도록 모델링 하였다. 배열 안테나 간 거리는 $\lambda/2$ 로 각 안테나 간에 상관성이 유지되도록 설계되어 있으나 로터의 회전에 의해 안테나 간 신호의 상관성에 변동이 생기며, 안테나 간 거리가 멀수록 상관성 유지가 어려워진다고 가정하였다. 따라서 그림 6과 같이 안테나 간 거리에 따른 상관성 인수를 설정하였다.

각 거리에 해당하는 인수를 사용하여 안테나 배치에 따라 식 (9)와 인수 행렬을 생성한다.

$$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} & F_{15} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & F_{24} & F_{25} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & F_{34} & F_{35} \\ F_{41} & F_{42} & F_{43} & F_{44} & F_{45} \\ F_{51} & F_{52} & F_{53} & F_{54} & F_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_2 & f_1 & f_2 & f_3 \\ f_2 & 1 & f_1 & f_3 & f_2 \\ f_1 & f_1 & 1 & f_1 & f_1 \\ f_2 & f_3 & f_1 & 1 & f_2 \\ f_3 & f_2 & f_1 & f_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

F_{ij} 는 i 번째 안테나와 j 번째 안테나 간 상관성에 따른 인수를 의미한다. 본 논문에서는 로터 회전에 따라 거리에 따른 안테나 간 상관성이 점점 악화된다고 가정하였으며 표 2와 같이 4개의 인수 집합을 이용하여 모델링하였다. 집합 1은 안테나 간 거리에

상관없이 안테나 간 상관성이 동일한 반면 집합 2~4는 거리가 멀어질수록 상관성 지수가 떨어지며, 상관성이 떨어지는 정도에 따른 영향을 파악하기 위하여 집합 2에서 4로 갈수록 안테나 간 거리에 따른 상관성이 더 악화되도록 인수를 설정하였다.

인수 행렬을 적용한 채널은 평균 전력 값이 1이 되도록 식 (10)과 같이 정규화 한다.

$$H_i = \hat{h}_i / \sqrt{E\{\hat{h}_i^2\}} \quad (10)$$

위 모델링 순서는 간략히 그림 7과 같이 설명된다.

즉, Jakes 모델을 이용하여 안테나 수에 맞게 시변 평면 페이딩 채널을 로터 영향의 한 주기만큼 생성한 후 반복하여 로터 영향의 주기성을 적용한다. 이후 각 주파수 성분에 따라 가중치를 적용하여 생성한 초기 채널에 인수 행렬을 적용한 후 평균

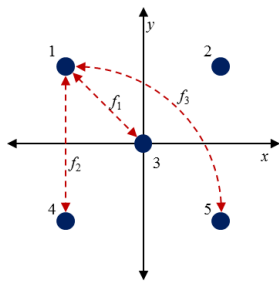


그림 6. 안테나 간 거리에 따른 인수
Fig. 6. Factor based on the distance between the antennas

표 2. 인수 집합
Table 2. Factor sets

	f_1	f_2	f_3
set 1	1	1	1
set 2	0.95	0.9	0.8
set 3	0.9	0.8	0.7
set 4	0.8	0.5	0.3

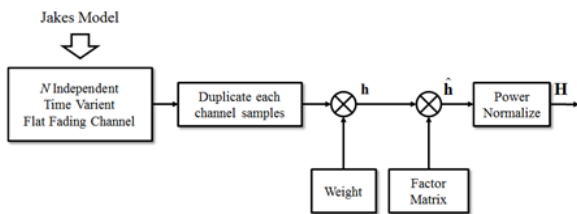


그림 7. 로터 영향 모델링 순서
Fig. 7. Modeling sequence of rotor effect

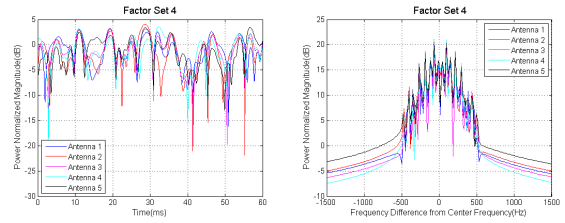


그림 8. 시간 및 주파수 영역에서의 로터 영향 모델링
Fig. 8. Modeling of rotor effect in time and frequency domain

