



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

복소 독립 성분 분석 기법을 이용한
헬리콥터 특징 추출 연구



2016년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

전 자 공 학 과

강 기 봉

공 학 석 사 학 위 논 문

복소 독립 성분 분석 기법을 이용한 헬리콥터 특징 추출 연구

지도교수 박 상 홍

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2016년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

전 자 공 학 과

강 기 봉

강기봉의 공학석사 학위논문을 인준함.

2017년 2월 24일



위원장 이학박사 이 원 창 (인)

위 원 이학박사 임 창 현 (인)

위 원 이학박사 박 상 홍 (인)

목 차

Abstract	iv
제 I 장 서 론	1
제 II 장 본 론	4
1. 블레이드 신호 모델링	4
2. 바이스태틱 마이크로 도플러 분석 기법	6
3. Complex Independent Component Analysis	11
1) Complex ICA 기본 원리	11
2). Complex ICA 적용 타당성 검증	15
4. 블레이드의 변수 추정 기법	19
5. 알고리즘 요약	21
6. Complex ICA 기법을 적용한 헬리콥터 변수 추정 결과	24
제 III 장 결 론	34
참고문헌	35
부록	36
감사의 글	38

그림 목차

[그림 2.1] 산란점의 기하학 모델링	4
[그림 2.2] 바이스테틱을 고려한 산란점 기하학 모델링	9
[그림 2.3] 블레이드와 플래시의 상관관계	16
[그림 2.4] 블레이드의 시간-주파수 영상	17
[그림 2.5] 3번, 4번 블레이드로부터 수신된 신호의 실수 값	17
[그림 2.6] 블레이드의 시간-주파수 영상	18
[그림 2.7] 1번, 2번 블레이드로부터 수신된 신호의 실수 값	19
[그림 2.8] 단일 블레이드로부터 획득한 영상	20
[그림 2.9] Complex ICA를 이용한 블레이드 특성 추정을 위한 알고리즘	23
[그림 2.10] 블레이드 개수변화에 따른 시간-주파수 영상	25
[그림 2.11] 첫 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 2개	26
[그림 2.12] 첫 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 3개	26
[그림 2.13] 첫 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 4개	27
[그림 2.14] 첫 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 5개	27
[그림 2.15] 첫 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 6개	28
[그림 2.16] 두 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 2개	29
[그림 2.17] 두 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 4개	29
[그림 2.18] 두 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 6개	30
[그림 2.19] 단일 블레이드로부터 획득한 영상	31
[그림 2.20] 값에 따른 비용함수	32

표 차 례

[표 2.1] Complex ICA를 수행하기 위한 fast fixed-point 알고리즘	14
[표 2.2] 시뮬레이션 조건	24
[표 2.3] 헬리콥터 성분 분석 결과	32



A Study on Helicopter Features Extraction Based on Complex Independent Component Analysis

Ki Bong Kang

*Department of Electronic Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

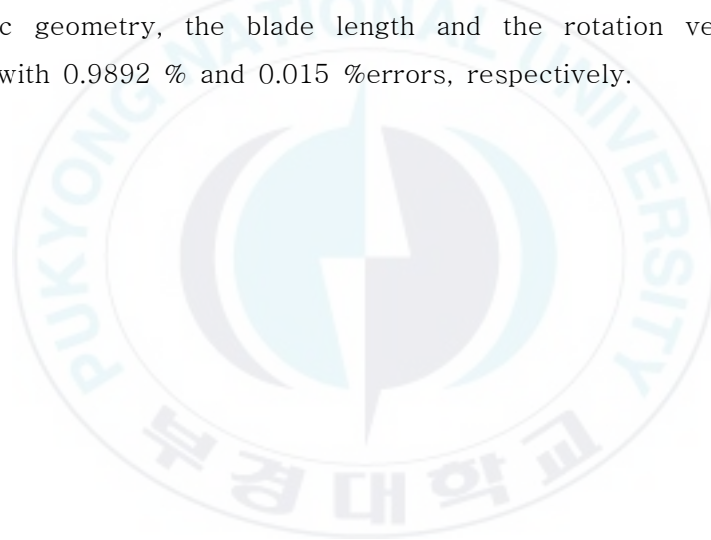
Abstract

because Various helicopters that are used by belligerent nations are major threats to the ground operation. It is very important to avoid the damage in advance and recognize the exact model of the helicopter by using all-weather devices such as the radar. Because unique blade length, the number of blades and rotation velocity are decided according to the purpose of aggression, weight of helicopter, etc., major parameters related to helicopter blades may become very important components to recognize helicopters. Micro-Doppler analysis is usually used to extract features of blades. Micro-Doppler means Doppler frequency by own motion of targets except translation motion. Features of blade length, rotation velocity and other parameters can be estimated by applying feature estimation technique based on bistatic radar to Doppler feature analysis.

Because Micro-Doppler by blades is acquired in the form of flashes, the period cannot be accurately estimated when the exact number of blades is not known a priori. In addition, the initial position of blades should be known to perform the feature estimation based on the bistatic geometry. In this paper, we propose an efficient technique suitable for micro-Doppler signal based on real scattering mechanisms and feature estimation based on the bistatic geometry. In the proposed method, signals of blades are

separated by complex independent component analysis (ICA) and then matching between the time-frequency image of a blade and the 2-D window image is applied to analyze Micro-Doppler features. Finally, micro-Doppler estimation technique based on the bistatic geometry is applied.

Applying a unified algorithm to targets with various blade numbers, the proposed method separates blade signals completely and estimates the number of blades. Using the separated blade signals, Doppler frequency was estimated successfully with 1.342 % error by using the window matching method. In addition, using the feature estimation method based on the bistatic geometry, the blade length and the rotation velocity were estimated with 0.9892 % and 0.015 % errors, respectively.



제 I 장 서 론

현대전에서 항공 표적을 식별하는 문제는 매우 중요한 요소이다. 이러한 표적들 중 회전익인 헬리콥터는 제자리 비행(Hovering), 수직 이착륙 등이 가능하기 때문에 공중강습을 위한 수송기, 적진 침략을 위한 무장헬기 등 다양한 목적에 의해 개발되고 있다. 현대전에서 교전 상대국이 헬리콥터를 이용한 침입을 할 경우 지상 작전에 큰 위협이 될 수 있기 때문에 헬리콥터의 정확한 모델을 파악하고 적의 침입 목적을 사전에 파악하여 발생할 수 있는 위협을 미연에 방지하는 것이 매우 중요하다. 헬리콥터는 침투목적, 헬리콥터의 중량 등에 따라 고유한 블레이드의 길이, 블레이드 개수, 회전속도 등이 결정된다. 따라서 레이더와 같은 전천후 장비를 이용하여 헬리콥터의 고유 특징 추출을 통한 다양한 식별기법들이 활발하게 연구되고 있다 [1][2].

레이더에서 신호를 생성하였을 때 표적의 속도에 의해 송신신호의 주파수가 바뀌게 된다. 이러한 현상을 도플러 효과라고 하고 이때 변화된 주파수 값을 도플러 주파수라 한다. 그 중 표적의 강체(Rigid Body)가 병진운동하면서 생성되는 도플러 주파수가 있고 병진운동을 제외한 표적 내부의 움직임에 의해 발생하는 도플러 주파수가 있다. 즉 헬리콥터의 경우 블레이드가 회전하면서 생기는 시간에 따른 도플러 주파수를 마이크로 도플러(Micro-Doppler)라 한다. 마이크로 도플러를 이용한 헬리콥터 블레이드의 고유 특성 분석은 매우 유용하므로 다양한 마크로 도플러를 이용한 변수추정 기법이 연구되고 있다 [3][4].

하지만 레이더가 바라보는 방향벡터(LOS: Line of Sight)와 수평인

속도벡터에 의해서만 마이크로 도플러가 생성되기 때문에 모노스테틱 레이더를 이용해 블레이드의 실제 길이를 추정하는 데는 어려움이 있다. 바이스테틱 마이크로 도플러 분석 기법을 기반으로 한 특징 추출 기법[3]을 이용하면 실제 블레이드의 길이 및 레이더와 블레이드의 회전평면 사이의 각도를 정확하게 추정할 수 있다. 그러나 바이스테틱 특징 추출 기법을 이용하기 위해서 블레이드의 정확한 초기위상 값이 추정되어야 하고 모노스테틱과 바이스테틱 레이더로부터 수신된 블레이드 데이터 중 동일한 날개로부터 추정된 특징 정보가 필요하다. 마이크로 도플러를 이용한 특징 추출 기법 중 [3]에서 이용되는 Hough변환은 점 산란원을 기반으로 획득된 데이터에만 유효하고 블레이드가 2개 이상인 경우 원하는 블레이드로부터의 초기위상 값을 추정하는데 어려움이 있다. 뿐만 아니라 Hough변환은 블레이드가 가질 수 있는 삼차 변수들의 모든 값들을 시행착오방식을 이용해 추정하므로 오랜 시간이 필요하다. 블레이드 특징 추출을 위해 [4]에서 이용된 Radon변환은 실제 측정 데이터를 기반으로 분석하였지만 레이더 산란 메커니즘에 적합하지 않고 초기위상을 찾는 데 어려움이 있다.

본 논문에서는 바이스테틱 기반 특징 추출기법 적용에 적합하고 실제 헬리콥터 산란 메커니즘으로부터 획득된 마이크로 도플러 특성 분석에 용이한 복소(Complex) 독립 성분 분석(ICA: Independent Component Analysis)기법[5][6]을 제안한다. ICA는 중첩된 독립신호들을 분리하는 기법으로 각각의 블레이드로부터 수신된 데이터를 분리하는데 이용될 수 있다. 분리된 단일 블레이드 신호는 동일한 블레이드로부터 수신된 모노스테틱과 바이스테틱 데이터를 선정하는데 이용될 수 있고 뿐만 아니라 초기위상 추정 문제를 해결할 수 있다. 또한 블레이드로부터 수신

되는 마이크로 도플러 영상은 플래시 형태를 띠는데 블레이드 신호를 분리함으로서 이러한 플래시 정보만을 이용한 블레이드 특징 분석을 가능하게 한다.

