

# MUSIC 알고리즘을 이용한 JEM 신호의 Chopping 주파수 추출

## Chopping Frequency Extraction of JEM Signal Using MUSIC Algorithm

송원영 · 김형주 · 김성태\* · 신인선\* · 명로훈

Won-Young Song · Hyung-Ju Kim · Sung-Tai Kim\* · In-Seon Shin\* · Noh-Hoon Myung

### 요 약

제트 엔진 변조(jet engine modulation: JEM) 신호는 제트 엔진 고유 정보인 날개 수를 제공하기 때문에 HRRP(High-Range Resolution Profile), ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)와 함께 표적 인식 분야에서 널리 이용된다. 제트 엔진의 날개 수를 얻기 위해서는 날개 수에 비례하는 chopping 주파수를 추출하는 것이 중요하다. 기존의 chopping 주파수 추출 방법은 초기 문턱값(threshold)을 정의하고, 이를 줄여가며, chopping peak를 탐지하는 방법을 사용한다. 하지만 이러한 탐지 방법은 반복적 찾음에 따라 신호에 따라 시간이 많이 소요되는 단점을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 MUSIC(MUltiple Signal Classification) 알고리즘을 이용하여 chopping 주파수를 추출하는 것을 제안한다. 주어진 JEM 신호에 MUSIC 알고리즘을 적용하여 chopping 주파수를 찾아 날개 수 후보군을 정하고, 후보군들의 점수를 위한 다른 chopping 주파수 추출에도 MUSIC 알고리즘을 적용하도록 한다. 반복적으로 찾는 기존의 탐지 알고리즘과 달리, 한번에 찾아내기 때문에 정확한 chopping 주파수를 찾을 뿐만 아니라, 계산 시간도 줄일 수 있음을 입증하였다.

### Abstract

Jet engine modulation(JEM) signals are widely used in the field of target recognition along with high-range resolution profile and inverse synthetic aperture radar because they provide specific information of the jet engine. To obtain the number of blades of the jet engine, the chopping frequency proportional to the number of blades must be extracted. In the conventional chopping frequency extraction method, an initial threshold value is defined and a method of detecting the chopping peak is used. However, this detection method takes time depending on the signal due to repetitive detection. Thus, in this study, we proposed to extract the chopping frequency using Multiple Signal Classification(MUSIC) algorithm. We applied the MUSIC algorithm to a given JEM signal to find the chopping frequency and determine the blade number candidates. We also applied the MUSIC algorithm to other chopping frequency extractions to determine the score of the candidate groups. Unlike the conventional detection algorithm, which requires repetitive frequency detection, MUSIC algorithm quickly detects the accurate chopping frequency and reduces the calculation time.

Key words: Multiple Signal Classification, Chopping Frequency Extraction, Jet Engine Modulation, Radar Target Recognition.

## I. 서 론

제트 엔진 변조(jet engine modulation: JEM) 신호는 레

「이 논문은 2018년도 한화시스템(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.」

한국과학기술원 전기 및 전자공학부(School of Electrical Engineering, KAIST)

\*한화시스템(Hanwha Systems Co., Ltd.)

· Manuscript received January 24, 2019 ; Revised February 22, 2019 ; Accepted March 8, 2019. (ID No. 20190124-011)

· Corresponding Author: Won-Young Song (e-mail: songwonyoung@kaist.ac.kr)

이다에서 송신된 신호가 제트 엔진 날개의 회전에 의해서 변조되는 신호이다. JEM 신호는 제트 엔진의 날개 수, 날개 길이 등 엔진 고유의 정보를 제공하기 때문에, 비협조 표적인식(non-cooperative target recognition: NCTR) 분야에서 HRRP(High-Range Resolution Profile), ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)와 함께 널리 쓰이고 있다<sup>[1]</sup>.