전력 값이 1이 되도록 정규화 하여 최종 로터 영향 채널을 모델링한다. 그림 4에 보인 채널이 그림 7에서의 채널 h 를 의미하며, 5개의 안테나에 Jakes 채널 모델과 주파수별 가중치를 적용하여 독립적으로 생성한 5개의 채널에 식 9의 인수 행렬을 적용하여 생성한 채널 \hat{h} 을 정규화 한 H 를 최종적으로 얻게 된다. Set 1을 적용했을 경우 안테나 5개의 모든 채널 상태가 동일하나, 안테나 간 상관성이 나빠질수록 각 안테나에서의 로터 영향이 달라진다. 안테나 상관성이 가장 안 좋은 인수 집합 4를 적용했을 때 그림 8과 같이 각 안테나에서의 채널 형태가 매우 달라짐을 확인할 수 있으며, 이는 로터 회전 영향이 페이딩 채널 효과와 유사한 영향을 끼치는 동시에 배열 안테나의 상관성을 떨어뜨려 DOA 추정 성능을 악화시키는 요인이 될 것으로 예측할 수 있다.

III. DOA 추정 알고리즘

배열 안테나를 이용한 DOA 추정 방법 중 MUSIC 및 ESPRIT 알고리즘이 주로 사용된다. 두 알고리즘은 매개변수 추정 알고리즘으로서 수신된 다중신호의 상관행렬(correlation matrix)로부터 고유치(eigen value)를 계산하여 입력신호의 도래 방향을 찾아내는 방법이다. 각 알고리즘은 간략히 다음과 같다.

3.1. MUSIC

MUSIC 알고리즘은 수신신호 $Y(t) = AS(t) + W(t)$ 의 상관 행렬을 이용하여 고유치를 계산한 후 신호 부분과 잡음 부분의 고유치로 분류한다. 분류한 고유치의 잡음 부분에 관계된 고유치를 이용하여 잡음 공간 고유 벡터를 생성한 후 이를 이용하여 MUSIC 스펙트럼을 계산한다.

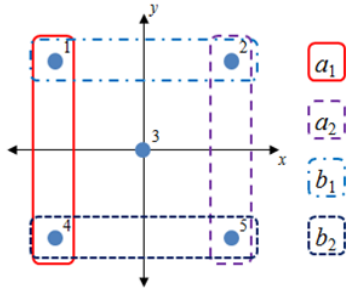


그림 9. ESPRIT을 이용한 DOA 추정을 위한 하위 집합 구성
Fig. 9. Subsets for DOA estimation using ESPRIT

다중 안테나로 입사되는 신호원들 간, 그리고 신호원 $S(t)$ 와 잡음원 $W(t)$ 간에 서로 상관성이 없다고 가정하여 수신된 신호 $Y(t)$ 를 이용하여 상관행렬을 구한다. 이후 고유치 분해를 통해 신호 부분과 잡음 부분으로 분해하며, 잡음 공간의 고유 벡터가 신호 공간에 직교하는 성질을 이용하여 식 (11)과 같이 전력 스펙트럼을 계산한다.

$$P_{MU} = \frac{a(\theta)^H a(\theta)}{a(\theta)^H E_N E_N^H a(\theta)} \quad (11)$$

여기서 E_N 은 잡음 고유치에 관계된 잡음 공간 고유 벡터로 구성된 행렬이며 $a(\theta)$ 는 각 배열 안테나에 입사되는 신호별 지연에 의한 위상차로 구성된 행렬의 열벡터이다. 산출한 스펙트럼의 최대치들은 입사 신호의 DOA를 의미한다^[8].

3.2. ESPRIT

ESPRIT 알고리즘은 배열 안테나의 방향에 따라 하위 집합(subset)들로 구성하고 하위 집합의 자기 상관(auto-correlation)과 상호 상관(cross-correlation) 행렬을 이용하여 DOA를 추정한다^[8]. 그림 1의 배열 안테나를 대상으로 한 하위 집합 구성은 그림 9와 같다.

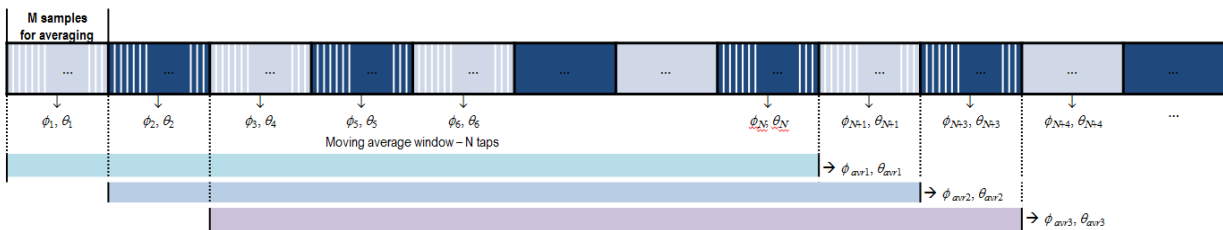


그림 10. 평균화 및 이동 평균 방법을 이용한 DOA 추정
Fig. 10. DOA estimation using averaging and moving average method