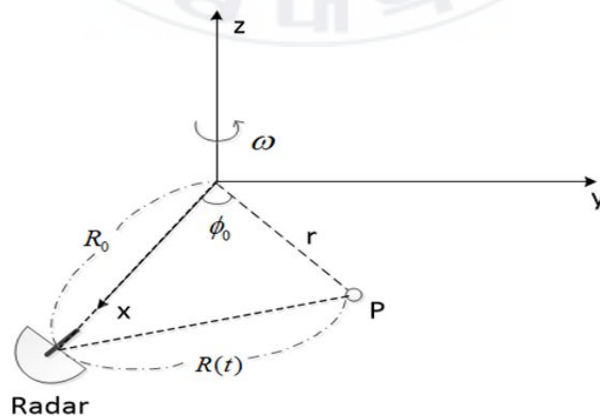
본 논문에서는 Complex ICA기법을 이용한 블레이드 신호분리 및 마이크로 도플러 특징 분석 연구를 수행하였다. 먼저 제2장 1절에서는 블레이드의 신호 모델링과 도플러 주파수 이론들을 서술하고 제2장 2절에서는 바이스태틱 기법을 이용한 블레이드 추정 기법을 서술한다. 제2장 3절에서는 Complex ICA의 기본 원리와 블레이드 신호에 대한 Complex ICA적용 타당성을 검증한다. 제2장 4절에서는 제안된 알고리즘을 설명하면서 2장을 마친다. 제3장에서는 앞서 서술한 기법들의 실험결과를 통한 효율성을 검증한다. 마지막으로 제4장에서는 제안된 기법들에 대한 결론을 간략히 기술한다.

제Ⅱ장 본 론

본론에서는 회전하는 블레이드의 신호모델링 및 수신된 신호로부터 획득되는 도플러 주파수 성분에 대해 설명하고 바이스태틱 기법을 이용한 블레이드 추정 기법에 대해 설명한다. 그리고 블레이드 신호들을 분리하기 위한 Complex ICA기법에 대해 설명하고 헬리콥터의 블레이드 특징 추출을 위한 알고리즘을 제안한다.

1. 블레이드 신호 모델링

z 축을 중심으로 xy 평면에서 시간에 따라 각속도 ω 로 회전하는 점산란원과 레이더 사이의 관계는 [그림 2.1]과 같다.



[그림 2.1] 산란점의 기하학 모델링

레이더가 x 축 위에 있을 때 원점 O 와 레이더의 거리는 R_0 이다. r 은 원점 O 와 점 P 사이의 거리이고 ϕ_0 는 점 P 의 초기위상 값이다. 점 P 와 레이더 사이의 거리는 $R(t)$ 가 되게 되는데 시간에 따라 변하는 $R(t)$ 는 코사인 법칙을 적용하면 식 (2.1)과 같다.

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + r^2 - 2R_0r \cos(\omega t + \phi_0)} \quad (2.1)$$

표적이 충분히 멀리 있다고 가정하면 $R_0 \gg r$ 을 만족함으로 식 (2.1)을 식 (2.2)와 같이 근사화할 수 있다.

$$R(t) \approx R_0 - r \cos(\omega t + \phi_0) \quad (2.2)$$

위 식에서 보는바와 같이 점산란원의 거리는 주기적인 값을 가지게 된다.

회절 기하학 이론(GTD: Geometrical Theory of Diffraction)[7]을 바탕으로 블레이드는 점산란원들의 결합으로 형성된다고 가정할 수 있다. 따라서 파장이 λ 인 레이더가 연속신호(CW: Continuous Wave)를 송신할 때 총 K 개의 산란원을 가지는 블레이드의 수신 데이터는 식 (2.3)과 같다.

$$S(t) = \sum_{k=1}^K a_k(t) \exp(-j4\pi \frac{R_k(t)}{\lambda}) \quad (2.3)$$

$a_k(t)$ 는 k 번째 산란원의 크기이다. 식 (2.3)의 위상편차를 이용하면 회

전하는 k 번째 산란원의 마이크로 도플러 주파수를 식 (2.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_k(t) = -\frac{2\omega r_k}{\lambda} \sin(\omega t + \phi_{k0}) \quad (2.4)$$

2. 바이스태틱 마이크로 도플러 분석 기법

산란점이 일정한 각속도를 가지고 회전하는 경우 모노스태틱 레이더와 바이스태틱 레이더에 의해 수신된 마이크로 도플러 특성의 상관관계를 이용하여 회전축으로부터의 산란점 수직거리를 추정하는 기법을 바이스태틱 마이크로 도플러 분석 기법[3]이라 한다. 아래 [그림 2.2]에서, L 은 T 레이더와 R 레이더 사이의 거리이고 T레이더와 원점 사이의 거리는 $R_{0/T}$, R 레이더와 원점 사이의 거리는 $R_{0/R}$ 이다. Z축은 산란점 P 의 회전축이 되고, $X-Y$ 평면을 각속도 ω 로 회전한다. 이때 점 P 와 원점 사이의 거리는 l 이다. 점 P 와 X 축 사이의 초기 위상은 ϕ_T 가 되고 OR' 과 점 P 사이의 초기 위상은 ϕ_R 이 된다. α_T 는 OT 와 Z 축 사이의 각도, α_R 은 OR 과 Z 축 사이의 각도이며 $\angle TOR$ 는 β 이다. 시간이 t 일 때, T 레이더와 산란점 P 사이의 거리는 $R_T(t)$ 가 되고 R 레이더와 산란점 P 사이의 거리는 $R_R(t)$ 가 된다. 두 거리의 합은 $R(t) = R_T(t) + R_R(t)$ 와 같다. 코사인 법칙을 적용하여 T 레이더와 산란원 사이의 거리에 대한 관계를 식 (2.5), (2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(TT')^2 + (T'P)^2 = (TP)^2 \quad (2.5)$$

$$(OT')^2 + (OP)^2 - 2PT' \times OP \times \cos \angle T'OR' = (T'P)^2$$

$$R_T(t) = \sqrt{R_{0/T}^2 + l^2 - 2R_{0/T}l \sin \alpha_t \cos(\omega t + \phi_T)} \quad (2.6)$$

표적이 멀리 있는 경우, $R_{0/T} \gg l$ 이게 되므로 식 (2.6)은 다음 (2.7)과 같이 근사화 하여 표현할 수 있다.

$$R_T(t) \approx R_{0/T} - l \sin \alpha_T \cos(\omega t + \phi_T) \quad (2.7)$$

유사한 방식으로 R 레이더와 산란점 P사이의 관계식도 다음 식 (2.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_R(t) \approx R_{0/R} - l \sin \alpha_B \cos(\omega t + \phi_R) \quad (2.8)$$

이 경우 두 거리의 합은 다음 식 (2.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t) \approx R_{0/T} + R_{0/R} - l \sin \alpha_T \cos(\omega t + \phi_T) - l \sin \alpha_B \cos(\omega t + \phi_R) \quad (2.9)$$

$\theta = \phi_T - \phi_R$ 라 하면 다음 식 (2.10)과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$\cos\theta = \frac{\cos\beta - \cos\alpha_T \cos\alpha_R}{\sin\alpha_T \sin\alpha_R} \quad (2.10)$$

θ 는 바이스태틱 각도 β 를 회전평면에 투영시킨 결과이다. 식 (2.9)를 근사화 하여 나타내면 다음 식 (2.11)과 같다.

$$R(t) \approx R_0 - A_B l \cos(\omega t + \phi_B) \quad (2.11)$$

이때, A_B 와 R_0 는 다음과 같다.

$$A_B = \sqrt{4\cos^2(\beta/2) - (\cos\alpha_R + \cos\alpha_T)^2} \quad (2.12)$$

$$R_0 = R_{0/T} + R_{0/R}$$

바이스태틱 기하학 구조를 고려한 위상은 다음 식 (2.13)과 같다.

$$\phi_B = \phi_T - \arctan\left(\frac{\sin\alpha_R \sin\theta}{\sin\alpha_T + \sin\alpha_R \cos\theta}\right) \quad (2.13)$$

식 (2.11)에 따르면 순시 거리는 시간에 따른 주기 함수가 되고 크기는 바이스태틱 기하학 변화에 의해 달라지게 된다.

산란점 P 가 ω 의 각속도로 $X-Y$ 평면을 회전할 때 T 레이더에서 신호를 송신하고 T 레이더와 R 레이더 동시에 산란점으로부터 반사된 신호를 수신할 경우 획득된 신호는 각각 아래 식 (2.14), (2.15)와 같다.



$$S_B(t) = \exp\left(-j2\pi \frac{2R(t)}{\lambda}\right) \quad (2.15)$$

$$S_R(t) = \exp\left(-j2\pi \frac{2R_R(t)}{\lambda}\right) \quad (2.16)$$

– 9 –

$$f_T(t) = l_T \sin(\omega t + \phi_T) \quad (2.17)$$

$$f_R(t) = l_R \sin(\omega t + \phi_R) \quad (2.18)$$

$$f_B(t) = l_B \sin(\omega t + \phi_B) \quad (2.19)$$

이 때 $l_T = -\frac{\omega}{\lambda} 2l \sin \alpha_t$, $l_T = -\frac{\omega}{\lambda} 2l \sin \alpha_t$, $l_B = -\frac{\omega l A_B}{\lambda}$ 가 되고 A_B 는

$\sqrt{4 \cos^2(\beta/2) - (\cos \alpha_R + \cos \alpha_T)^2}$ 가 된다.

