THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2014 Apr.; 25(4), 459～466.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.4.459
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

제트 엔진 변조신호에서 주파수 마스킹을 이용한 표적의 특징 추출 및 식별

Feature Extraction and Classification of Target from Jet Engine Modulation Signal Using Frequency Masking

김 시 호 · 김 찬 홍 · 채 대 영

Si-Ho Kim · Chan-Hong Kim · Dae-Young Chae

요 약

본 논문은 항공기의 JEM(Jet Engine Modulation) 신호를 분석하여 표적을 식별하는 방법에 관한 것이다. 제트 엔진의 각 단의 날개 수 정보로부터 계산된 하모닉 주파수 마스크를 이용하여 스펙트럼을 분석함으로써 엔진 기종을 식별하는 방법을 제안한다. 기존의 방법처럼 각 단의 쵸핑(chopping) 주파수를 찾기 위한 복잡한 논리적 알고리즘이나 스펙트럼 비교 방법처럼 미리 모사된 엔진 스펙트럼 DB(Database)를 필요로 하지 않으며, 엔진 DB의 날개 수 정보를 이용하여 추출한 하모닉 성분을 비교함으로써 식별이 가능하다는 장점을 가진다. 또한, 정밀 축회전속도(spool rate)를 찾는 방법을 제시함으로써 날개 수 추정이나 하모닉 주파수의 위치 계산에서 오류를 줄일 수가 있다.

Abstract

This paper deals with the method to classify the aircraft target by analyzing its JEM signal. We propose the method to classify the engine model by analyzing JEM spectrum using the harmonic frequency mask generated from the blade information of jet engine. The proposed method does not need the complicated logic algorithm to find the chopping frequency in each rotor stage and the pre-simulated engine spectrum DB used in the previous methods. In addition, we propose the method to estimate the precise spool rate and it reduces the error in estimating the number of blades or in calculating the harmonic frequency of frequency mask.

Key words: JEM(Jet Engine Modulation), Target Classification, RTS(Radar Target Signature)

Ⅰ. 서 론

레이더(radar)는 전자파를 표적에 송출하여 표적에서 반사되는 신호를 수신하여 표적과의 거리, 방향 및 고도 등의 위치 정보를 탐지해 내는 장치로서, 날씨 및 주야에 관계없이 사용이 가능하다는 장점을 가진다[1]. 레이더는 반사 신호로부터 거리 정보뿐만 아니라, 표적의 특성에 의한 신호의 크기 및 위상 정보를 얻을 수 있어 표적의 식별에도 사용된다. JEM 표적 식별 기법은 항공기 제트 엔진의 회전에 의해 변조되는 레이더 반사 신호를 분석하여 항공기의 기종이나 종류를 구분하는 기법을 말한다[2],[3]. JEM 기법은 항공기 식별 기법 중에서 가장 오래된

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received November 5, 2013 ; Revised January 2, 2014 ; Accepted January 24, 2014. (ID No. 20131105-109)

· Corresponding Author: Si-Ho Kim (e-mail: sihokim@add.re.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

방법이지만, 운용상 연산량이나 성능 면에서 가장 현실적인 방법으로 알려져 있다. JEM 기법은 JEM 신호로부터 제트 엔진의 날개(blade) 수를 추정하고, 이를 엔진의 날개 수 DB와 비교하여 엔진의 기종을 찾는 방법[2],[3]이다. 이는 관측 각도나 주파수에 무관하고, 엔진의 날개 수 정보만으로 식별이 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 추정된 날개 수는 정수 값으로써 유사도로 표현이 되지 않기 때문에 정확히 추정되지 않으면 식별에 실패하게 된다. 날개 수 추정에 오류가 발생하는 주요 원인은 엔진의 회전 주기인 축회전속도 추정과 각 단의 기본 쵸핑 주파수 추정 오류에 기인한다. 특히 스펙트럼의 주요 하모닉 성분에서 기본 쵸핑 주파수를 찾기 위해서는 복잡한 논리적 알고리즘을 필요로 한다. 또, 다른 JEM 식별 기법으로는 엔진 정보로부터 스펙트럼을 모사한 후 측정된 스펙트럼과 상관도를 계산하여 식별하는 방법이 있다[3]. 후자가 성능 면에서는 앞서지만, 스펙트럼을 얼마나 정확하게 모사하느냐가 성능에 크게 영향을 미친다. 레이더가 엔진을 보는 각도에 따라서 스펙트럼의 모양이 달라지기 때문에, 엔진별로 각도에 따라 정확하게 모사된 스펙트럼 DB를 확보하는 것은 현실적으로 쉽지가 않다. 날개 수 정보뿐만 아니라, 엔진의 물리적 구조에 대한 정보를 필요로 하고, 미리 모사된 스펙트럼을 보유한 기종에 대해서만 식별이 가능하다는 단점을 가진다.