표 3. 시뮬레이션 파라미터
Table 3. Simulation parameters

Parameters	Value
Sampling freq. fs	10MHz
Jammer to Noise Ratio (JNR)	0, 2, 4, ..., 20dB
Averaging size	500, 2000, and 10000
Moving window size	20, 50, and 100
Averaging size (with Moving window)	500
Jammer incidence angle	ϕ 45°
	θ 45°
MUSIC angle resolution	1°

a_1 의 자기 상관 행렬 $R_{a_1 a_1}$ 과 a_1 과 a_2 의 상호 상관 행렬 $R_{a_1 a_2}$ 을 이용하여 $\det[R_{a_1 a_1} - \lambda R_{a_1 a_2}]$ 에서 절대값 1에 가장 가까운 해를 구하면 $\lambda = e^{j\pi \sin\theta \cos\phi}$ 으로 구할 수 있고 b_1 의 자기 상관 행렬 $R_{b_1 b_1}$ 과 b_1 과 b_2 의 상호 상관 행렬 $R_{b_1 b_2}$ 을 이용하여 $\det[R_{b_1 b_1} - \lambda R_{b_1 b_2}]$ 에서 절대값 1에 가장 가까운 해를 구하면 $\lambda = e^{-j\pi \sin\theta \sin\phi}$ 을 구할 수 있다. 여기서 $\alpha_1 = \pi \sin\theta \cos\phi$, $\alpha_2 = -\pi \sin\theta \sin\phi$ 이라 하면 방위 각과 고도각을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1}(-\alpha_2/\alpha_1) \quad (12)$$

$$\theta = \sin^{-1}(\alpha_1/\pi \cos\phi) \quad (13)$$

IV. DOA 추정 평균화 방법

무선 채널은 시간에 따라 변화하며 잡음 등의 영향으로 단일 샘플에 대한 DOA 추정에는 오차가 발생하게 된다. 특히 헬기의 경우 로터 회전 영향에 따라 기존 GNSS 수신 채널 환경과 달리 시간에 따른 진폭 및 위상 변화가 일어나게 된다. 따라서 본 논문에서는 DOA 추정 성능 향상을 위하여 두

가지의 방법을 이용하였다. 첫 번째는 일반적으로 사용되는 평균화 방식으로, 배열 안테나로 수신되는 신호를 일정 시간 구간동안 누적하여 평균 DOA를 구하는 시간 평균화 방법이나 배열 안테나의 특정 공간 방향에 대하여 평균값을 구하는 공간 평균화 방법을 이용하여 DOA 추정 오차를 줄인다. 시간 평균화 방법은 식 (14)와 같이 구하며 그림 6과 같은 대상 안테나에서의 공간 평균화는 식 (15)와 같이 계산한다.

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_i(n) y_j^*(n) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} r_{11}(n) &= [y_1(n)y_1^*(n) + y_2(n)y_2^*(n) + y_3(n)y_3^*(n) \\ &\quad + y_4(n)y_4^*(n) + y_5(n)y_5^*(n)]/5 \\ r_{12}(n) &= [y_1(n)y_2^*(n) + y_4(n)y_5^*(n)]/2 \\ r_{14}(n) &= [y_1(n)y_4^*(n) + y_2(n)y_5^*(n)]/2 \\ r_{15}(n) &= y_1(n)y_5^*(n) \\ r_{24}(n) &= y_2(n)y_4^*(n) \end{aligned} \quad (15)$$

위 두 방식을 혼합하여 특정 공간 방향의 배열 안테나 원소 집합을 평균화 한 뒤 이를 일정 시간 구간동안 누적 평균화 하여 DOA를 추정함으로써 추정 오차를 줄일 수 있으며 식 (15)를 식 (14)에 이용하여 식 (16)과 같이 혼합 평균화 방식을 계산한다.

$$r'_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_{ij} \quad (16)$$

공간, 시간적 평균화를 혼합한 3번째 방식이 가장 좋은 추정 성능을 보이므로^[10], 본 논문에서는 혼합 평균화 방법을 사용한 추정 성능 향상을 고려하였다. 두 번째는 첫 번째의 평균화 방식과 이동 평균(moving average) 방법을 혼합한 방식으로, 그림 10과 같다.