T 레이더와 R 레이더에 의해 수신된 신호 (2.14)와 (2.15)를 이용하여 $(\hat{l}_T, \hat{\omega}_T, \hat{\phi}_T)$ 와 $(\hat{l}_B, \hat{\omega}_B, \hat{\phi}_B)$ 를 추정한 다음 (2.16)과 식(2.14), (2.15)사이의 관계식을 이용하여 아래 식(2.20)과 같이 $(\hat{l}_R, \hat{\phi}_R)$ 를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{l}_R &= \sqrt{\hat{l}_T^2 + 4\hat{l}_T \hat{l}_B \cos(\hat{\phi}_T - \hat{\phi}_B)} \\ \hat{\phi}_R &= a \sin\left(\frac{2\hat{l}_B \sin \hat{\phi}_B - \hat{l}_T \sin \hat{\phi}_T}{\hat{l}_R}\right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

추정된 $(\hat{l}_T, \hat{\omega}_T, \hat{\phi}_T)$, $(\hat{l}_B, \hat{\omega}_B, \hat{\phi}_B)$ 그리고 $(\hat{l}_R, \hat{\phi}_R)$ 를 이용하여 아래 식(2.21)과 같은 결과를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_T &= \arcsin \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \\ \hat{\alpha}_R &= \arcsin\left(\frac{B}{A} \sin \hat{\alpha}_T\right) \\ \hat{l} &= \frac{A}{\sin \hat{\alpha}_T} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\text{이 때 } a = \frac{B^2}{A^2}(1 - C^2), \quad b = \frac{2BC}{A} \cos \beta - 1, \quad c = \sin^2 \beta \text{ 이 고 } A = -\lambda \frac{\hat{l}_T}{2\hat{\omega}},$$

$$B = -\lambda \frac{\hat{l}_R}{2\hat{\omega}}, \quad C = \cos(\hat{\phi}_T - \hat{\phi}_R) \text{ 가 된다.}$$

3. Complex Independent Component Analysis

1) Complex ICA 기본 원리

독립 성분 분석은 통계적으로 독립인 블라인드 소스(Blind Source)를 분리하는데 널리 사용되는 기법이다[5][6]. n 개의 블라인드 소스가 합쳐져서 형성된 n 개의 랜덤변수 $(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ 는 아래의 식 (2.22)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) \quad (2.22)$$

위 식에서 t 는 시간 혹은 샘플링 인자를 나타내고, $\mathbf{s}(t)$ 는 n 개의 블라인드 신호를 의미하며 본 논문의 경우 헬리콥터 블레이드 각각으로부터 수신된 신호의 집합이 된다. $\mathbf{A}$ 는 블라인드 신호들을 일정한 비율로 합성시켜주는 $n \times n$ 정칙행렬이다. 복소 독립 성분 분석의 경우 $\mathbf{x}(t)$ 와 $\mathbf{s}(t)$ 는 모두 복소신호로 구성되며 $\mathbf{A}$ 는 0보다 큰 실수 혹은 복소수의 값을 가진다.

복소신호가 독립이 되기 위해서는 블라인드 신호의 집합 $\mathbf{s}(t)$ 가 모두 화이트(White)해야 한다[6]. 즉 실수와 허수 모두 상관관계가 없고 같은 분산

값을 가져야 한다. 따라서 평균이 0이고 분산이 1인 표준정규화된 신호 $\mathbf{s}$ 는 아래 식 (2.23)를 만족해야 한다.

$$E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^H\}=\mathbf{I} \text{와 } E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^T\}=\mathbf{0} \quad (2.23)$$

$\mathbf{s}^H$ 는 에르미트 행렬을 나타낸다.

또한 Complex ICA는 블라인드 신호들이 최대한 비 가우시안이 되는 형태가 될 때의 값을 추정함으로 랜덤함수가 정규분포를 따를 때 첨도 (Kurtosis)는 1보다 매우 작거나 매우 큰 값을 가져야한다. 쿼터시스는 아래 식 (2.24)와 같다.

$$\begin{aligned} kurt(x) = & E\{|x|^4\} - E\{xx^*\}E\{xx^*\} \\ & - E\{xx\}E\{x^*x^*\} - E\{xx^*\}E\{x^*x\} \end{aligned} \quad (2.24)$$

위 조건이 모두 만족하고 $\mathbf{s}=\mathbf{W}^H\mathbf{x}$ 라 할 때, 블라인드 신호의 집합 $\mathbf{s}$ 가 비 상관관계라는 제약조건을 이용하고 식 $G(x)$ 을 이용한 평가자 $J_G(\mathbf{w}_j)$ 가 최대가 되는 n 개의 벡터 $\mathbf{w}_j$ 를 아래의 식 (2.25)과 같이 구할 수 있다.

$$\text{maximize } \sum_j^n J_G(\mathbf{w}_j) \text{ with respect to } \mathbf{w}_j, \quad (2.25)$$

$$j=1,\dots,n$$

$$\text{under constraint } E\{(\mathbf{w}_k^H\mathbf{x})(\mathbf{w}_k^H\mathbf{x})^*\}=\delta_{jk}$$

위 식에서 $j=k$ 인 경우는 $\delta_{jk}=1$, 나머지 경우는 $\delta_{jk}=0$ 가 된다.

식 $G(x)$ 는 아래의 식 (2.26)을 이용한다.

$$G_1(x) = \sqrt{a_1 + x}, g_1(x) = \frac{1}{2\sqrt{a_1 + x}} \quad (2.26)$$

$$G_2(x) = \frac{1}{2}x^2, g_2(x) = x$$

위 식에서 a_1 은 임의의 상수이고 g_1 과 g_2 는 각각 G_1, G_2 의 미분이며, G_1 은 이상점(Outlier)에 영향을 적게 받는 평가자이고 G_2 는 첨도가 기반이 되는 식이다.

본 논문에서는 Fixed-Point 알고리즘을 이용하여 Complex ICA기법을 적용한다. 알고리즘은 $E\{G(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2)\}$ 의 극값을 찾는 방식을 이용한다. 또한 레이다를 이용해 측정된 값에 화이트닝(Whitening)을 통해 평균이 0이고 분산이 $E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\}=\mathbf{I}$ 가 되도록 전처리가 필요하다.

하나의 단위에 적용한 Fixed-Point 알고리즘은 다음 식 (2.27)과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}^+ &= E\{\mathbf{x}(\mathbf{w}^H \mathbf{x})^* g(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2)\} - E\{g(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2) \\ &\quad + |\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2 g'(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2)\} \mathbf{w} \\ \mathbf{w}_{\text{new}} &= \frac{\mathbf{w}^+}{\|\mathbf{w}^+\|} \end{aligned} \quad (2.27)$$

단일 유닛 알고리즘은 전체 ICA 변환 $\mathbf{s} = \mathbf{W}^H \mathbf{x}$ 에 확장되어 사용될 수 있다. 다른 뉴런 값들이 같은 극값으로 수렴하는 것을 방지하기 위해 출력 값 $\mathbf{w}_1^H \mathbf{x}, \dots, \mathbf{w}_n^H \mathbf{x}$ 은 알고리즘을 수행할 때마다 비상관화(decorrelation)되도록 작업을 수행한다. p 개의 독립 성분들 $\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_p$ 을 분석하였을 경우 $\mathbf{w}_{p+1}$ 에 해당하는 fixed-point 알고리즘을 수행하게 된다. 이후 다음 단계에서 $\mathbf{w}_{p+1}$

의 성분 중 이전에 평가된 p 개의 벡터로 투영된 값들은 모두 제거를 하고 다시 정규화(normalize)되게 된다. 결과는 아래 식 (2.28)과 같다.

$$\mathbf{w}_{p+1} = \mathbf{w}_{p+1} - \sum_{j=1}^P \mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^H \mathbf{w}_{p+1} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{w}_{p+1} = \frac{\mathbf{w}_{p+1}}{\|\mathbf{w}_{p+1}\|}$$

때때로 모든 독립 성분들을 한 번에 추정하고 대칭 비정규화(Symmetric Decorrelation)를 하는 것이 더 선호된다. 이 경우 아래 식 (2.29)과 같은 방식으로 비상관화를 수행할 수 있다.

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}(\mathbf{W}^H \mathbf{W})^{-1/2} \quad (2.29)$$

Complex ICA를 수행하기 위한 최종적인 fast fixed-point 알고리즘은 다음과 같다.

[표 2.1] Complex ICA를 수행하기 위한 fast fixed-point 알고리즘

-
1. 수신된 데이터의 평균을 0으로 변환
 2. 주어진 데이터를 화이트닝
 3. 수신 데이터 중 독립 성분 개수 m 결정
 4. 초기값 $\mathbf{w}_i$, $i=1, \dots, m$ 결정, 크기는 1이고 모두 수직(orthogonal)이 되게 설정
 5. 모든 $i=1, \dots, m$ 에 대해

$$\mathbf{w}^+ = \mathbf{E} \{ \mathbf{x}(\mathbf{w}^H \mathbf{x})^* g(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2) \} - \mathbf{E} \{ g(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2) + |\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2 g'(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2) \} \mathbf{w}$$
 수행

6. 메트릭스 $\mathbf{w} = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m)^T$ 에 대칭 수직화를 다음의 식을 이용하여 수행

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}(\mathbf{W}^H \mathbf{W})^{-1/2}$$

7. 수렴하지 않은 경우 5번부터 반복 수행

2) Complex ICA 적용 타당성 검증

레이더의 LOS와 블레이드의 장력벡터가 수직이 되는 경우 도플러 주파수의 절대값이 최대가 되고 레이더 단면적(RCS: Range Cross Section)역시 최대가 된다. 따라서 일정한 각속도로 회전하는 블레이드의 시간-주파수 영상은 플래시 형태로 수신된다. 블레이드의 개수가 2개, 3개 그리고 4개인 경우 시간에 따른 도플러 주파수는 다음 [그림 2.3]과 같은 형태를 띈다. 블레이드의 개수가 2개인 첫 번째 경우와 블레이드의 개수가 4개인 세 번째 경우 중 1번과 3번 블레이드 그리고 2번과 4번 블레이드는 각도가 서로 180° 만큼 차이가 난다. 이 경우 각각의 블레이드에 의해 같은 시점에서 플래시를 형성하고 이를 제외한 모든 경우는 플래시가 동시에 발생하지 않고 일정한 시간만큼 지연되어 형성된다.