이에 본 논문에서는 쵸핑 주파수를 찾는 복잡한 알고리즘이나 모사된 스펙트럼 DB가 없더라도 엔진의 날개 수 정보만으로 표적을 식별할 수 있는 기술을 제안하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 JEM 신호를 이용하여 엔진을 식별하는 일반적인 기법에 대해서 설명을 하고, 3장에서는 제안한 식별 기법을 기술한다. 4장에서는 제안한 기법을 이용한 표적 식별 결과를 제시하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. JEM 표적 식별

제트 엔진에는 그림 1과 같이 공기 압축을 위해 하나의 회전축(shaft)을 중심으로 여러 단에 걸쳐 날개들이 고정되어 있고, 날개의 회전에 의해 레이더 반사 신호는 복잡한 크기 및 위상 변조를 일으킨다[4]~[7]. 여러 단(rotor stage)에 걸쳐서 다중 반사가 일어나는 이러한 변조 특성은 해석하기에 매우 복잡하여 수학적으로 모델링하는 것은 매우 어려운 문제이다. 그러나 이러한 복잡한 JEM 신호도 주기성과 대칭성을 가지고 있어, 이를 이용하면 표적 식별이 가능하다[2],[4]. 제트 엔진의 날개는 회전축이 한번 돌때마다 반사 특성이 반복되는 주기성이 있어서 JEM 스펙트럼 상에는 축회전속도와 그것의 하모닉 성분들이 나타나게 된다.

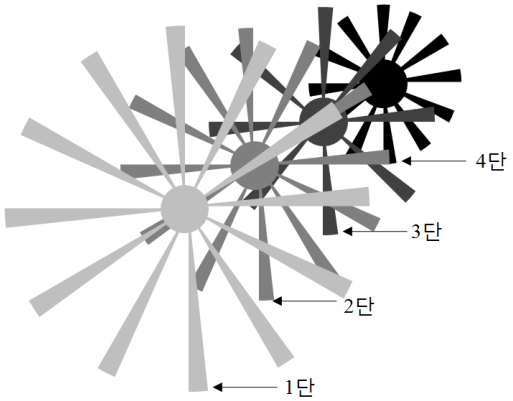

그림 1. 간략화된 제트 엔진의 로터 블레이드
Fig. 1. Simplified rotor blade of jet engine.

각 단에서의 반사 특성을 따로 보면 각 단의 날개는 대칭성을 가지고 있어서 회전 시 인접 날개의 위치를 지날 때마다 반사 특성이 반복되어 나타난다. 즉, 그림 2에서

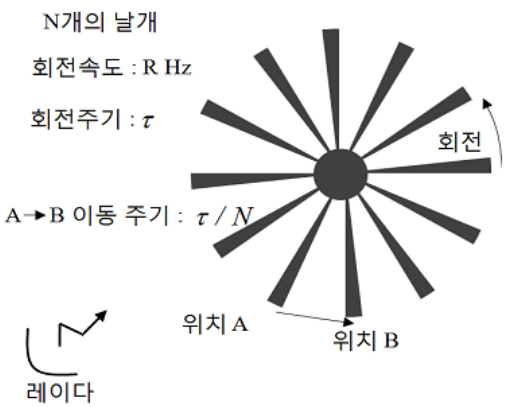

그림 2. 제트 엔진의 1 단에서의 날개 형상 예
Fig. 2. Example of blade shape in the first rotor stage of jet engine.

보는 바와 같이 위치 A의 날개가 위치 B로 이동하면 동일한 반사 특성을 보이기 때문에, 그 시간을 주기로 주기성이 나타난다. 회전 주기가 τ이고, 날개의 개수가 N이라면 날개에 의한 주기는 τ/N으로 나타나게 된다. 이 주기를 각 단에서의 쵸핑 주파수라고 하는데, JEM 스펙트럼은 각 단에서 발생하는 쵸핑 주파수와 그것의 하모닉 성분으로 구성되어 있다. 결론적으로 축회전속도와 쵸핑 주파수의 관계는 날개의 개수에 의해 결정되는데, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Chopping\ frequency = N \cdot Spool\ rate \qquad (1)$$

여기서 N은 날개의 개수이다. 따라서 JEM 스펙트럼을 분석하여 이 두 주파수를 추출하면 날개 수를 추정할 수가 있다. 엔진마다 단수와 날개 개수가 다르기 때문에 각 단의 날개 수는 엔진을 구별하는 정보로 사용될 수가 있다. 일반적으로 뒷단에서의 반사 신호는 약하기 때문에 대략 1~3단 정도의 쵸핑 주파수 성분을 추출할 수가 있다.