수신된 각 샘플마다 DOA 추정 알고리즘을 이용하여 계산한 M개의 추정값 샘플을 첫 번째의 평균화 방식을 이용하여 평균 DOA값 ϕ_i 와 θ_i 를 구한다. 이를 이동 평균 윈도우 사이즈 N만큼 구한 후 평균값을 취하여 최종 추정값 $\phi_{avr,j}$ 와 $\theta_{avr,j}$ 를 구하고 다음 $kM+1 \sim kM+M$ 번째 샘플에 대하여 이 과정을 반복한다. ($k = 0, 1, \dots$)

V. 모 의 실 험

그림 8의 1번 안테나의 시간에 따른 채널 변화

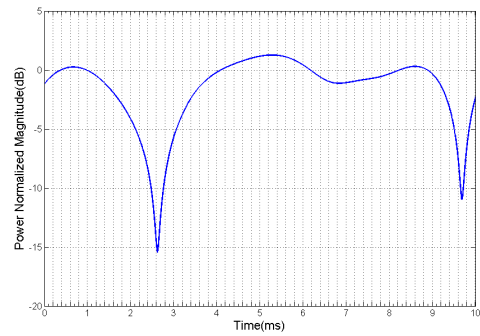


그림 11. 시간 영역에서의 로터 영향 채널의 일부 (안테나 1)
Fig. 11. Part of a rotor effect channel in time domain (Antenna 1)

일부를 확대하면 그림 11과 같다. 헬기가 정지한 상태에서 로터만 회전할 경우 채널 진폭이 급격히 변화하지 않는 시간 범위가 약 0.05ms에서 0.2ms 범위 내이며 채널 진폭이 급격히 변하는 깊은 페이딩(deep fading) 부분을 고려하여 최소 평균화 구간을 0.05ms로 설정하였다. 로터 영향과 별개로 헬기가 이동할 경우, 헬기의 속도가 300km/h라고 가정하면 $4.167\text{mm}/0.05\text{ms} \sim 16.667\text{mm}/0.2\text{ms}$ 로 로터 채널 영향의 평균화를 고려하는 시간 범위 내에서 헬기의 이동 거리는 미미하고, 이에 따라 무선 채널에서 위상 변화의 영향은 매우 작을 것으로 예상할 수 있다. 따라서 로터 영향만을 고려한 평균화 방법을 이용하여 DOA 추정 알고리즘의 성능을 분석하였다. 시뮬레이션을 위한 주요 파라미터들은 표 3과 같다.

본 논문에서 수행한 모의실험은 다음과 같다. 먼저 샘플링 주파수와 최소 평균화 구간 0.05ms를 고려하여 최소 500샘플을 평균화 하는데 사용하였으며 평균화에 사용하는 샘플 수 증가에 따른 영향을 분석하기 위하여 2000, 10000개의 샘플에 대하여 RMSE 성능 분석을 수행하였다. 또한 제한한 이동 평균 방식도 샘플 수 증가에 따른 RMSE 분석을 위하여 최소 평균화 구간 샘플인 500샘플에 대하여 20, 50, 및 100개의 이동 평균 윈도우 크기를 이용하여 최종 10000, 25000, 50000 샘플에 대하여 로터 영향 하에서의 성능 분석을 수행하였다. 또한 로터 영향 유무에 따른 성능 비교를 위해 앞서 설명한 두 방식에 공통되는 샘플 수인 10000 샘플을 누적 평균하여 로터 영향 없이 RMSE 성능을 분석하여 대조하였다. 마지막으로 로터 영향 하에서의 평균화 및 이동평균 방식의 DOA 추정값 변동량을

비교(MUSIC)하여 개별 추정 평균치의 경향성 변동이 각 방식에 따라 어떻게 달라지는지 확인하였다. 각 모의 실험 결과의 θ 와 ϕ 추정치는 같은 경향성을 보이므로 본 논문에서는 두 각의 평균 RMSE 값을 기준으로 보였다.

평균화 샘플 수 증가에 따른 MUSIC 및 ESPRIT 알고리즘의 인수 집합 및 JNR 별 RMSE는 표 4와 같다. 동일 샘플 수에 대하여 MUSIC 이 ESPRIT 알고리즘보다 다소 성능이 우수하며, 로터의 영향을 받을 경우 두 알고리즘 모두 로터 영향이 없을 때에 비해 성능이 악화된다. 또한 모든 안테나의 상관성이 유지되는 Set 1의 경우 JNR이 증가함에 따라 동일 평균 샘플 수에 대하여 RMSE 성능이 향상되거나 나머지 Set 2~4의 인수 행렬을 적용한 로터 회전 환경에서는 로터 회전 채널 영향에 의해 성능이 포화됨에 따라 JNR이 증가해도 성능이 개선되지 않는다.