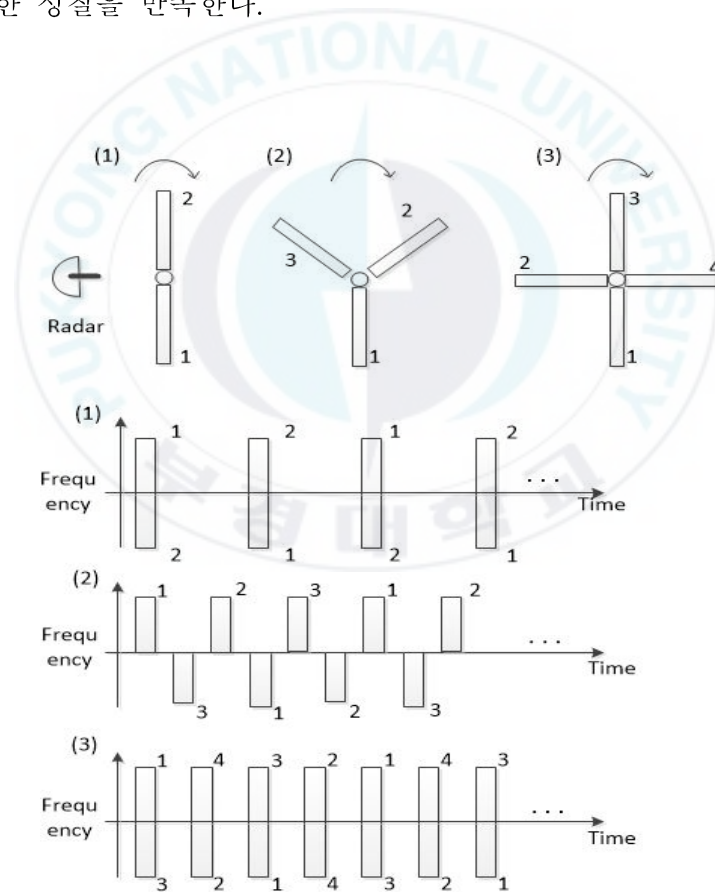
각각의 블레이드로부터 중첩되어서 수신된 신호를 분리하기 위해서는 신호의 집합 $\mathbf{s}(\mathbf{t})$ 가 모두 화이트(White)해야 하고 최대한 비 가우시안이 되는 형태가 되어야한다. [그림 2.3]에서 세 번째 경우 중 블레이드 3번과 4번이 일정한 각속도로 회전할 때 시간-주파수 영상은 다음 [그림 2.4]와 같다. 3번 블레이드의 신호가 크게 수신되는 경우 4번 블레이드로부터 수신되는 신호는 매우 약하게 되고 그 역도 성립한다. 따라서 시간에 따른 각각의 수신신호의 실수와 허수 모두 결합분포(Joint Distribution)가 슈퍼가

우시안의 형태로 형성된다([그림 2.5]). 식 (2.24)를 이용하여 계산한 첨도는 124.85이다. 또한 식 (2.23)을 이용한 결과는

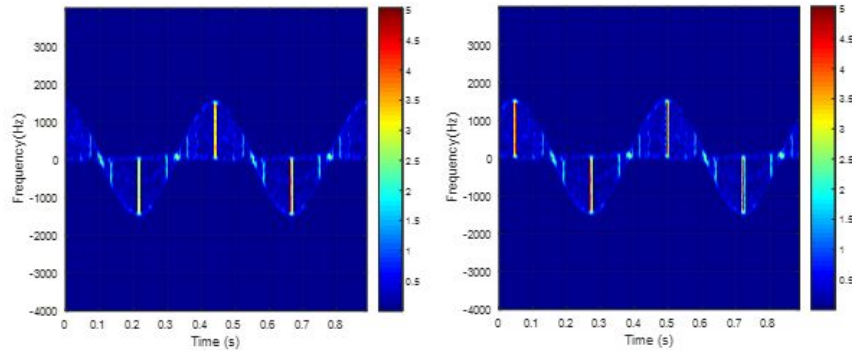
$$E\{\mathbf{ss}^H\} = \begin{bmatrix} 0.999 + 0.00i & 0.014 - 0.00i \\ 0.014 + 0.00i & 0.999 + 0.00i \end{bmatrix},$$

$$E\{\mathbf{ss}^T\} = \begin{bmatrix} -0.0248 + 0.0036i & -0.003 - 0.0059i \\ -0.03 + 0.0059i & 0.0248 + 0.0036i \end{bmatrix}$$

로 화이트한 성질을 만족한다.



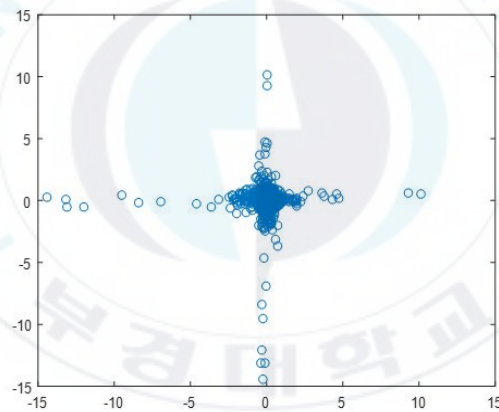
[그림 2.3] 블레이드와 플래시의 상관관계



(a) 3번 블레이드

(b) 4번 블레이드

[그림 2.4] 블레이드의 시간-주파수 영상



[그림 2.5] 3번, 4번 블레이드로부터 수신된 신호의 실수 값

[그림 2.3]의 첫 번째 경우와 같이 블레이드 사이의 각도가 180° 나는 경우의 시간-주파수 영상은 다음 [그림 2.6]과 같다. 이 경우 같은 시점에서 플래시가 발생하기 때문에 결합분포는 다음 [그림 2.7]과 같은 형태를 띈다. 따라서 식 (2.23)을 이용하여 계산한 결과는

$$E\{\mathbf{ss}^H\} = \begin{bmatrix} 0.999 + 0.00i & 0.040 - 0.00i \\ 0.040 + 0.00i & 0.999 + 0.00i \end{bmatrix},$$

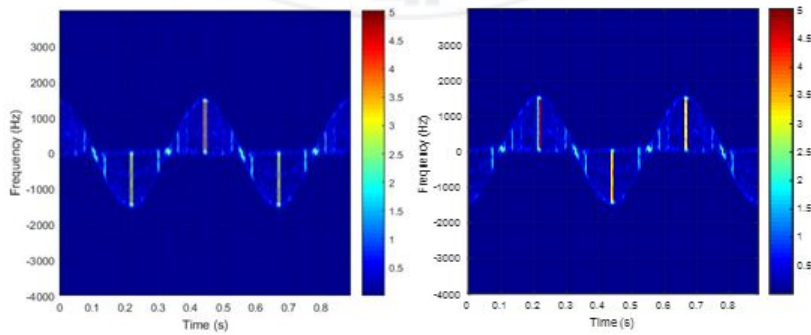
$$E\{\mathbf{ss}^T\} = \begin{bmatrix} -0.0248 + 0.0036i & -0.3533 - 0.6114i \\ -0.3533 + 0.6114i & 0.0248 + 0.0036i \end{bmatrix}$$

로 화이트하다 보기 어렵다. $s_i = u_i + iv_i$ 라 할 때 $E\{\mathbf{ss}^T\}$ 의 1행 2열은 $E\{u_i u_j - v_i v_j\} + iE\{u_i v_j + u_j v_i\}$ 가 된다. 즉 각각의 실수 및 허수신호는 서로 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있다. 식 (2.26)에서 G_1 을 고려한 Complex ICA기법을 적용하면 이상점에 강인한 결과를 획득할 수 있다. 이 경우 식 (2.23)을 이용한 결과는

$$E\{\mathbf{ss}^H\} = \begin{bmatrix} 0.999 + 0.00i & 0.040 - 0.00i \\ 0.040 + 0.00i & 0.999 + 0.00i \end{bmatrix}$$

$$E\{\mathbf{ss}^T\} = \begin{bmatrix} -0.0248 + 0.0036i & -0.3533 - 0.6114i \\ -0.3533 + 0.6114i & 0.0248 + 0.0036i \end{bmatrix}$$

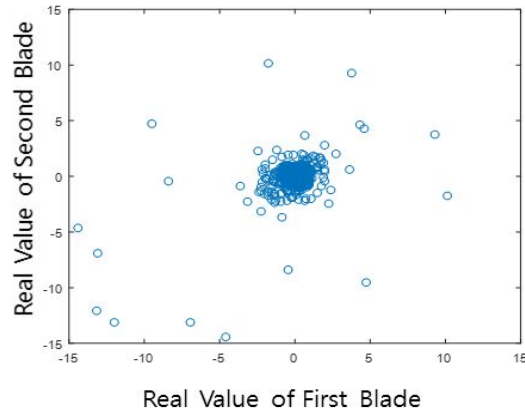
로 화이트하다 할 수 있다.



(a) 1번 블레이드

(b) 2번 블레이드

[그림 2.6] 블레이드의 시간-주파수 영상

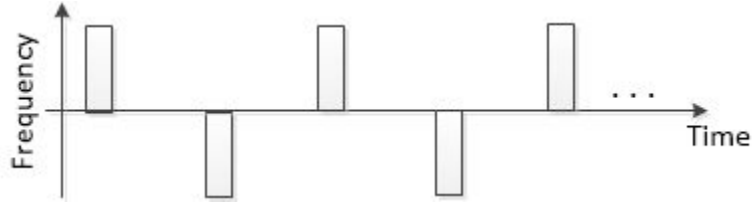


[그림 2.7] 1번, 2번 블레이드로부터 수신된 신호의 실수 값

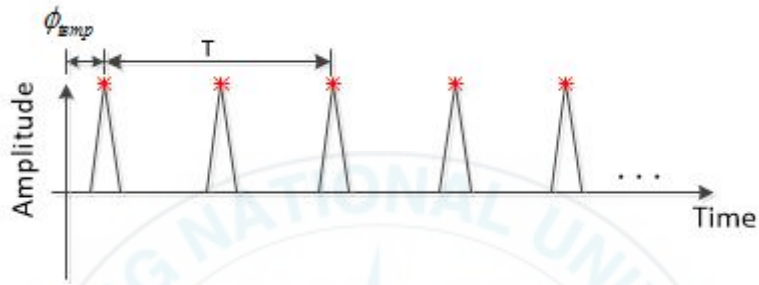
4. 블레이드의 변수 추정 기법

기존의 방식인 Hough변환[3]은 과 Radon변환[4]은 블레이드가 가질 수 있는 (l_T, ω_T, ϕ_T) 의 모든 값들을 대입하여 최대가 되는 해를 찾는 방식이기 때문에 시간이 오래 걸린다. Radon변환 역시 (ω_T, ϕ_T) 의 범위를 정하여 최대가 되는 해를 찾는 방식이다. 본 논문에서는 (l_T, ω_T, ϕ_T) 를 추정하기 위해 Complex ICA를 통해 블레이드신호가 완전히 분리된 경우 적용할 수 있는 간단한 윈도우 매칭 기법을 제안한다.