제트 엔진의 고유한 정보 중 제트 엔진의 날개 수는 엔진 판별에 유용하게 쓰이며, 날개 수를 추정함으로써, 해당 엔진의 종류뿐만 아니라, 더 나아가 해당 표적까지도 판별할 수 있다. 이러한 날개 수를 추출하기 위해서 많은 연구가 이루어졌으며<sup>[2]~[8]</sup>, 다음과 같은 과정을 거치게 된다. 우선 제트 엔진의 날개 회전 속도인 *spool rate*를 추출하게 된다. 여기서 *spool rate*는 날개가 1초에 회전하는 수를 말하며, RPS(Revolutions For Second)와 동일하다. 이 *spool rate*는 표적의 이동 속도에 따라 변하기 때문에 엔진을 판별할 수는 없다. 하지만 날개 수를 추정하기 위해서는 이 *spool rate* 값이 필요하므로 우선적으로 추출하게 된다.

*Spool rate*를 추출하고 나면 다음으로 날개 수를 추출하게 된다. 기존 날개 수 추출 알고리즘<sup>[7]</sup>은 날개 수 영역의 JEM 신호에서 *peak* 탐지를 통해 후보군을 정하고 각 후보군에 점수를 산정하여 최종 날개 수를 판별하게 된다. 여기서 *peak*들은 *chopping* 주파수에 해당하는 *peak*들이며, 그림 1에 표시된 주파수들이 *chopping* 주파수들이다. *Chopping* 주파수는 회전하는 터빈의 날개들에 의해 변조

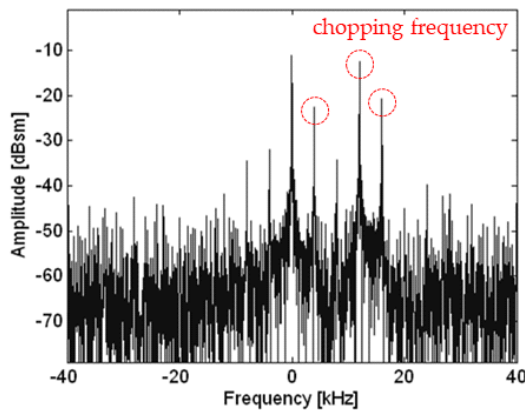


그림 1. JEM 신호의 스펙트럼  
Fig. 1. Spectrum of JEM signal.

된 신호의 주파수를 의미하며, 날개 수에 비례한 값을 가지게 된다. 따라서, 제트 엔진의 날개 수 추출을 위해서는 *chopping* 주파수 추출이 중요하다.

기존의 날개 수 추출 알고리즘에서는 문턱값(threshold)을 정의하고, 이 문턱값을 반복적으로 줄여가며 날개 수 영역에서 *chopping* 날개 수를 추출한다. 각 단마다 이와 같은 반복적인 과정을 수행하여야 하기 때문에 시간적으로 오래 걸리는 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 이를 해결하기 위하여 MUSIC 알고리즘 도입을 제안한다. MUSIC 알고리즘은 방향탐지, 산란점 추출 등의 여러 분야에서 널리 사용되는 알고리즘으로 해상도가 뛰어나며, 잡음에 대해서도 강한 장점을 가지고 있다. MUSIC 알고리즘은 신호의 극점을 구하는 방법을 이용하여 한번에 추출하기 때문에 반복적으로 추출하는 단점을 보완할 수 있다. 또한, 각 단마다 각각 추출하는 방법 대신 MUSIC 알고리즘을 이용하여 모든 *chopping* 날개 수, 즉 *chopping* 주파수를 찾으면 기존 알고리즘에 비해 계산 시간을 줄일 수 있다.

## II. Chopping 주파수 추출 알고리즘

### 2-1 기존 날개 수 추출 알고리즘

기존 날개 수 추출 알고리즘<sup>[7]</sup>의 흐름도는 그림 2와 같으며, 이는 특정 날개 단의 날개 수를 구하는 흐름도이고, 다음 날개 단에서는 이와 같은 과정을 반복하게 된다.