표 5는 이동 평균 윈도우 크기 증가에 따른 MUSIC과 ESPRIT 알고리즘의 RMSE 성능 분석 결과이다. 동일한 샘플 수를 사용하는 (10000 샘플) 이동 평균 방식에 비해 성능이 다소 떨어지나 거의 유사하며 MUSIC이 ESPRIT에 비해 성능이 우수하다. 평균화만 사용할 경우와 동일하게 윈도우 크기 증가에 따라, 즉 사용하는 샘플 수의 증가에 따라 성능이 향상되며 Set 1을 제외한 나머지 경우에는 평균화 방식과 동일하게 JNR 증가에 상관없이 성

능이 포화됨을 확인할 수 있다.

표 4와 5를 비교할 때 동일 샘플 수 기준으로 평균화 방식만을 사용하는 것이 다소 유리하나 사용하는 샘플 수가 증가할수록 구현 복잡도와 연산 시간도 크게 증가한다. 따라서 이동 평균 방식을 혼합하여 사용할 경우 유사한 성능을 내면서도 이동 윈도우 사이즈만 증가시키면 되므로 DOA 추정에 이용할 수 있는 샘플 수의 확장이 용이하여 단순 평균화만 사용하는 경우에 비해 더 좋은 성능을 낼 수 있다.

그림 12는 두 평균화 방식의 단일 추정 성능 비교를 위해 MUSIC 알고리즘을 이용하여 로터 채널의 임의 시간에서 10000 샘플 평균화를 수행했을 때와 500 샘플 평균화 결과의 20개 이동 평균을 통해 얻은 추정 방위각의 변동량을 그래프로 나타낸 것이다. JNR 10dB로 설정하였으며, 모의실험 결과에 따르면 평균화만 이용한 추정값에 비해 평균화와 이동 평균을 함께 이용한 추정값의 변동이 적음을 알 수 있다. 즉, 이동 평균을 함께 이용하였을 경우 필요한 메모리의 양을 줄임과 동시에 로터 영향에 조금 더 안정적인 추정 성능을 보임을 알 수 있다. 이는 ESPRIT 알고리즘을 이용했을 때도 동일한 경향을 보인다.

모의실험 결과를 간략히 정리하면 표 6과 같으며 MUSIC과 ESPRIT 모두 동일한 경향성을 가진다.

즉, 로터 영향에 의해 DOA 추정 성능이 저하되

표 4. 평균화 샘플 수에 따른 DOA 추정 성능
Table 4. DOA estimation performance according to averaging sample number

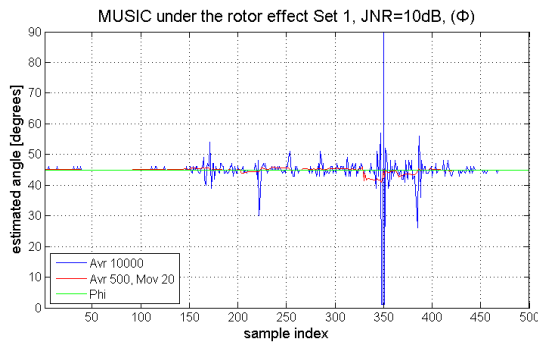
algorithm		MUSIC RMSE (degrees)					ESPRIT RMSE (degrees)				
JNR	avr. samples	no rotor	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	no rotor	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
0	500	-	3.474	4.737	5.896	12.972	-	3.474	4.737	5.896	12.972
	2000	-	1.441	3.125	4.494	12.419	-	1.441	3.125	4.494	12.419
	10000	0.0257	0.280	1.782	2.853	9.589	0.256	0.280	1.782	2.853	9.589
4	500	-	1.793	3.502	4.867	12.487	-	1.793	3.502	4.867	12.487
	2000	-	0.634	2.680	4.151	12.293	-	0.634	2.680	4.151	12.293
	10000	7.0×10^{-5}	0.082	1.707	2.802	9.571	0.152	0.082	1.707	2.802	9.571
8	500	-	0.903	2.988	4.477	12.342	-	0.903	2.988	4.477	12.342
	2000	-	0.264	2.528	4.044	12.253	-	0.264	2.528	4.044	12.253
	10000	≈ 0	0.020	0.685	2.786	9.566	0.093	0.020	1.685	2.786	9.566
12	500	-	0.435	2.785	4.338	12.298	-	0.435	2.785	4.338	12.298
	2000	-	0.101	2.477	4.012	12.241	-	0.101	2.477	4.012	12.241
	10000	≈ 0	0.004	1.678	2.783	9.565	0.058	0.004	1.678	2.783	9.565
16	500	-	0.198	2.711	4.294	12.286	-	0.198	2.711	4.294	12.286
	2000	-	0.034	2.461	4.004	12.238	-	0.034	2.461	4.004	12.238
	10000	≈ 0	6.47×10^{-4}	1.676	2.782	9.564	0.036	6.47×10^{-4}	1.676	2.782	9.564
20	500	-	0.084	2.685	4.277	12.283	-	0.084	2.685	4.277	12.283
	2000	-	0.010	2.457	4.001	12.237	-	0.010	2.457	4.001	12.237
	10000	≈ 0	1.17×10^{-4}	1.675	2.783	9.564	0.023	1.17×10^{-4}	1.675	2.783	9.564