그림 3은 전형적인 JEM 스펙트럼 모양을 단순화하여 나타내고 있다. 그림에서 촘촘하게 구성된 하모닉 성분들이 축회전속도와 그것의 하모닉 성분이고, 중간 중간에 크게 나타나는 하모닉 성분들이 각 단의 기본 쵸핑 주파수와 그것의 하모닉 성분들이다. 축회전속도와 쵸핑 주파수의 비는 날개 개수에 해당하므로 항상 정수가 되어야 하지만, 측정 및 추정 오차에 의해 일반적으로 정수가 되지 않는다. 따라서 가장 가까운 정수 값으로 반올림하여 날개 수를 정하는데, 만약 축회전속도 오차가 커서 반올림 오차 범위를 넘어서면 추정된 날개 수가 실제 값에서 벗어나 식별에 실패하게 된다. 예를 들어 날개 수가 50개이고, 축회전속도의 추정 오차가 1 % 이상인 경우에 추정된 날개 수는 51이나 49가 된다. 따라서 이러한 방법은 축회전속도 추정 정확도에 따라 성능이 크게 저하될 수가 있다. 그리고 무엇보다 쵸핑 주파수를 정확히 추정하는 것이 가장 어려운 부분이다. 스펙트럼에서 가장 큰 하모닉 성분이 1단의 쵸핑 주파수가 될 가능성이 높지만, 항상 그렇지는 않다. 가장 큰 하모닉 성분이 실제 쵸핑 주파수의 배수가 될 수도 있고, 각 단의 쵸핑 주파수들 간의 합 또는 차에 의해 만들어진 성분일 수도 있기 때문이다. 따라서 스펙트럼을 분석하여 이를 판단하는 논리적 알고리즘은 복잡하고, 보유한 측정 데이터에서 최적의 식별 성능을 내는 알고리즘을 찾는다고 하더라도 그 외의 표적 신호에 대해서 성능을 보장할 수는 없다.

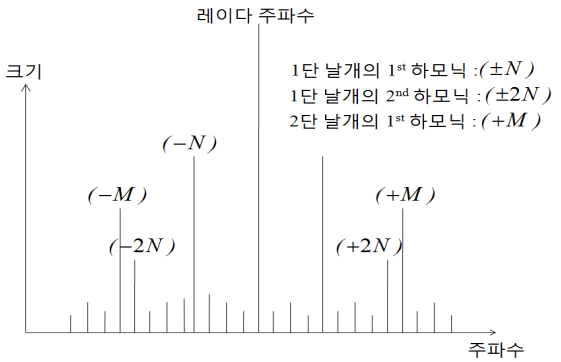

그림 3. 전형적인 JEM 스펙트럼
Fig. 3. Typical JEM spectrum.

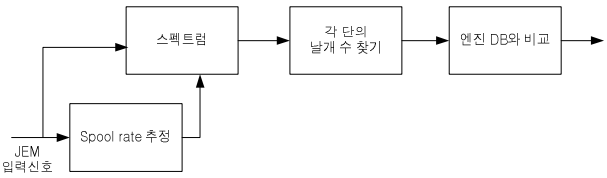

그림 4. JEM 신호를 이용한 표적 식별 방법
Fig. 4. Method of target classification using JEM signal.

지금까지 설명한 JEM 식별 기법을 그림으로 표현하면 그림 4와 같다. 스펙트럼은 입력신호를 푸리에 변환하여 얻을 수 있고, 추정된 축회전속도로 주파수 축을 나누어 날개 수의 축으로 변환한 후에 하모닉을 분석하여 각 단의 날개 수를 찾는다. 추정된 각 단의 날개 수와 엔진 DB의 날개 수를 비교하여 엔진 기종을 식별하게 된다.