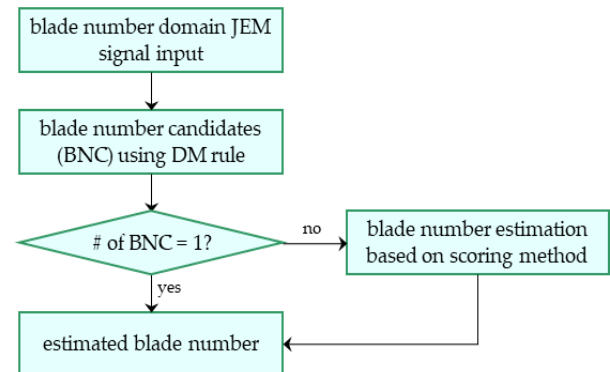


그림 2. 기존 날개 개수 추출 알고리즘의 간략 흐름도  
Fig. 2. Simple flowchart of the conventional blade number extraction algorithm.

기존 날개 수 추출 알고리즘은 JEM 신호를 날개 수 영역의 신호로 바꾸고 나서 수행된다. 날개 수 영역의 JEM 신호에서 크기가 큰 순서대로 20개의 날개 수들을 선택한 후, 선택한 20개의 날개 수들을 DM(divisor-multiplier) rule을 적용하여 날개 수 후보군(blade number candidates: BNC)을 결정한다. 여기서 DM rule은 최대 크기의 날개 수를 기준으로 이 날개 수의 하모닉 날개 수 또는 이 날개 수를 하모닉 성분들로 하는 날개 수들이 처음 선택한 20개의 날개 수들에 존재하는지를 판단하는 것을 말한다. DM rule에 해당하는 모든 날개 수들을 날개 수 후보군으로 정하게 된다. 이 후, 각각의 후보에 점수를 산정하여 가장 높은 점수를 획득한 날개 수 후보를 해당 날개 단의 최종 날개 수로 결정한다.

## 2-2 기존 Peak 탐지 알고리즘

기존 날개 수 추출 알고리즘에서 날개 수 후보군에 점수를 산정하는 방법은 하모닉 성분들의 존재 유무를 이용하게 된다. 날개 수 영역의 JEM 신호에서 하모닉 성분들을 찾고, 이 값들과 각 후보들을 비교함으로써 점수를 산정한다. 이때, 하모닉 성분들을 찾을 때 peak 탐지 알고리즘을 사용하게 되며, 이 알고리즘의 흐름도는 그림 3과 같다.

날개 수 영역의 JEM 신호를 입력받으면 peak 탐지를 위한 초기 문턱값을 정의한다. 한 샘플의 크기와 인접한

샘플의 크기 차이가 이 문턱값보다 크게 되면 peak로 인정한다.

초기 문턱값은 JEM 신호의 최대값과 최소값의 차이로 정의한다. 하지만 초기 문턱값 조건에 맞는 peak들은 존재할 수가 없다. 그러므로 반복적으로 문턱값을 줄여가며, 사용자가 정의한 최대 peak 개수(15개)를 만족할 때까지 반복적으로 peak를 탐지해 간다.

이러한 반복적인 peak 탐지 과정이 각 단의 날개 수를 추출할 때마다 이루어지므로, 기존 peak 탐지 알고리즘은 신호에 따라 많은 시간을 필요로 한다.

## 2-3 MUSIC 알고리즘을 이용한 Chopping 주파수 추출 및 수정된 날개 수 추출 알고리즘

기존 peak 탐지 알고리즘의 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 fast root-MUSIC 알고리즘을 도입한다. MUSIC 알고리즘은 레이다 산란파 신호의 방향 벡터가 잡음 공간의 고유벡터와 서로 수직하다는 원리를 이용한 것이다<sup>[9,10]</sup>. 따라서 MUSIC 알고리즘은 신호공간과 잡음공간을 분리함으로써 신호에 대한 극점(poles)을 추출하기 때문에 잡음에 의한 영향을 최소화 할 수 있다<sup>[11]</sup>.

MUSIC 알고리즘은 해상도가 높기 때문에 산란 데이터에 대한 신호처리를 하는데 있어서 MUSIC 기법을 기초로 하여 변형된 알고리즘이 많이 개발되고 있다. 이러한 MUSIC의 변형 알고리즘 기법 중에서 MUSIC의 스펙트럼을 구하지 않고 신호의 공간과 잡음의 공간이 수직하다는 조건을 이용하여 다항식을 만들고, 그 다항식을 해결함으로써 신호의 극점을 구하는 기법이 fast root-MUSIC 기법이다.