표 5. 평균화 및 이동 평균의 추정 성능 비교
Table 5. Estimation performance of averaging vs. moving average with ESPRIT algorithm

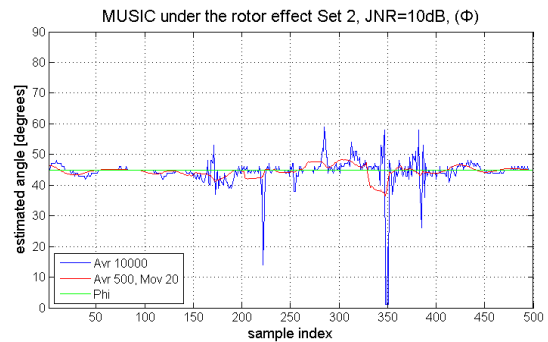
algorithm			MUSIC RMSE (degrees)				ESPRIT RMSE (degrees)			
JNR	window size	total sample	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
0	20	10000	1.056	2.544	3.685	10.173	5.492	6.685	7.738	17.162
	50	25000	0.777	1.778	2.587	7.122	4.653	5.383	6.113	13.498
	100	50000	0.696	1.407	2.014	5.556	4.643	5.043	5.568	11.923
4	20	10000	0.561	2.311	3.535	10.175	2.304	3.933	5.332	15.853
	50	25000	0.412	1.611	2.479	7.127	1.890	2.965	3.975	12.379
	100	50000	0.373	1.247	1.904	5.557	1.947	2.626	3.401	10.747
8	20	10000	0.298	2.225	3.489	10.182	1.001	2.922	4.467	15.530
	50	25000	0.222	1.550	2.447	7.131	0.800	2.137	3.309	12.165
	100	50000	0.200	1.186	1.873	5.555	0.824	1.73	2.699	10.492
12	20	10000	0.151	2.195	3.475	10.186	0.442	2.582	4.199	15.504
	50	25000	0.116	1.529	2.441	7.134	0.347	1.880	3.116	12.135
	100	50000	0.105	1.168	1.864	5.556	0.356	1.487	2.493	10.453
16	20	10000	0.073	2.185	3.471	10.191	0.195	2.473	4.134	15.508
	50	25000	0.057	1.525	2.440	7.135	0.151	1.795	3.068	12.138
	100	50000	0.053	1.161	1.861	5.555	0.146	1.395	2.434	10.443
20	20	10000	0.035	2.182	3.472	10.191	0.085	2.437	4.126	15.518
	50	25000	0.026	1.524	2.440	7.134	0.062	1.771	3.057	12.137
	100	50000	0.025	1.159	1.861	5.553	0.057	1.372	2.422	10.438

며, 평균화 및 평균화와 이동 평균을 이용한 두 방식 모두 로터 영향을 가정한 인수 행렬에 따라서 안테나가 모두 독립적으로 작동하는 Set 1의 경우 JNR 증가에 따라 성능이 좋아지나 Set 2~4의 경우 JNR의 증가에 관계없이 추정 성능이 거의 일정하

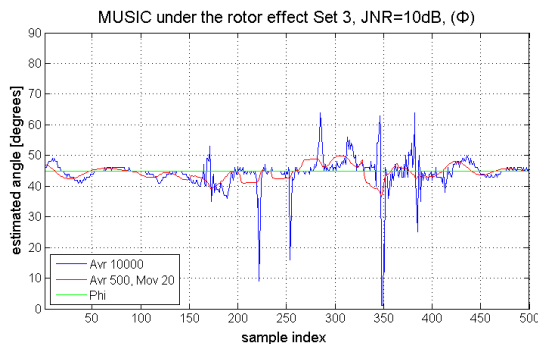
게 유지된다. 이는 로터 영향에 의해 안테나 간 거리에 따라 영향을 받게 되면서 안테나 간 상관성이 훼손되고 추정 성능이 포화되며, Set 2에서 Set 4로 로터 영향이 심해질수록 추정 성능이 악화되는 것을 의미한다. 또한 최종 추정값 도출에 이용한 샘플