Ⅲ. 제안한 JEM 표적 식별 기법

3-1 제안한 JEM 표적 식별 시스템

본 장에서는 엔진의 날개 수 정보를 이용하여 JEM 신호로부터 엔진의 기종을 식별하는 방법을 제안한다. 그림 5는 제안한 JEM 표적 식별 시스템의 전체 블록도를 나타내고 있다. 먼저 입력된 JEM 신호는 기존 방법과 동일하게 자기 상관성(autocorrelation)이나 cepstrum 방법으로 축

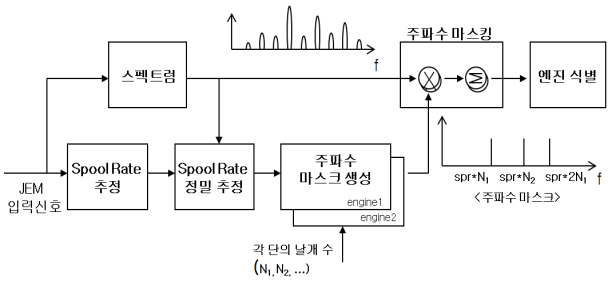

그림 5. 제안한 JEM 표적 식별 시스템
Fig. 5. Proposed target classification system for JEM signal.

회전속도를 추정한다. 여기서 추정된 축회전속도는 실제 값에 비해 약간의 오차를 가질 수 있는데, 이 오차가 주파수 마스크를 생성할 때 하모닉 주파수의 위치를 잘못 계산하여 식별 성능을 떨어드린다. 따라서 본 논문에서는 추정된 축회전속도를 기반으로 좀 더 세밀하게 재추정하는 알고리즘을 제안하며, 2-2절에서 자세히 다룰 것이다. 주파수 마스크 생성과정은 정밀 추정된 축회전속도와 엔진의 각 단의 날개 수 정보를 이용하여 해당 쵸핑 주파수의 하모닉 주파수는 통과시키고, 나머지 영역은 제거하는 주파수 마스크를 만드는 과정이다. JEM 입력신호는 푸리에 변환을 통하여 스펙트럼을 얻을 수 있고, 주파수 마스크와 마스킹 과정을 거쳐 마스킹 스코어가 출력된다. 마지막으로 마스킹 스코어 중에서 가장 큰 값을 가지는 엔진을 표적으로 판단한다.

3-2 축회전속도 정밀 추정

1차 추정된 축회전속도로부터 정밀 축회전속도를 찾는 과정은 다음과 같다. 먼저 JEM 스펙트럼에서 가장 큰 주파수 성분을 가지는 주파수(f_0)를 찾는다. 이 주파수는 1단의 쵸핑 주파수가 될 가능성이 높지만, 그 배수일 수도 있다. 여기서 중요한 점은 f_0가 어느 것에 해당되든 축회전속도의 정수배가 되기 때문에 f_0를 축회전속도로 나누면 정수 값이 된다는 점이다. 1차 추정된 축회전속도는 오차가 있는 값이므로 실제 정수배가 되지는 않지만, 다음 식과 같이 반올림을 하면 정수 값을 얻을 수가 있다.

$$N_0 = Round\left(\frac{f_0}{Spool\ rate}\right) \quad (2)$$

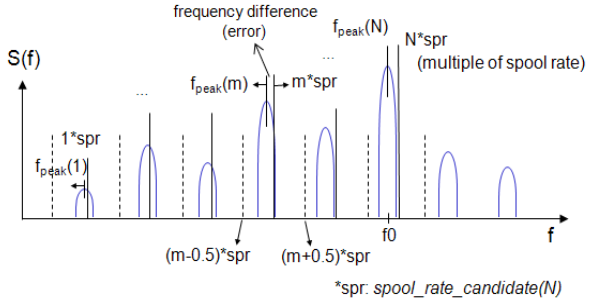

그림 6. JEM 스펙트럼에서 하모닉 주파수와 축회전속도의 정수배 주파수 간의 오차 개념
Fig. 6. Concept of frequency difference(error) between harmonic frequency and the multiple frequency of spool rate in JEM spectrum.