MUSIC 알고리즘은 기존 peak 탐지 알고리즘과 달리 날개 수 영역의 JEM 신호가 아닌 시간 영역 JEM 신호에 적용하여 chopping 주파수들을 찾게 된다. 이러한 chopping 주파수는 날개 수와 비례 관계에 있으며, 그 관계식은 다음 식과 같다.

$$f_{chopping} = (\text{날개 수}) \times f_{spool} \quad (1)$$

식 (1)에서  $f_{chopping}$ 는 chopping 주파수,  $f_{spool}$ 는 spool rate를 의미한다. 따라서, chopping 주파수를 추출하면 제트 엔진의 날개 수를 추출할 수 있다. 기존 peak 탐지 알

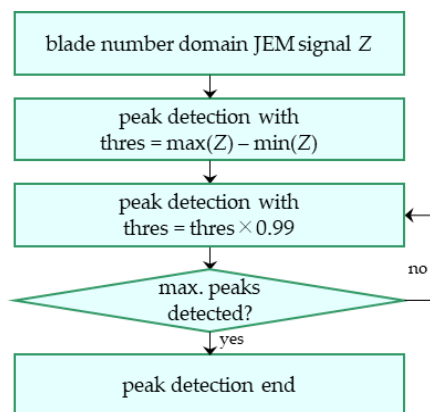


그림 3. 기존 peak 탐지 알고리즘 간략 흐름도

Fig. 3. Simple flowchart of the conventional peak detection algorithm.

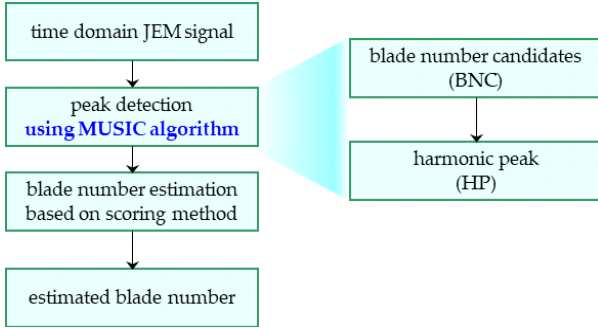


그림 4. MUSIC 알고리즘을 이용하는 수정된 날개 개수 추출 알고리즘

Fig. 4. Flowchart of the modified blade number extraction algorithm with MUSIC algorithm.

고리즘 대신 MUSIC 알고리즘을 도입하여 날개 수를 추출하는 알고리즘의 흐름도는 그림 4와 같다.

새로운 날개 수 추출 알고리즘은 첫 번째로 MUSIC 알고리즘을 시간 영역 JEM 신호에 적용한다. MUSIC 알고리즘은 신호의 상호분산행렬의 고유값(eigenvalue)을 이용하여 peak들을 찾는 알고리즘이다. 따라서, 신호의 상호분산행렬을 구하는 것이 중요하며, 이는 선처리 과정인 MSSP(modified spatial smoothing preprocessing)을 적용하여 구하게 된다. MSSP 방법을 통해 구한 상호분산행렬은 다음 식과 같다.

$$\mathbf{R} = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K (\mathbf{R}_k + \mathbf{J} \mathbf{R}_k^* \mathbf{J}) \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{R}$ 은 상호분산행렬,  $\mathbf{R}_k = \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H$ 이다. 또한,  $\mathbf{x}_k = [x_k \ x_{k+1} \ \dots \ x_{N-M+k+1}]^T$ 이며, 이는 신호의 subarray를 의미한다.  $K$ 는 subarray의 개수,  $N$ 은 신호의 길이,  $M$ 은 subarray의 길이,  $T$ 는 행렬의 transpose,  $H$ 는 complex conjugate transpose,  $*$ 는 complex conjugate를 말한다. 또한,  $\mathbf{J}$ 는 교환행렬을 의미하며 다음 식과 같다.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (2)를 보면, 상호분산행렬을 구하기 위해서는 신호의 subarray의 선정도 중요하다. Subarray의 길이에 따라서

정확도와 소요 시간 사이에 trade-off가 존재한다. 본 논문에서는 subarray의 길이를 신호 길이의 1/3로 정하였다.