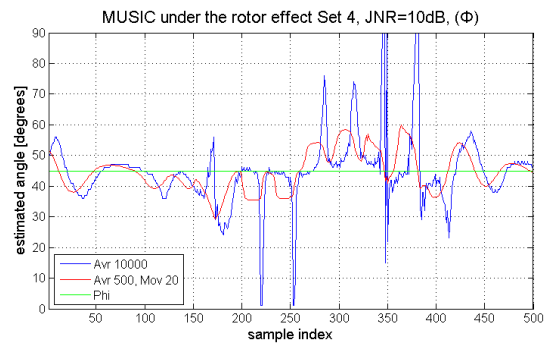
(a) JNR 10dB, Set 1



(b) JNR 10dB, Set 2



(c) JNR 10dB, Set 3



(d) JNR 10dB, Set 4

그림 12. 로터 영향 하에서의 MUSIC 알고리즘의 DOA 추정값 변동
Fig. 12. Variation of estimated DOA value of MUSIC algorithm under the rotor effect

플 수를 늘릴수록 추정 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

단, 동일 샘플 수를 이용하여 평균화만 사용한 경우와 평균화와 이동 평균을 사용한 경우, 평균화만 사용한 경우 추정 성능이 다소 좋았으나 거의 유사하였으며, Set 1의 경우 평균화 방식이 더 좋은 성능을 보이나, 실제로 재머 전력이 커서 높은 JNR 값을 갖는 경우가 대부분인 것을 고려하면, 높은 JNR에서 두 방식의 성능이 유사하므로 추정 방식의 변화에 따른 큰 성능 저하는 없다고 볼 수 있다. 또한 임의 시간에서 시간에 따른 추정값 변화를 보았을 때 평균화만 이용한 경우보다 평균화 및 이동 평균을 함께 이용한 경우 추정값의 변동이 상대적으로 적어 평균화와 이동 평균을 이용한 방식의 추정 안정성이 더 좋음을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 헬기의 로터 회전에 의해 기존의 무선 채널과 다른 형태의 채널이 발생함을 확인하고 이에 따른 영향을 분석하였다. 헬기에 장착된 중앙 안테나 포함 5개의 2차원 배열 안테나를 대상으로 한 수신 신호 형태를 모델링한 후 로터 회전에 의한 채널 형태의 변화를 측정 연구 결과를 토대로 모델링하였으며, DOA 추정 알고리즘으로 주로 사용되는 MUSIC과 ESPRIT을 대상으로 평균화 및

이동 평균 방식을 이용하여 로터 회전 영향이 DOA 추정 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 두 방식 모두 로터 영향에 의해 안테나 간 상관성이 훼손됨에 따라 추정 성능이 포화되어 JNR이 증가해도 추정 성능의 개선이 어려우나 평균화에 이용하는 추정 샘플 수를 증가시켜 추정 성능의 개선이 가능함을 알 수 있었다. 또한 평균화 및 이동 평균 방식을 함께 이용하여 DOA를 추정할 경우 같은 샘플 수를 이용할 때 거의 유사한 추정 성능을 낼 수 있었다. 그러나 평균화에 이용하는 추정 샘플수를 증가시킬수록 최종 추정 결과를 도출하는데 걸리는 시간이 길어지며 필요한 메모리의 수도 함께 증가하게 된다.

반면 평균화와 이동 평균 방식을 함께 사용할 경우 동일한 샘플 수를 사용하여 유사한 성능을 내면서도 연산에 필요한 메모리의 양을 감소시킬 수 있으며, 첫 번째 이동 평균 결과값을 얻은 후에는 한번의 평균화 수행 시간마다 추정 결과값을 얻을 수 있어 DOA 추정값을 좀 더 자주 갱신할 수 있다는 이점이 있다. 그와 동시에 로터 영향에 의한 추정값 변동을 다소 완화시킬 수 있는 장점이 있음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 다른 로터 영향에 의한 시변 채널 환경 하에서 DOA 추정에 평균화 및 이동 평균 방식을 이용하는 것이 유리하며, 로터 영향 뿐만 아니라 위상 및 진폭이 지속적으로 변하는 무선 채널 환경에서 제시한 방법을 이용하여 향상된 DOA 추정 성능을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