제안된 기법은 ω_T 를 먼저 추정하고 ϕ_T, l_T 순으로 순차적인 방식을 통해 변수를 추정한다. [그림 2.8]에서 (a)는 하나의 블레이드로부터 수신된 시간-주파수 영상이고 (b)는 시간-주파수 영상에서 동 시간대에 가질 수 있는 모든 주파수 값을 더한 1차원 영상이다.



(a) 시간- 주파수 영상



(b) 주파수 방향으로 결합한 영상

[그림 2.8] 단일 블레이드로부터 획득한 영상

(b)에서 피크점을 찾고 첫 번째 피크가 발생하는 시점부터 세 번째 피크가 발생하는 시점까지의 시간을 찾음으로서 간단하게 주기 T 를 알 수 있다. 또한 첫 번째 피크점이 발생하는 시간을 ϕ_{temp} 라 할 때 블레이드의 초기 위상은 ϕ_{temp} 혹은 $\phi_{temp} + T/2$ 가 된다. 따라서 아래 식 (2.30)의 변수 ϕ 값에 두 가지 경우 ϕ_{temp} , $\phi_{temp} + T/2$ 만을 고려하여 위상 값을 추정할 수 있다.

$$P(\phi) = \iint I(x, y) \times \sum_{n=0}^{K-1} \text{rect}\left(\frac{x - nT - \phi}{\Delta t}\right) \times u((-1)^n(y)) dx dy \quad (2.30)$$

위 식에서 $I(x, y)$ 는 하나의 블레이드로부터 획득한 신호의 시간-주파수 영상을 1과 -1로 이진화한 영상이고 x 는 시간, y 는 주파수 값을 나타낸다. K 는 시간-주파수 영상에서 형성되는 총 플래시의 개수가 되고, Δt 는 시간-주파수 영상의 해상도에 따라 결정되는 상수이다.

아래 식 (2.31)은 l_T 를 추정하기 위한 윈도우 함수이다.

$$Q(q) = \text{rect}\left(\frac{x - nT - \phi_0}{\Delta t}\right) \times (u((-1)^n(y)) - u((-1)^n(y - q))) \quad (2.31)$$

위 식에서 x 축 방향으로 형성되는 사각파의 크기 및 주기는 이미 결정된 값이고 오직 q 의 변화에 따라 y 축 방향으로 형성되는 플래시의 길이가 변하게 된다. 따라서 식 (2.32)과 같이 이진화된 블레이드의 시간-주파수 영상과 $Q(q)$ 를 곱한 값의 합이 최대가 되는 $P(q)$ 를 찾음으로서 l_T 를 추정할 수 있다.

$$P(q) = \iint I(x, y) \times Q(q) dx dy \quad (2.32)$$

5. 알고리즘 요약

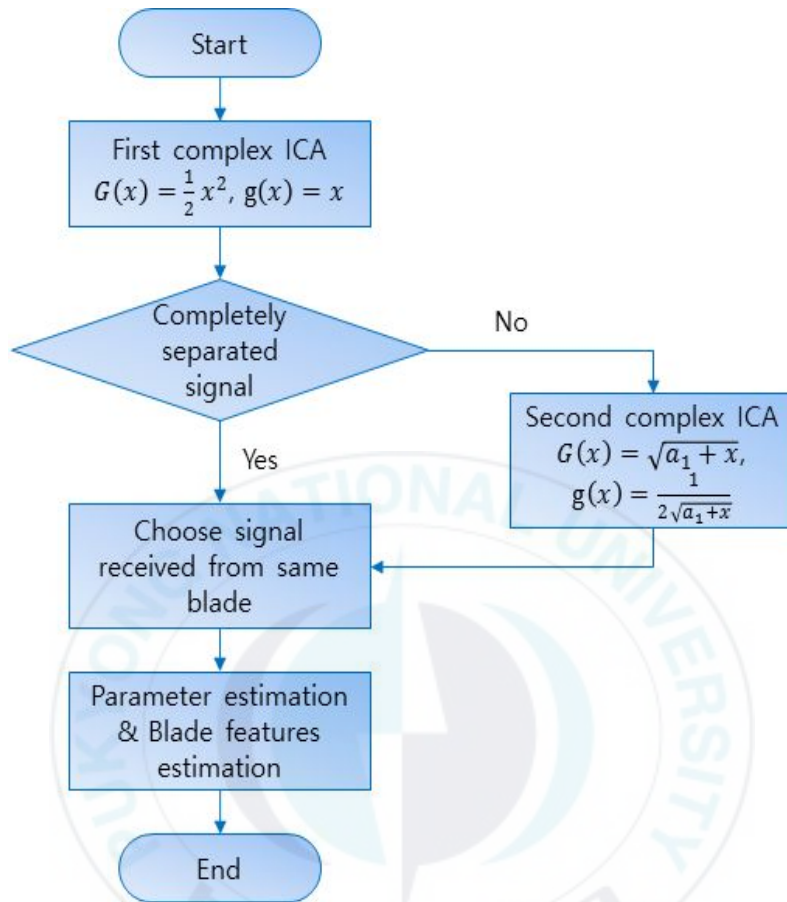
블레이드 사이의 각도가 180° 인 경우와 아닌 경우의 특성이 다르게 나타났고 따라서 이 경우를 고려해 Complex ICA를 적용할 필요가 있다. 블

레이드의 개수에 영향을 받지 않고 블레이드의 특성을 분석하기 위해 본 논문에서 제안한 알고리즘은 다음 [그림 2.9]와 같다.

첫 번째 Complex ICA를 적용할 때 $G(x)$ 함수는 식 (2.26)의 $G_2(x) = \frac{1}{2}x^2$ 을 이용한다. $G_2(x)$ 방식은 침도를 기반으로 분석하는 기법으로 블레이드의 플래시가 동시에 발생하지 않는 경우 적절한 방법이다. 블레이드가 홀 수개인 경우는 첫 번째 Complex ICA기법을 이용하여 모든 블레이드들을 분리할 수 있다. 이 경우는 다음 절차로 넘어가게 되고 아닌 경우는 두 번째 Complex ICA를 적용하게 된다. 이 경우 $G(x)$ 는 식 (2.26)의 첫 번째 함수인 $G_1(x) = \sqrt{a_1 + x}$ 를 이용한다. $G_1(x)$ 는 이상점들의 영향을 적게 받기 때문에 플래시가 동시에 발생하는 경우의 신호를 분리하는데 적절한 방법이다.

다음으로 제II장 2절에서 제안한 바이스태틱 마이크로 도플러 분석 기법을 적용하기 위해서는 동일한 블레이드로부터 수신된 모노스태틱과 바이스태틱 레이더 신호를 이용해야 한다. 표적과 레이더 사이의 거리가 충분히 멀리 떨어져 있고 두 레이더 사이가 매우 크지 않은 경우 즉 [그림 2.2]에서 $R_T \gg L$ 그리고 $R_R \gg L$ 을 만족하는 경우 플래시의 지연이 가장 적게 된 신호가 동일한 블레이드로부터 수신된 정보가 된다.

본 논문에서 제안한 윈도우 매칭 기법을 이용하여 변수 $(\hat{l}_T, \hat{\omega}_T, \hat{\phi}_T)$, $(\hat{l}_B, \hat{\omega}_B, \hat{\phi}_B)$ 를 추정한 다음 식 (2.20)을 이용하여 $(\hat{l}_R, \hat{\phi}_R)$ 을 추정한다. 이후 식 (2.21)을 이용하여 정확한 블레이드 길이 추정 및 각속도 분석을 하고 알고리즘을 종료한다.



[그림 2.9] Complex ICA를 이용한 블레이드 특성 추정을 위한 알고리즘

6. Complex ICA 기법을 적용한 헬리콥터 변수 추정 결과

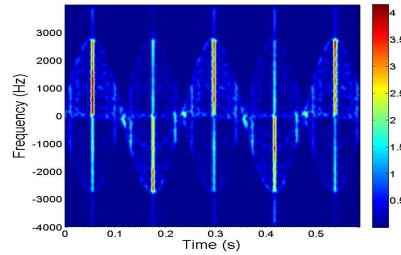
본 논문에서는 전자기 해석을 위해 널리 사용되는 상용도구인 FEKO를 이용하여 레이더 신호를 획득하였다. 우선 블레이드와 유사한 구조체를 만들기 위해 길이 5 m , 폭 0.3 m 그리고 높이가 0.1 m 인 직육면체를 모델링하였고 완전한 전기 전도체(PEC: Perfect Electric Conductor)라 가정하였다. 레이더는 10 GHz 의 주파수에서 동작하며 모노스테틱 레이더의 고각 (Elevation Angle) α_T 는 71.57° , 바이스테틱 레이더의 고각 α_R 는 71.23° 라 가정하였다. PO(Physical Optics)기법을 이용해 분석하였고 0.1° 씩 회전시키면서 획득한 복소 전계신호를 이용하였다. 획득한 신호를 이용해 블레이드의 각속도 ω 는 26 rad/s 레이더의 펄스 반복 주파수(PRF: Pulse Repetition Frequency)는 8 kHz 인 조건에서 실험하였다. 다음 [표 2.2]에 전반적인 시뮬레이션 조건을 명시하였다.