제안하는 알고리즘은 두 번의 MUSIC 알고리즘이 수행되는데, 첫 번째는 날개 수 후보군을 결정하기 위함이고, 두 번째는 각 후보들의 점수를 산정할 때 필요로 하는 하모닉 peak들을 탐지하기 위함이다. 기존의 날개 수 추출 알고리즘과 달리 제안하는 알고리즘에서는 각 날개단에서 사용될 후보군들과 하모닉 peak들을 두 번의 MUSIC 알고리즘을 통해 모두 찾게 된다. 날개 수 후보군과 하모닉 peak들을 모두 추출하게 되면 기존 날개 수 추출 알고리즘과 동일하게 각 후보에 대한 점수를 산정하여 각 단의 날개 수를 추출하게 된다.

이전 절에서 설명한 것과 같이, MUSIC 알고리즘을 이용하여 반복적인 peak 탐지 과정을 대체하였기 때문에 날개 수 추출에 걸리는 시간을 줄일 수 있다.

### III. 실험 결과

실제 제작한 제트 엔진으로부터 획득한 JEM 신호를 이용하여 기존의 peak 탐지 알고리즘과 제안하는 MUSIC 기반의 peak 탐지 알고리즘을 비교, 검증하도록 한다. 또한, JEM 신호에 잡음을 넣어 SNR(signal to noise ratio)에 따른 성능을 검증한다. 제작한 제트 엔진은 그림 5와 같다.

표 1에서 보인 것과 같이 두 가지 제트 엔진 모델에 대하여 신호를 획득하였다. 두 가지 신호에서 큰 차이는 표에서 보는 것과 같이 각 모델의 날개 수, RPM(Revolutions Per Minute), 입사 각도이다. 앞서 식 (1)에서 설명하였듯이 chopping 주파수와 관련된 파라미터는 날개 수와 RPM

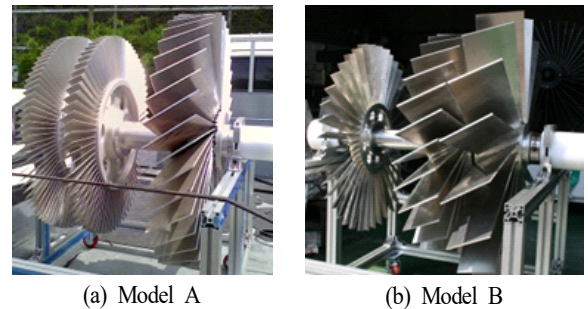


그림 5. 제작된 제트 엔진 모델  
Fig. 5. Fabricated jet engine model.

표 1. 제트 엔진 모델 및 측정 파라미터 정보

Table 1. Information on the jet engine model and measurement parameters.

| Parameters                       | Value      |            |
|----------------------------------|------------|------------|
| Engine model                     | A          | B          |
| Number of rotor stages           | 3          | 3          |
| Number of blades in each stage   | 42, 73, 97 | 17, 29, 41 |
| Radar carrier frequency          | 8 GHz      | 8 GHz      |
| Pulse repetition frequency (PRF) | 1.8 kHz    | 1.8 kHz    |
| Rotation speeds                  | 60.1       | 60.2       |
| Radar incident angle             | 60°        | 50°        |

이다. 이론적으로 제트 엔진의 1단 날개에 의한 chopping 주파수는 각각  $42 \times 60.1 / 60 = 42.07$  [Hz],  $17 \times 60.2 / 60 = 17.06$  [Hz]가 나오게 되며, 그 크기는 다른 chopping 주파수들보다 크게 나오게 된다. 하지만 실제로 각 단계에 의한 하모닉(harmonic) 성분들이 존재하므로 크기가 가장 큰 peak가 1단에 의한 chopping 주파수가 되지는 않는다.