표 6. 로터 영향 하에서의 DOA 추정 성능 경향
Table 6. Tendency for the performance of DOA estimation under the rotor effect

		Performance		Note
		Averaging	Moving average	
Rotor effect		No rotor > Rotor		
Factor set	Set 1	Increased as the JNR value is higher		Antenna correlation is maintained
	Set 2~4	Not changed regardless of the JNR values		Antenna correlation is damaged ⇒ performance saturation by rotor effect
# of accumulated samples		Increased as the number of samples are increasing		
Performance comparison in same sample number		≥		Set 1: similar performance in high JNR Set 2~4: similar performance
Estimation performance stability		<		

References

- [1] Wikipedia, Satellite navigation, Retrieved, Aug., 24, 2012, from http://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation
- [2] I. O. Joo, C. S. Sin, J. H. Kim, J. H. Lee, S. H. Son, and S. U. Lee, "Technical trends of monitoring GPS jamming," *Electr. and Telecommunications Trends*, vol. 26 no. 4, pp. 115-122, Aug. 2011.
- [3] J. Li, "GPS interference mitigation for small UAV applications," M. S. thesis, Dept. Elect. and Electron. Eng., The University of Adelaide, Australia, Mar. 2009.
- [4] D. Jeon, "GPS history - jamming cases," *Dong-A Ilbo*, Jun. 1. 2011.
- [5] R. J. Landry, V. Calmettes, and M.

Bousquet, "Impact of interference on a generic GPS receiver and assessment of mitigation techniques," *Spread Spectrum Techniques and Applications*, vol. 1, pp. 87-91, Sep. 1998.

- [6] R. J. Landry and A. Renard, "Analysis of potential interference sources and assesment of present solutions for GPS/GNSS receivers," in *Proc. Int. Conf. Integrated Navigation Systems*, Saint Petersburg, Russia, May 1997.
- [7] L. C. Godara, *Smart Antennas*, CRC Press, 2004, pp. 325-357
- [8] I. J. Gupta and K. Griffith, "Simulations of antennas mounted on rotorcrafts," in *Proc. Institute of Navigation's 2008 GNSS Meeting*, pp. 2766-2771, Savannah, GA, Sep. 2008.
- [9] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*, Wiley, 2010.
- [10] J. Bermudes, R. C. Chin, P. Davoodian, A. T. Y. Lok, Z. Aliyazicioglu, and H. K. Hwang, "Simulation study on DOA estimation using ESPRIT algorithm," in *Proc. World Congress on Engineering and Computer Science*, pp. 431-436, San Francisco, USA, Oct. 2009.

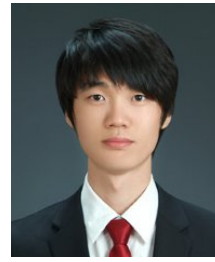
윤 선 희 (Seonhui Yun)



2006년 2월 충남대학교 전자전
파정보통신공학부 졸업
2008년 2월 충남대학교 정보통
신공학과 석사
2008년~2012년 한국전자통신
연구원 연구원
2009년 3월~현재 충남대학교

전자 전파정보통신공학과 박사과정
<관심분야> 차세대 이동통신, 항재밍, 위성항법 시
스템, MIMO, OFDM

오 종 찬 (Jongchan Oh)



2012년 2월 충남대학교 전기정
보통신공학부 졸업
2012년 3월~현재 충남대학교
전자전파정보통신공학과 석
사과정
<관심분야> 스마트 안테나,
MIMO, OFDM

김 준 오 (Jun O Kim)



2000년 2월 부경대학교 전자공
학과 졸업
2002년 2월 부경대학교 대학원
전자공학과 석사
2002년 8월~현재 국방과학연
구소 선임연구원
<관심분야> 디지털 통신, 위성

항법 시스템

최 상 욱 (Sangwook Choi)



1988년 2월 아주대학교 전자공
학과 졸업
1990년 2월 아주대학교 대학원
전자공학과 석사
2011년 3월~현재 충남대학교
대학원 박사과정
1990년 3월~현재 방과학연구

소 책임연구원
<관심분야> 항법시스템

안 재 민 (Jae Min Ahn)



1987년 2월서울대학교 전자공
학과 졸업
1989년 2월 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 석사
1994년 8월 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 박사
1994년~1999년 삼성전자 선임

연구원
2007년~2008년 정보통신연구진흥원 차세대이동통
신사업단장, 정보통신부 차세대 이동통신 PM
1999년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부 교수
<관심분야> 차세대 이동통신 물리계층 및 Radio
Resource management