[표 2.2] 시뮬레이션 조건

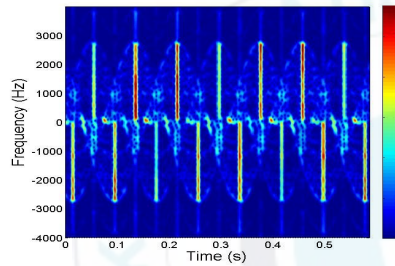
블레이드	길이	5 m	폭	0.3 m
	높이	0.1 m		
	초기위상	45°	각속도	26 rad/s
레이더	주파수	10 GHz	PRF	8 kHz
	α_T	71.57°	α_R	71.23°
	T 레이더 위치	(100,0,-300) km	R 레이더 위치	(100,20,-300) km

하나의 표적이 가지는 블레이드 사이의 각도를 고려하여 획득한 정보를 지연시킴으로써 식 (2.22)의 $\mathbf{s}$ 를 형성할 수 있고 $\mathbf{A}$ 는 $0.5 \sim 1$ 사이의 임의의 값으로 가정하였다. 블레이드는 총 2개에서 6개인 경우를 고려하였고 블레

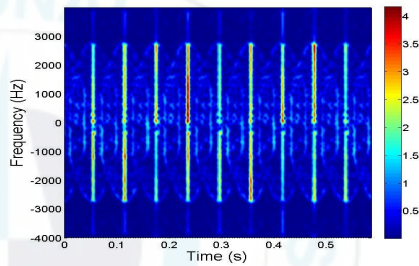
이드의 개수에 따라 형성되는 $\mathbf{x}$ 의 시간-주파수 영상은 다음 [그림 2.10]과 같다.



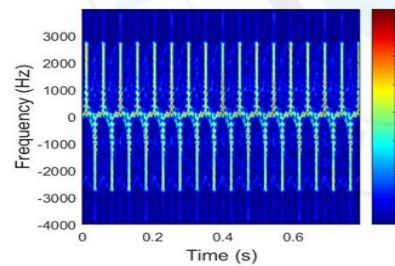
(a) 두 개의 블레이드



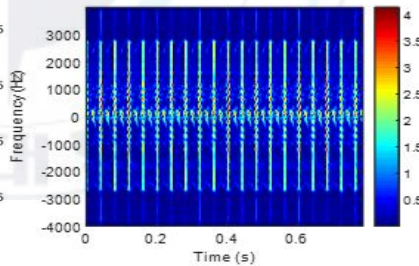
(b) 세 개의 블레이드



(c) 네 개의 블레이드



(d) 다섯 개의 블레이드



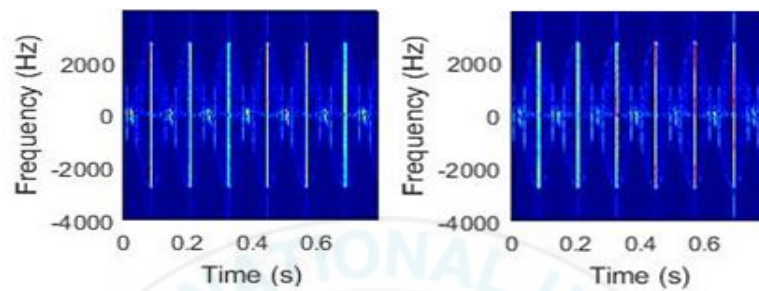
(e) 여섯 개의 블레이드

[그림 2.10] 블레이드 개수변화에 따른 시간-주파수 영상

블레이드가 2개, 4개 그리고 6개인 경우는 양의 방향으로 형성되는 플래시와 음의 방향으로 형성되는 플래시가 동시에 발생하고 주기는 다르지만 비슷한 패턴을 형성하는 것을 확인할 수 있다. 또한 블레이드가 3개, 5개인 경우는 양의 플래시와 음의 플래시가 교차로 발생하며 주기는 다르지만 비

슷한 패턴을 가진다.

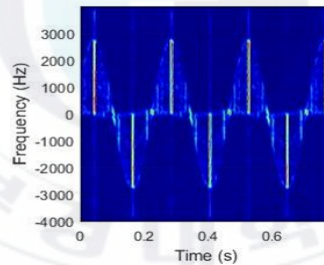
[그림 2.9]의 알고리즘에서 첫 번째 Complex ICA를 적용한 결과는 다음 그림 [2.11], [2.12], [2.13], [2.14] 그리고 [2.15]와 같다.



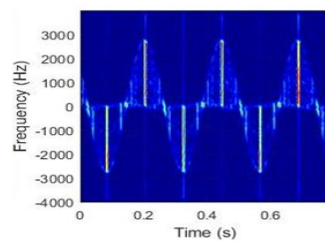
(a) 첫 번째

(b) 두 번째

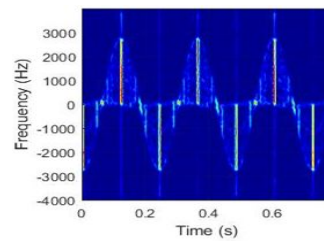
[그림 2.11] 첫 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 2개



(a) 첫 번째

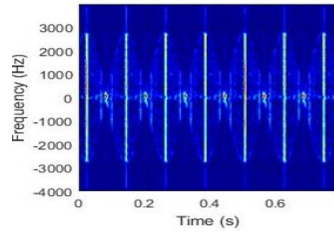


(b) 두 번째

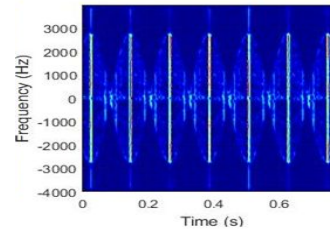


(c) 세 번째

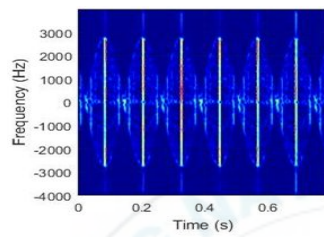
[그림 2.12] 첫 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 3개



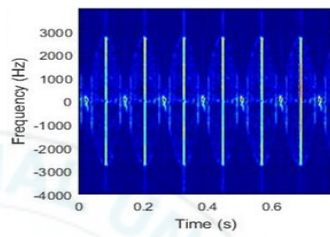
(a) 첫 번째



(b) 두 번째

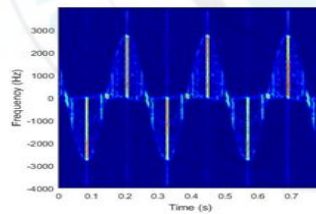


(c) 세 번째

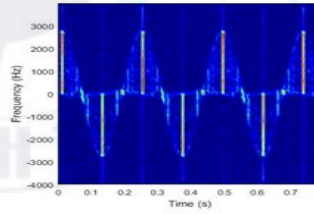


(d) 네 번째

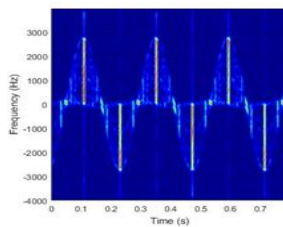
[그림 2.13] 첫 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 4개



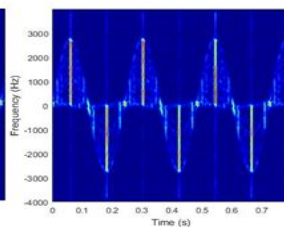
(a) 첫 번째



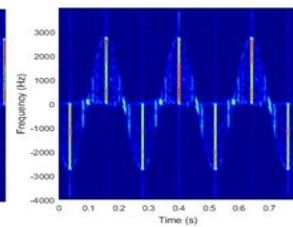
(b) 두 번째



(c) 세 번째

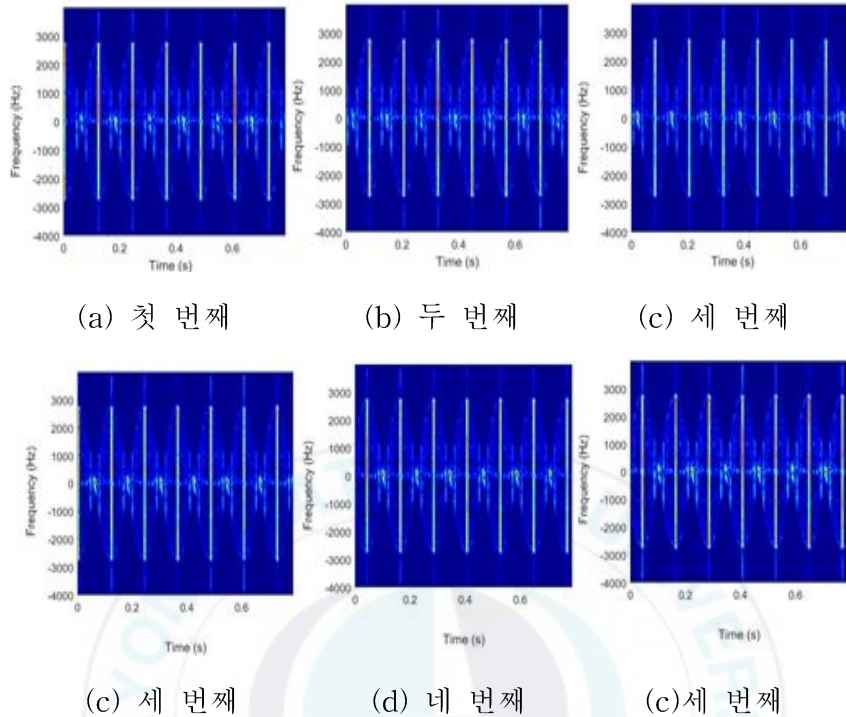


(d) 네 번째



(e) 다섯 번째

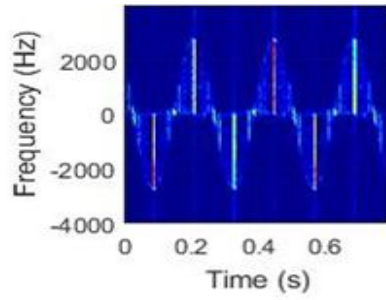
[그림 2.14] 첫 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 5개



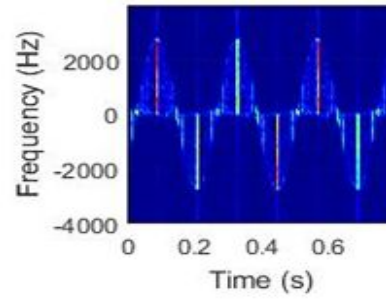
[그림 2.15] 첫 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 6개

블레이드의 개수가 3개 그리고 5개인 경우는 첫 번째 Complex ICA를 적용하여 모든 신호가 분리되었다. 반면 블레이드의 개수가 2개, 4개 그리고 6개인 경우 플래시가 교차로 발생하는 부분은 분리가 되었지만 플래시가 동시에 나타나는 신호는 분리가 되지 않고 동일한 패턴을 가지는 영상이 두개씩 형성되었다.