여기서 1차 추정된 축회전속도의 정확도에 따라 오차가 반올림 범위를 벗어날 수도 있기 때문에, 식 (2)에서 구한 정수 값이 참인지 아닌지를 신뢰할 수가 없다. 따라서 식 (2)에서 구한 N_0가 참 값인지 아닌지를 판단하고, 잘못된 값이라면 참 값을 찾는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 축회전속도의 정수배 주파수들과 스펙트럼 상의 하모닉 주파수들 간의 오차 합이 가장 적은 축회전속도를 정확한 축회전속도로 판단하는 알고리즘을 사용한다. 즉, 그림 6과 같이 주파수 축에서 축회전속도의 정수배가 되는 주파수 지점들을 설정하고, JEM 스펙트럼의 모든 주파수 성분을 가장 가까운 지점으로 할당한다. 그리고 각 축회전속도의 정수배되는 지점과 이에 속하는 주파수 성분 간에 주파수 차이(거리)를 구한다. 만약 축회전속도가 정확한 값이라면 축회전속도의 정수배 주파수들은 스펙트럼 상의 축회전속도의 각 하모닉 성분들과 일치하므로 오차가 가장 적을 것이다. 반대로 축회전속도가 참 값에서 벗어난다면 그 만큼 오차는 커질 것이다. 이 원리를 이용하여 1차 추정된 축회전속도를 기준으로 주변 값들을 검색하여 오차가 가장 작은 값을 축회전속도로 판단한다. 이 때 축회전속도와 f_0의 관계는 정수배가 되어야 하므로 정수배가 되는 지점의 축회전속도만 검색하면 계산량을 줄일 수가 있다. 즉, N_0 주변의 참 값 축회전속도 후보는 식 (3)과 같이 몇 개로 제한할 수 있다.

$$Spool\ rate_{candidate}(N) = \frac{f_0}{N}, \quad N_0 - M \le N \le N_0 + M \tag{3}$$

예를 들어 M을 2로 두면 N_0를 중심으로 앞뒤 2개씩 총 5개의 후보에 대해서만 검색을 한다.

오차 값을 구할 때 스펙트럼의 모든 주파수 성분을 사용하면 계산량이 많고 하모닉 주변의 성분들이 오히려 잡음으로 작용할 수 있다. 따라서 그림 6과 같이 스펙트럼에서 각 하모닉의 피크(peak) 주파수만을 선별하여 오차 계산에 사용한다면 연산량이나 성능에서 보다 나은 결과를 얻을 수 있다. 축회전속도의 각 정수배 주파수에 대응되는 하모닉 피크는 다음과 같이 찾는다.

$$\begin{aligned} &f_{peak}(m) = \arg\max_{f}(S(f)), \\ &(m-0.5)\times Spool\,rate_{candidate}(N) \le f, \\ &(m+0.5)\times Spool\,rate_{candidate}(N) \ge f, \\ &m = 1,\ldots,N, \end{aligned} \tag{4}$$

즉, 축회전속도의 각 정수배들 간에 경계를 나누고, 해당 구역 안에서 가장 큰 주파수 성분을 해당 영역의 하모닉 피크로 정한다. 이렇게 구한 하모닉의 피크 주파수와 축회전속도의 정수배 간의 거리를 오차로 정의하면 다음과 같다.

$$Error(N) = \sum_{m=1}^{N} \left| f_{peak}(m) - m \times Spool\,rate_{candidate}(N) \right| \tag{5}$$

여기서 구한 오차 값 중에서 가장 작은 값을 가지는 N이 참 값이 되기 때문에 정밀 축회전속도는 다음과 같이 계산된다.

$$Spool\ rate = \frac{f_0}{\arg\min_{N}(Error(N))} \tag{6}$$

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 3장에서 제안한 식별 알고리즘을 이용하여 식별 실험을 수행하고, 그 결과를 분석한다. 먼저 4-1절에서는 하나의 표적 신호에 대해서 제안한 시스템의 각 과정에서의 결과를 제시하고, 4-2절에서는 제작한 제트 엔진 모델로부터 측정한 JEM 신호를 이용하여 실험한 결과를 제시한다.

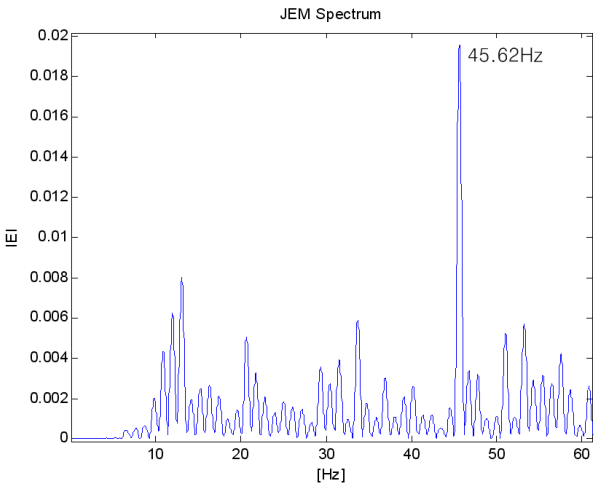

그림 7. 입력 JEM 신호의 스펙트럼
Fig. 7. The spectrum of input JEM signal.