표 2는 이론적인 1단 날개에 의한 chopping 주파수와 MUSIC 알고리즘을 통해 획득한 chopping 주파수 중 크기가 가장 큰 주파수를 나타낸 표이다. 이론값이 두 개인 이유는 측정 시에 제트 엔진의 모터 설정 회전 속도와 실제 회전속도 간의 차이로 JEM 신호가 설정 회전 속도가 아닌 실제 회전속도에 따라 측정되었기 때문이다. 따라서, 날개 수 추출 이전에 추출한 spool rate를 적용한 이론값과 MUSIC 알고리즘을 비교하면 모델 A의 경우 정확하게 찾아내는 것을 알 수 있다. 하지만 모델 B의 경우에는 약 2배의 주파수가 추출되는 것을 알 수 있다. 이는 모델 B

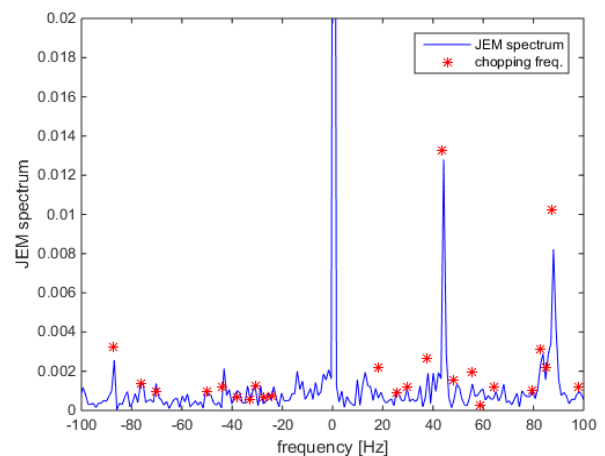
표 2. 크기가 가장 큰 chopping 주파수 추출 결과

Table 2. Result of chopping frequency extraction with maximum amplitude.

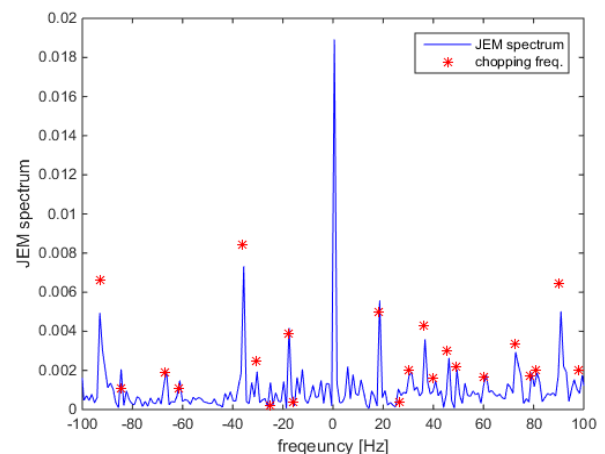
| Model | Extracted chopping frequency [Hz]       |   |        |
|-------|---|---|--------|
|       | Theoretical<br>(Setting rotation speed) | Theoretical<br>(Using the extracted $f_{spool}$ ) | MUSIC  |
| A     | 42.07                                   | 43.65   | 43.69  |
| B     | 17.06                                   | 18.07   | -36.11 |

의 경우에는 1단 날개의 2<sup>nd</sup> 하모닉 성분이 1<sup>st</sup> 성분보다 더 크기 때문에 나타나는 현상으로 그림 6(b)를 보면 알 수 있다.

그림 6은 MUSIC 알고리즘을 이용하여 날개 수 후보군 결정을 위한 chopping 주파수를 찾은 결과이다. 그림 6에서 보는 것과 같이 MUSIC 알고리즘을 사용할 시에 정확한 위치에서 peak들을 탐지하는 것을 알 수 있다. 앞서 표 2에서 추출된 주파수가 달랐던 모델 B의 경우에도 최대 크기의 주파수의 반절에 해당하는 주파수(-17.96 Hz)에



(a) Model A



(b) Model B

그림 6. MUSIC 알고리즘을 이용한 chopping 주파수 추출 결과

Fig. 6. Chopping frequency extraction result using MUSIC algorithm.