블레이드의 개수가 2개, 4개 그리고 6개인 경우 동일한 패턴을 가지는 영상을 선택하여 두 번째 Complex ICA를 적용하면 다음 그림 [2.16], [2.17] 그리고 [2.18]과 같다.

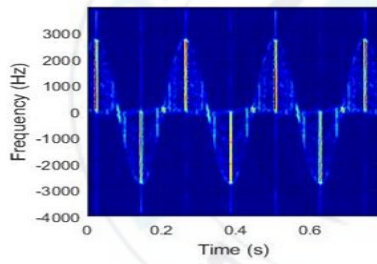


(a) 첫 번째

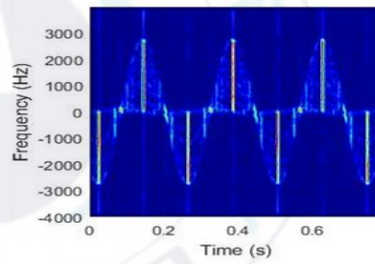


(b) 두 번째

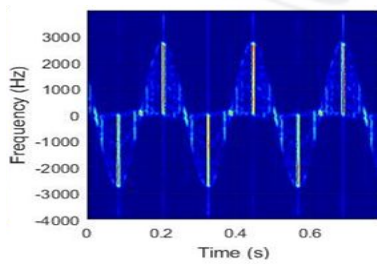
[그림 2.16] 두 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 2개



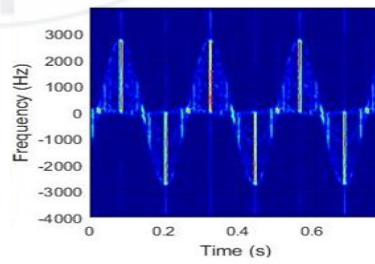
(a) 첫 번째



(b) 두 번째

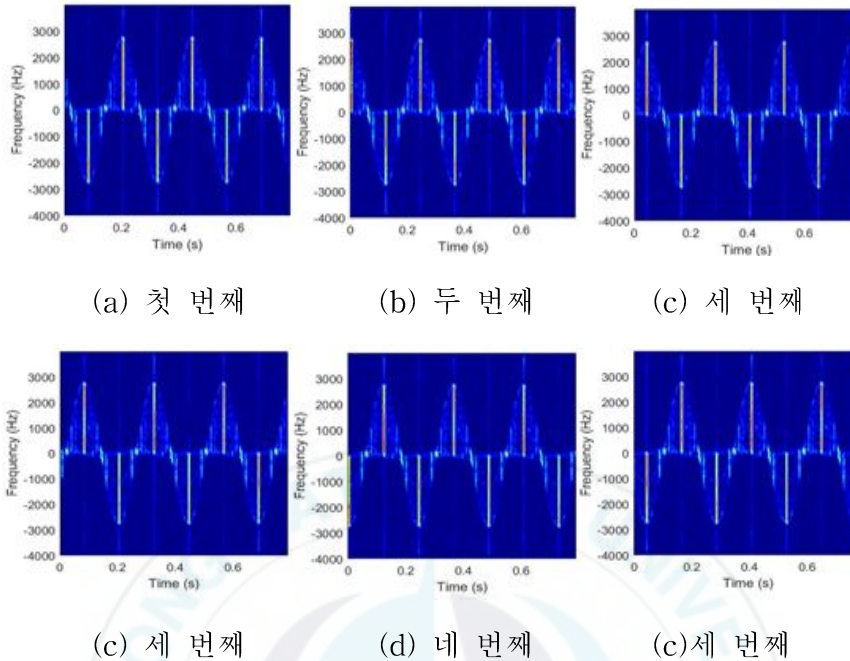


(c) 세 번째



(d) 네 번째

[그림 2.17] 두 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 4개



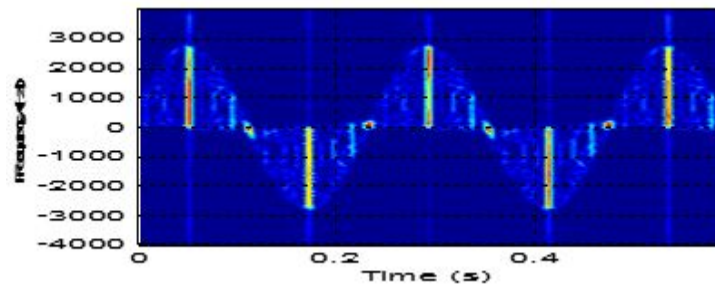
[그림 2.18] 두 번째 Complex ICA 적용 결과 - 블레이드 6개

시간-주파수 영상을 이진화 한 다음 각각의 영상을 곱한 결과의 합이 최대가 되는 결과를 찾음으로써 동일한 패턴의 영상을 판별할 수 있다. 아래 그림을 보면 첫 번째 Complex ICA를 적용하였을 때 분리되지 않았던 신호들이 모두 분리됨을 확인할 수 있다.

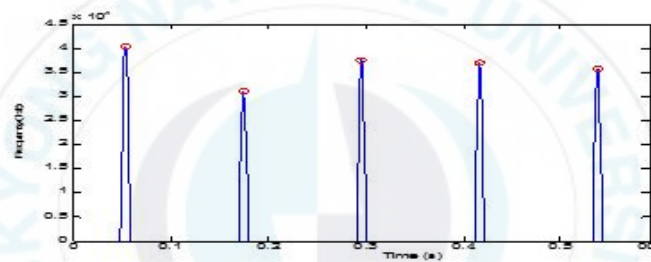
모노스테틱 레이더 신호와 바이스테틱 레이더 신호 모두 Complex ICA를 적용하여 분리한 다음 동일한 블레이드로부터 획득된 신호를 판별한다. $R_T \gg L$ 그리고 $R_R \gg L$ 인 경우 플래시의 지연이 가장 적게 된 신호가 동일한 블레이드로부터 수신된 신호이므로 자기 상관 함수(Autocorrelation Function)의 최대값이 가장 적게 지연된 시점에서 나타나는 신호가 동일 블레이드로부터 수신된 신호가 된다.

[그림 2.19]는 모노스테틱 레이더로부터 수신된 신호의 시간-주파수 영상

과 같은 시점의 주파수값들을 합한 영상이다.



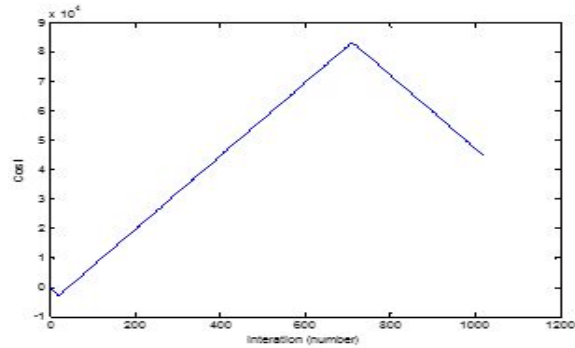
(a) 시간-주파수 영상



(b) 주파수 방향으로 결합한 영상

[그림 2.19] 단일 블레이드로부터 획득한 영상

첫 번째 피크는 0.044초에서 발생하고 식 (2.22)를 이용하여 구한 초기위상의 각도 ϕ_T 는 -155.92° 가 된다. 첫 번째 피크와 두 번째 피크 사이의 시간 즉 주기 T 는 0.2415초이므로 추정된 각속도 $\hat{\omega}$ 는 26.017 rad/s가 된다. 식 (2.21)의 q 값에 따른 결과는 다음 [그림 2.20]과 같다. $\hat{l}_T$ 는 크기가 최대가 되는 q 값에 해당하는 도플러 주파수 값인 2.7767kHz가 된다.



[그림 2.20] q 값에 따른 비용함수

동일한 과정을 거쳐 추정된 바이스태틱 신호의 변수 ($\hat{l}_B, \hat{\phi}_B$)는 각각 ($2.7846kHz, -150.048^\circ$)가 되었다. 이후 바이스태틱 마이크로 도플러 분석 기법을 적용한 결과는 다음 [표 2.3]와 같다.

[표 2.3] 헬리콥터 성분 분석 결과

	이론값	추정값	오차율
l_T	2739.93 Hz	2776.7 Hz	1.342 %
l_B	2788.673 Hz	2784.6 Hz	0.146 %
l_R	2863.5 Hz	2818.6 Hz	1.568 %
$\phi_T - \phi_B$	5.65 °	5.5872 °	1.112 %
α_T	71.57 °	71.1418 °	0.598 %
α_B	71.23 °	70.8468 °	0.538 %
l	5 m	4.9554 m	0.892 %
ω	26 rad/s	26.0039 rad/s	0.015 %

각속도는 매우 정확하게 추정됨을 확인할 수 있고 도플러 주파수 및 위상값은 어느정도 오차가 존재했다. 도플러 주파수와 위상값은 시간-주파수 영상의 해상도 문제에 의해 발생하는 오차로 주파수 방향으로 해상도를 줄

게 하면 시간영역의 해상도가 나빠지고 그 역도 이와 같다. 하지만 각속도, 위상, 도플러 주파수 순으로 순차적으로 변수를 추정하기 때문에 시간-주파수 영상의 해상도를 추정하는 변수에 맞게 조절하여 문제를 해결할 수 있었다. 또한 추정된 블레이드 길이는 추정된 도플러 주파수값의 오차보다 추정된 위상값의 오차에 더욱 민감하였다.