4-1 표적 식별 과정 예

그림 7은 입력된 JEM 신호의 스펙트럼을 나타내고 있다. 가장 큰 하모닉 주파수가 45.62 Hz이고, 이 주파수는 1단의 날개 수가 42개인 엔진의 쵸핑 주파수에 해당한다. 실제 축회전속도가 1.086 Hz인 상황에서 1차 추정된 축회전속도가 1.069 Hz(약 1.57 % 오차)으로 날개 수(또는 그것의 정수배)는 45.62/1.069=42.68에서 반올림하여 43개로 추정된다. 실제 날개 수가 42임에도 축회전속도의 오차에 의해서 날개 수를 잘못 추정하고 있다. 본 논문에서 제시한 방법으로 정밀 축회전속도 과정을 수행하면 다음과 같다. 43을 기준으로 ∓2 구간 안에 있는 축회전속도 후보를 구한 후, 각 후보 축회전속도에서의 오차(식 (5))를 구하면 그림 8과 같다.

그림 8에서 N_0는 앞에서 구한 43을 의미하고, $N_0 - 1$인 42에서 오차가 가장 작은 것을 볼 수가 있다. 따라서 42가 날개 수(또는 그것의 정수배)에 해당하는 값으로 판단할 수 있다. 이때의 축회전속도는 1.0862 Hz가 되고, 실제 값 1.086과 거의 일치한다.

앞에서 구한 정밀 축회전속도와 엔진의 날개 수 정보

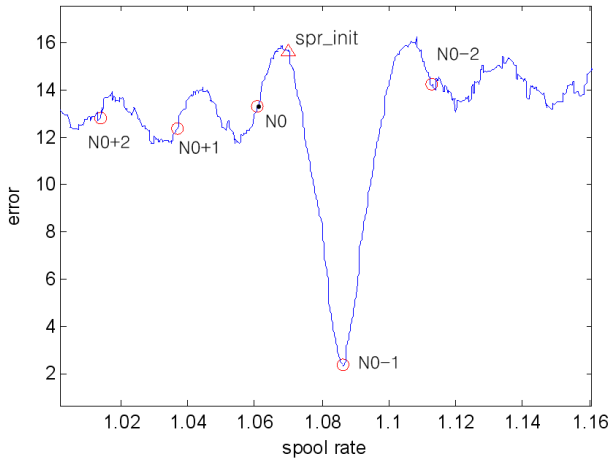

그림 8. 축회전속도에 따른 오차 그래프
Fig. 8. Error graph with respect to spool rate.

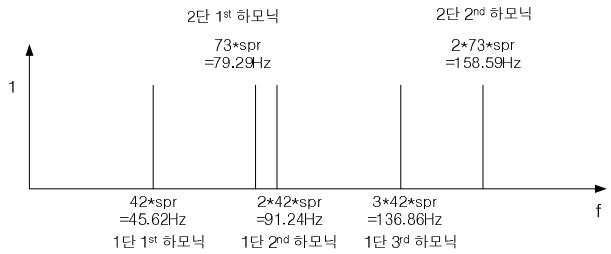

그림 9. 주파수 마스크(1단 날개 수: 42, 2단 날개 수: 73)
Fig. 9. Frequency mask(blade number of 1st stage: 42, blade number of 2nd stage: 73).

를 사용하여 각 엔진별 주파수 마스크를 구성하면 그림 9와 같다. 그림에서는 1단의 3번째 하모닉과 2단의 2번째 하모닉까지만 구성하고 있다. 사용할 단 수 및 하모닉 배수는 레이더 파형 및 엔진의 특성을 고려하여 확장하거나 축소가 가능하다. 그림에서는 하모닉의 해당 주파수에서 크기 값이 1로 설정이 되어 있지만, 각 하모닉 주파수를 중심으로 얼마간의 폭을 가지는 펄스(Π) 모양이나 단 및 하모닉 배수별로 가중치를 다르게 주는 식으로 변경이 가능하다.