표 3. 날개 수 추출 결과

Table 3. Spool rate extraction result.

| Model | Extracted blade number |            |
|-------|------------------------|------------|
|       | Previous algorithm     | MUSIC      |
| A     | 42, 40, 83             | 42, 80, 36 |
| B     | 17, 43, 63             | 17, 29, 43 |

표 4. Chopping 주파수/날개 수 추출 계산 시간

Table 4. Processing time for chopping frequency extraction.

| Model | Processing time [sec]   |       |
|-------|-------------------------|-------|
|       | Previous peak detection | MUSIC |
| A     | 0.97                    | 0.21  |
| B     | 1.08                    | 0.21  |

서도 추출이 된 것을 알 수 있다. DM rule을 적용하여 후보군을 산정할 때, 해당 주파수도 선택이 되므로 날개 수 추출 알고리즘 적용 시에 정확한 날개 수를 찾을 수 있다.

표 3은 기존의 날개 수 추출 알고리즘과 수정된 추출 알고리즘을 통해 획득한 날개 수 결과이다. 기존의 방법과 수정된 추출 알고리즘 모두 1단 날개의 날개 수를 정확히 찾아내었고, 추가로 모델 B의 경우 수정된 알고리즘은 2단 날개 수까지 정확하게 찾음을 알 수 있다. 또한 표 4를 보면 날개 수 추출 알고리즘에서 peak 탐지 과정에 소요된 시간이 약 1/5배로 줄어든 것을 알 수 있다. 따라서, 기존 날개 수 추출 알고리즘의 peak 탐지 알고리즘 대신 MUSIC 알고리즘을 사용하면 정확성은 유지하면서 소요 시간은 줄일 수 있다.

SNR에 따른 제안하는 알고리즘의 성능 변화를 보기 위해 실제 제작한 제트 엔진으로부터 획득한 JEM 신호에 잡음을 추가하여 알고리즘을 수행하였다. 표적 B에 대해 SNR을 0, 5, 10, 15, 20, 25, 100으로 하여 총 7개의 경우에 대해 실험하고, 각 SNR에 대해 1,000번의 수행을 하여 날개 수 추출의 정확도를 구하였다. 정확도를 나타내는 결과는 그림 7과 같다. SNR=10 dB 이상에서는 90 % 이상의 정확도를 보였고, SNR=5 dB에서 85.1 %, 0 dB에서 66.9 %의 정확도를 보였다. 따라서, 제안하는 알고리즘이 잡음에 대해서 강하다는 것을 알 수 있다.

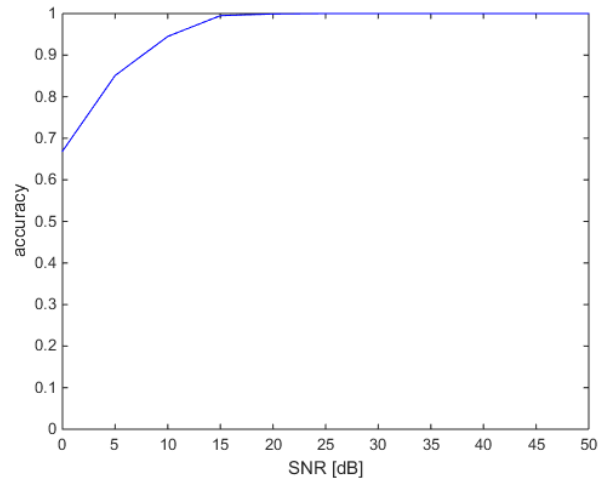


그림 7. SNR에 따른 정확도 비교

Fig. 7. Accuracy comparison according to SNR.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 JEM 신호에서 chopping 주파수를 추출하는 알고리즘을 제시하였다. 기존의 날개 수 추정 알고리즘에서 chopping 주파수 추출하는 과정을 MUSIC 알고리즘으로 대체함으로써, 정확도는 유지하면서 날개 수 추출 소요 시간을 줄일 수 있다. 이는 실제 측정하여 획득한 JEM 신호에 적용하여 확인하였다. MUSIC 알고리즘을 통해 획득한 chopping 주파수와 이론적인 chopping 주파수를 비교함으로써, 정확도를 확인하였다. 각 알고리즘의 peak 탐지에 소요된 시간을 비교하여 기존의 peak 탐지 알고리즘에 비해 빠르다는 것을 확인하였다. 마지막으로 SNR에 따른 제안하는 알고리즘의 정확도를 분석하였다. 따라서, MUSIC 알고리즘은 기존 날개 수 추출 알고리즘에서 peak 탐지 부분을 대체할 수 있고, 나아가 수정된 날개 수 추출 알고리즘은 인식 시간이 중요한 비협조 표적 인식 분야에서 유용하게 쓰일 수 있다.