제Ⅲ장 결 론

본 논문에서는 바이스테틱 기반 특징 추출기법 적용에 적합하고 실제 헬리콥터 산란 메커니즘으로부터 획득된 마이크로 도플러 특성 분석에 용이한 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 실제 블레이드와 유사한 구조물을 형성하여 여러 종류의 블레이드 신호를 FEKO 프로그램을 이용하여 획득하였고, 블레이드 개수에 상관없이 수신신호에 Complex ICA를 적용하여 각각의 블레이드 신호를 독립적으로 분리할 수 있었다. 뿐만 아니라 이러한 데이터를 바탕으로 헬리콥터의 주요 변수를 추정할 수 있었다.

블레이드에 Complex ICA 기법을 적용하여 성공적으로 블레이드 신호를 분리하고 필요한 정보를 획득할 수 있었지만 이러한 정보들을 이용한 헬리콥터 식별 정확도에 대한 분석이 이루어지지 못하였다. 본 연구의 저자들은 추가적인 연구를 통해 헬리콥터의 주요 변수를 이용하여 식별율을 높이는 표적식별 기법을 연구하고 있다.

참고문헌

- [1] C. Clemente et al., "GNSS based passive bistatic radar for micro-Doppler based classification of helicopters: Experimental validation," *2015 IEEE Radar Conference (RadarCon)*, VA, pp. 1104-1108, 2015
- [2] K. Chen, Y. Li and X. Xu, "Rotating target classification base on micro-Doppler features using a modified adaptive boosting algorithm," *2015 International Conference on Computers, Communications, and Systems (ICCCS)*, pp. 236-240, 2015.
- [3] Ai Xiaofeng, Zou Xiaohai, Yang Jianhua, Liu Jin and Li Yongzhen, "Feature extraction of rotating target based on bistatic micro-Doppler analysis," *Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar*, pp. 609-612, 2011.
- [4] A. Cilliers and W. A. J. Nel, "Helicopter parameter extraction using joint time-frequency and tomographic techniques," *2008 International Conference on Radar*, pp. 598-603, 2008.
- [5] E. Bingham and A. Hyvärinen, "A fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex valued signals", *International Journal of Neural Systems*, Vol. 10, No. 1, pp 1-8, Feb. 2000.
- [6] Aapo Hyvarinen, Juha Karhunen, and Erkki Oja, "Independent Component Analysis", Wiley-Interscience, pp. 383-385, Mar. 2001.
- [7] L. C. Potter, D. M. Chiang, R. Carriere, and M. J. Gerry, "A GTD-based parametric model for radar scattering", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 43, No. 10, 1058-1067, Oct. 1995

부 록

[게제 논문]

논문제목 (Paper Title)	논문 발표일 (Date)	논문지명 (Journal Title)	논문지 구분 ¹⁾	저자 구분 ²⁾
효율적인 헬리콥터 블레이드 분리 및 주요 파라미터 추정 기법	2016.08	Journal of KIIT	학진 등재지	제1저자
산악지형 풍력발전단지에 의한 추적레이더 정확도 영향 분석	2016.03	Journal of KIIT	학진 등재지	제1저자
풍력발전단지에 의한 레이더 차폐 현상 및 도플러 측정 데이터 분석	2016.08	Journal of KIEES	학진 등재지	제2저자
편대비행 표적식별을 위한 효과적인 ISAR 영상 합성 방법	2016.08	Journal of KIEES	학진 등재지	제2저자
산악지형에 설치된 풍력발전단지에 의한 도플러 주파수 추출 및 분석	2015.11	Journal of KOSMES	학진 등재지	제2저자

[학술 학회]

논문제목 (Paper Title)	발표일 (Date)	학술회명 (Conference Title)
효과적인 헬리콥터 변수 추정 기법 연구	2016.06	한국전자파학회 하계 종합학술대회
산악지형 내 풍력발전단지에 의한 추적레이더 정확도 분석 연구	2015.08	한국전자파학회 하계 종합학술대회

[참여 과제]

과제명 (Paper Title)	기관 (Organization)	기간 (Data)
위협표적 모델링 및 특성분석	국방과학연구소	2016.09 ~ 2019.06
레이더를 이용한 효율적인 자동표적인식 기법 개발	한국연구재단과제	2015.05 ~ 2018.04
고기동 저 RCS 표적의 기동 및 미세도플러 특성을 인용한 표적 구분 연구	국방과학연구소 레이더 및 IR 표적식별특화연구실	2012.04 ~ 2017.12
레이더를 이용한 효율적인 자동표적인식 기법 개발	한국연구재단과제	2012.03 ~ 2015.02

감사의 글

2012 년, 군복무를 마치고 복학하여 열정은 있지만 나아가야 할 방향을 모르고 방황하던 시기에 연구실에 들어와 나아가야 할 방향을 제시해주시던 지도교수님과 선배님들을 만났던 시간이 생각납니다. 처음 연구실을 들어설 때 겁도 나고 잘해낼 수 있을까 하는 막연한 생각을 많이 했었는데 어느 샌가 벌써 졸업할 시기가 오고 새로운 선택을 하는 시점이 왔습니다. 연구실 생활을 하면서 학업뿐 아니라 좋은 사람들과 동고동락하며 재미있는 추억도 많이 간직하게 되었습니다. 또한, 이전에 하지 못했던 견문을 넓힐 경험도 많이 하였습니다. 이러한 경험들이 앞으로 걸어가게 될 삶의 큰 디딤판이 되어 줄 것입니다. 그 전에 지금 제가 여기까지 나아가도록 도움을 많이 주신 분들께 이 지면을 빌어 감사의 인사를 남깁니다.

먼저, 전자기산란응용연구실에 들어갈 때 가장 반갑게 맞아주셨던 박상홍 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 연구실에서 일하게 될 학생이 아니라 지도교수로서 학생이 나아가야 할 방향을 인도해주시는 모습에서 저도 스승으로써 따르게 되었습니다. 매주 세미나를 직접 봐주시고 지도해주셔서 감사드립니다. 이 시기에 남들보다 더 많이 배울 수 있었고 학업에 증진할 수 있는 좋은 기회가 되었습니다. 회식자리에서도 좋은 말씀 많이 해주셔서 배울 것이 많았고 동시에 재치 있는 농담으로 회식자리를 즐겁게 만들어 주셔서 감사드립니다. 뿐만 아니라 국내학회 그리고 국외학회까지 참여할 기회를 주셔서 지식뿐 아니라 견문을 넓히는 계기가 되었습니다. 중요한 시기에 방향을 제시해주시고 이끌어 주셔서 감사드립니다.

대학원 마지막 학기부터 졸업하는 날 까지 학업 지도를 해 주신 김경태 교수님께도 또한 큰 감사의 인사를 드립니다. 박상홍 교수님과는 또 다른 방식으로 지도를 해주셔서 새로운 것들을 배울 수 있는 좋은 기회가 되었습니다. 남들과 다른 통찰력으로 저의 장점과 부족한 점을 명확 알아보시고 지도해주셔서 감사드립니다. 쉬운 길 보다는 본질적으로 제게 필요한 길을 나아가도록 지도해주셔서 감사드립니다.

늘 보이지 않는 곳에서 지원을 아끼지 않으시고 남들보다 더 큰 사랑으로 대해주셨던 정주호 교수님께 감사의 말씀 드립니다. 교수님의 포부와 가치관을 보고 저의 사고를 달리하는 계기가 되었습니다. 또한 다른 무엇보다 사람을 가장 가치 있게 생각하시고 저희들에게 늘 사랑으로 대해주셔서 감사드립니다.

젠들하시고 멋있으신 모습으로 수준 높은 강의를 해주신 이원창 교수님, 인터넷 강의도 여시고 항상 학생들의 교육에 집중하시는 임창현 교수님, 항상 저에게 많은 관심을 가져주시고 아껴주신 주문갑 교수님께 감사의 인사를 드립니다.

연구하는데 있어 든든한 버팀목이 되어 큰 힘이 되어준 ‘전자기산란응용연구실’과 ‘레이더 및 전파 신호처리 연구실’ 그리고 ‘로보틱스연구실’의 구성원들에게도 감사의 인사를 남깁니다. 늘 진심으로 따뜻한 배려와 관심을 가져주시고 하나라도 더 알려주시려고 노력하신 최인오 선배님, 동고동락하면서 가장 의지했던 잘생기고 똑똑한 민이형, 형이지만 편하고 좋은 매력만점 태욱이형, 뭐든 열심히 하는 상빈이, 장근석을 닮은 석현이, 뒤늦게 들어왔지만 열정을 가지고 있는 세원이, EM분석할 때 큰 도움 주신 용희형, 물속에서

박태환이 되는 초 동안 성재형, 2014년 마피아의 추억 병수형, 연구실 몸짱 승재형, 개그코드가 맞아 가장 얘기 많이 했던 민석이형, 가장 의지하는 서포터 성현이, 듬직해서 의지하게 되는 명준이, 재밌는 추억 많이 만들었던 진혁이, 연구실 홍일점 보현이, 똑똑한 머리로 센스있는 말을 많이 하는 남훈이, 같이 연구실에 들어와 의지를 많이 했던 창우, 형이지만 친구처럼 지냈던 지수형, 친구지만 듬직한 영훈이에게 감사의 말씀 전합니다.

가장 힘든 시기에 누구보다 이야기를 많이 들어주고 한결같이 믿어주었던 아현이에게 감사의 말을 전합니다. 아들이 하고 싶은 것을 하기 위해 지원을 아끼시지 않으시고 늘 사랑으로 해주신 부모님께 감사를 드립니다. 부모님이 생각한 길을 가지 않아도 이야기를 들어주시고 존중해주셔서 지치지 않고 쓰러지지 않을 수 있었습니다. 같이 생활하면서 공무원 준비하느라 바쁜데도 싫은 소리 안하고 집안일도 곧잘 해주던 동생에게 감사의 말을 전합니다.