주파수 마스킹 과정은 앞서 구한 주파수 마스크와 JEM 스펙트럼을 곱한 후 더하는 과정으로 주파수 마스크의 값이 1인 위치의 주파수 성분을 추출하게 된다. 측정된 JEM 스펙트럼을 해당 엔진의 주파수 마스크와 마스킹을 수행하면 주파수 마스크의 값이 1인 위치에 가장 많은 하

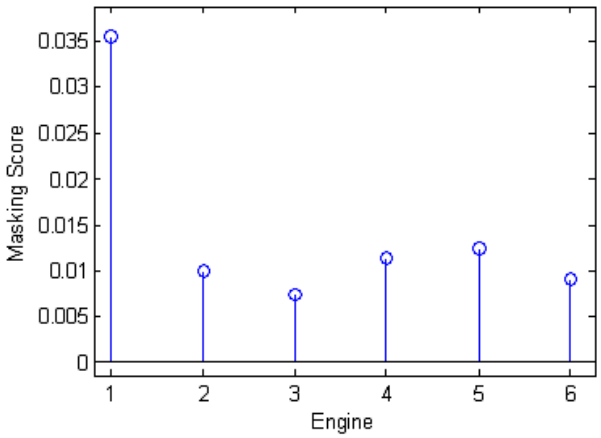

그림 10. 6개의 엔진에 대한 마스킹 스코어 결과
Fig. 10. Masking score result for the 6 jet engines.

모닉 주파수 성분이 존재하기 때문에 마스킹 스코어 값이 가장 클 것이다. 따라서 마스킹 스코어 결과 중에서 가장 큰 값을 가지는 엔진을 해당 스펙트럼의 엔진으로 식별하게 된다. 그림 10은 6개의 엔진에 대한 마스킹 스코어 값을 나타내고 있다. 그림 7의 스펙트럼은 엔진 1번의 것으로, 그림 10의 결과를 보면 엔진 1번의 마스킹 스코어가 가장 높게 나오는 것을 확인할 수 있다.

4-2 측정 데이터를 이용한 식별 실험

다양한 데이터에 대해서 성능 확인을 위하여 모형으로 제작된 2개의 제트 엔진 모델로부터 측정된 JEM 신호[8]를 이용하여 식별률 실험을 수행하였다. 측정된 데이터는 제작 모델의 회전시 날개 변형을 최소화하기 위하여 RPM (Revolution Per Minute)을 180으로 제한하였지만, 회전속도와 JEM 스펙트럼은 선형관계에 있기 때문에 실제 항공기 JEM 현상과 유사한 결과를 얻을 수 있다. A 타입 모델은 3단 날개를 가지며, 각각 42, 73, 97개의 날개 수를 가지며, B 타입은 각각 17, 29, 41개의 날개 수를 가진다. 실험에 사용된 측정 데이터는 다양한 주파수와 각도로 측정되었으며, 그 측정 정보는 표 1과 같다.

주파수 마스크를 생성하기 위한 엔진 날개 수 DB는 A, B 타입 모델을 포함하여 6개의 엔진 모델을 사용하였으며, 주파수 마스크 구성 시 2단 날개까지만 고려하였다. 식별 알고리즘 비교를 위하여 다음의 3가지 경우에 대해

표 1. 측정 데이터 정보
Table 1. Information of the measured data.

DB	주파수 (Hz)	Pol.	측정 각도 (degree)	RPM	PRF (Hz)
A_10_15G	10 G, 15 G	HH	0~60	60, 140, 180	900, 1,800, 3,600
A_08_16G	8 G~16 G	HH	0~60	60	1,800
B_10_15G	10 G, 15 G	HH	0~60	60, 180	450, 900, 1,800
B_08_16G	8G~16G	HH	0~60	60	1,800

표 2. 식별률 비교
Table 2. Comparison of classification rate.

DB	날개 수 비교	스펙트럼 마스킹 A	스펙트럼 마스킹 B
A_10_15G	77.4	29.7	86.7
A_08_16G	77.8	72.0	91.3
B_10_15G	47.3	83.9	76.3
B_08_16G	48.2	94.3	94.2
평균	62.68	69.97	87.13

서 실험을 수행하였다.