#### References

- [1] P. Tait, *Introduction to Radar Target Recognition, Sonar and Navigation Series 18*, London, IET Radar, 2005.
- [2] M. R. Bell, R. A. Grubbs, "JEM modeling and measurement for radar target identification," *IEEE Transactions*

on *Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 73-87, Jan. 1993.

- [3] S. Cuomo, P. F. Pellegrini, and E. Piazza, "Model validation for 'jet engine modulation' phenomenon," *Electronics Letters*, vol. 30, no. 24, pp. 2073-2074, Nov. 1994.
- [4] H. Lim, J. H. Yoo, C. H. Kim, K. I. Kwon, and N. H. Myung, "Radar cross section measurement of a realistic jet engine structure with rotating parts," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 25, no. 7, pp. 999-1008, 2011.
- [5] J. H. Park, H. Lim, and N. H. Myung, "Analysis of jet engine modulation effect with extended Hilbert-Huang transform," *IET Electronics Letters*, vol. 49, no. 3, pp. 215-216, 2013.
- [6] J. H. Park, W. Y. Yang, J. W. Bae, S. C. Kang, C. H. Kim, and N. H. Myung, "Extraction of jet engine modulation component weakly present in measured signals for enhanced radar target recognition," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 28, no. 8, pp.

963-975, 2014.

- [7] W. Y. Yang, J. H. Park, J. W. Bae, N. H. Myung, and C. H. Kim, "Automatic algorithm for estimating the jet engine blade number from the radar target signature of aircraft targets," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 90, no. 7, pp. 18-29, Jul. 2015.
- [8] W. Y. Yang, J. H. Park, W. Y. Song, and N. H. Myung, "Robust and fast algorithm for estimating fundamental periodicity of jet engine modulation signals," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 10, no. 7, pp. 1286-1294, 2016.
- [9] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [10] B. D. Rao, K. S. Hari, "Performance analysis of root-MUSIC," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 37, no. 12, pp. 1939-1949, Dec. 1989.
- [11] Q. S. Ren, A. J. Willis, "Fast root-MUSIC algorithm," *Electronics Letters*, vol. 33, no. 6, pp. 450-451, Mar. 1997.

# 송 원 영 [한국과학기술원/석·박사 통합과정]



2008년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학사)  
 2008년 9월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석·박사 통합과정  
 [주 관심분야] 전자파 산란 및 영상, 레이더 신호처리

# 김 성 태 [한화시스템/수석연구원]



1996년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)  
 1998년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2002년 8월~현재: 한화시스템(주) 레이더·PGM 연구소 연구원  
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템

# 김 형 주 [한국전자통신연구원/선임연구원]



2010년 2월: 경북대학교 전기 및 전자공학과 (공학사)  
 2012년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학석사)  
 2018년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학박사)  
 2018년 12월~현재: 한국전자통신연구원

선임연구원

[주 관심분야] 전자파 산란 및 영상, 레이더 신호처리

# 신 인 선 [한화시스템/연구원]



2014년 8월: 한국해양대학교 제어자동화공학과 (공학사)  
 2016년 8월: 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학석사)  
 2016년 7월~현재: 한화시스템 항공레이더팀  
 [주 관심분야] NCTR, Avionics Interface, System Engineering

명 로 훈 [한국과학기술원/명예교수]



1976년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1982년 12월: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학석사)

1986년 8월: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학박사)

2006년 1월~2006년 12월: 한국전자과학

회 학회장

2004년 3월~2009년 12월: 전파탐지 특화연구센터 소장

2008년 1월~2011년 12월: 인공위성 연구센터 소장

1986년 9월~2019년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 교수

2019년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 명예교수

[주 관심분야] 전파 예측 모델, 마이크로웨이브 공학, 안테나 및 레이더 공학, 이동 및 위성통신, EMI/EMC/EMS 등 레이더 공학, 이동 및 위성통신, EMI/EMC/EMS 등