1) 날개 수 비교: 스펙트럼에서 날개 수를 추정하여 표적을 식별하는 방법
2) 스펙트럼 마스킹 A: 제안한 스펙트럼 마스킹 기법을 사용하나, 정밀 축회전속도 추정을 하지 않는 경우
3) 스펙트럼 마스킹 B: 제안한 스펙트럼 마스킹 기법과 정밀 축회전속도 추정을 사용하는 경우

표 2는 앞에서 설명한 데이터와 구분 기법을 적용하여 표적 식별 실험을 수행한 결과이다. 제안한 스펙트럼 마스킹 기법(B)이 날개 수 비교 방법보다 전체적으로 나은 성능을 보이고 있다. 스펙트럼 마스킹 기법(A)의 경우에 A_10_15G 데이터에서 성능이 많이 떨어지는데, 이것은 A 타입 모델은 날개 수가 B 타입보다 많아서 주파수 마스크를 만들 때 축회전속도의 오차가 크게 영향을 주기 때문으로 분석된다. 즉, 주파수 마스크를 생성할 때 날개 수가 클수록 축회전속도의 하모닉 주파수 계산에서 오차가 누적이 되어, 실제 하모닉 주파수에서 벗어날 가능성이 높아지기 때문이다. 따라서 정밀 축회전속도 추정 기법을 적용한 스펙트럼 마스킹 기법(B)에서는 성능이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있다.

실험에서 사용된 날개 수 비교 방법은 참고문헌 [2]에 기반하여 구현된 방법으로, 스펙트럼에서 쵸핑 주파수를 찾는 논리 알고리즘의 성능에 따라 날개 수 추정 정확도가 달라지므로, 향후 알고리즘 개선을 통해 보다 나은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 제안한 알고리즘은 날개 수 추정을 위한 최적화된 논리적 알고리즘 없이도 표적을 쉽게 식별할 수 있다는 장점을 가진다. 실험에 사용된 데이터는 관측각도 0도를 포함한 것으로 JEM 신호가 정면에서 식별이 힘들다는 점을 감안한다면 제안한 기법은 우수한 식별 성능을 보인다고 할 수 있다. 본 실험은 2개의 제한된 표적과 잡음이 적은 안정적 환경에서의 결과로 향후 좀 더 다양한 표적과 잡음 환경에서의 성능 비교가 필요할 것으로 보인다.

Ⅴ. 결 론

제트 엔진의 각 단의 날개 수로부터 계산된 하모닉 주파수 마스크를 이용하여 얻은 마스킹 스코어를 비교함으로써 엔진의 기종을 식별할 수 있음을 확인하였다. 2종의 표적에 대한 실험 결과, 날개 수를 추정하여 식별하는 방법보다 나은 성능을 보였다. 또한, JEM 스펙트럼 분석 기법에서 정밀 축회전속도를 찾는 방법을 제시함으로써 날개 수 추정이나 하모닉 주파수의 위치 계산에서 오류를 줄일 수 있었다. 향후 좀 더 다양한 표적과 잡음 환경에서의 성능 비교가 필요할 것으로 보인다.

References

[1] Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, *3rd Edition*, *McGraw-Hill*, 2001.

[2] Peter Tait, *Introduction to Radar Target Recognition*, IEE, 2005.

[3] J. Chadwick, G. L. Williams, "Air target identification-Concept to reality", *Radar Systems*, *2007 IET International Conference* on, pp. 1-5, 2007.

[4] Mark R. Bell, Robert A. Grubbs, "JEM modeling and measurement for radar target identification", *IEEE Transcations on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 73-87, 1993.
[5] J. Martin, B. Mulgrew, "Analysis of the theoretical radar retrun signal from aircraft propeller blades", *IEEE International Radar Conference*, pp. 569-572, 1990.
[6] J. Martin, B. Mulgrew, "Analysis of the effect of blade pitch on the retrun signal from rotating aircraft blades", *IEE Radar 92 International Conference*, Brighton, UK, pp. 446-449, 1992.
[7] Chuangming Tone, et al., "Studies of modulation mechanism of jet engine modulation effect", *IEEE Microwave Conference Proceedings*, *APMC 2005 Proceedings*, vol. 3, 2005.
[8] H. Lim, J. H. Yoo, C. H. Kim, K. I. Kwon, and N. H. Myung, "Radar cross section measurements of a realistic jet engine structure with rotating parts", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 25, Issue 7, pp. 999-1008, 2011.

김 시 호

1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2001년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2006년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
2011년 1월～현재: 국방과학연구소 연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 표적 인식

김 찬 홍

1991년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1993년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학석사)
2008년 8월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학박사)
1993년 3월～현재: 국방과학연구소 연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템, 위상배열 안테나, 레이더 표적 인식

채 대 영

2006년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
2008년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2008년 2월～현재: 국방과학연구소 연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 표적 인식