

DBF 차량용 레이더를 위한 다중 표적의 정확한 각도 추정 연구

A Study on Accurate Angle Estimation of Multiple Targets for Digital Beam Forming Automotive Radar

이 성 현 · 최 인 오 · 김 경 태

Seong-Hyeon Lee · In-Oh Choi · Kyung-Tae Kim

요 약

차량용 레이더(automotive radar)는 크기, 무게, 비용 등의 문제로 적은 수의 수신 채널을 가진 안테나를 사용한다. 이 때, 스펙트럼 추정 기법 중 하나인 relaxation(RELAX) 기법을 이용하면, 표적의 방위각뿐만 아니라, 빔 내에 존재하는 표적의 개수 추정 또한, 가능하다. 하지만, 차량용 레이더의 적은 수신 채널 개수로 인하여, 정밀하지 않은 각도 영역에서의 스펙트럼 추정이 이루어지며, 이는 부정확한 방위각 추정 성능을 야기한다. 이를 개선하기 위해 본 논문에서는 minimum length description(MDL) 기준을 통한 표적 개수의 추정과 결부한 root-multiple signal classification(root-MUSIC) 기법을 이용하여 표적의 정확한 방위각을 추정하도록 제안한다. 시뮬레이션에서는 세 점 표적들이 안테나 빔 내에 존재할 때, 제안한 방법이 더 나은 방위각 추정 결과를 도출할 수 있음을 보인다.

Abstract

In order to satisfy several conditions with respect to size, weight, and costs, automotive radars use an antenna consisting of a small number of receiving channels. If RELAX technique is applied to the automotive radars, angles of targets located in antenna beam can be estimated as well as the number of the targets. However, a small number of receiving channels in the antenna leads to inaccurate spectral estimation in angle domain, which in turn degrades performance of RELAX technique. Therefore, in this study, root-MUSIC technique coupled with MDL criterion is introduced to decide accurate angles of targets in antenna beam. In simulations, we show superior performance of proposed scheme using simulation results when three point targets are located in antenna beam.

Key words: Angle Estimation, Spectral Estimation, Automotive Radar

I. 서 론

오늘날, 차량용 레이더 센서는 주야에 관계없이 도로 상황의 탐지 및 인식이 가능함으로 인하여 미래 자동차 산업에 있어서 중요한 핵심 센서 모듈로 자리잡고 있다^[1]. 이러한 차량용 레이더를 이용해 주변 도로 상황을 탐지 하려면 기본적으로 안테나 빔 내에 존재하는 모든 표적

들에 대해 상대적인 거리 및 속도, 방위각을 측정할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 그 중 빔 내에 존재하는 다중 표적의 방위각을 추정하는 데에 초점을 맞춘다.

대표적인 방위각 추정 기법으로는 모노펄스 기법(monopulse technique)^[2]과 스펙트럼 추정 기법(spectral estimation technique)^{[3]~[6]}이 존재한다. 그 중 모노펄스 기법은 표적마다의 정확한 방위각을 추출하기 위해 동일한

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· Manuscript received July 2, 2015 ; Revised September 7, 2015 ; Accepted September 11, 2015. (ID No. 20150702-03S)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

표적에 대한 수신 신호끼리 구분지어 해당하는 표적의 방위각 추정을 수행하여야 하며, 이 과정에서 잘못된 구분으로 인해 부정확한 방위각 추정 결과를 야기할 수 있다. 하지만, 스펙트럼 추정 기법을 이용한 표적의 방위각 추정의 경우에는 동일한 표적을 나타내는 수신 신호끼리 구분하는 과정 없이 비교적 정확한 각도를 도출할 수 있는 장점이 있다.

스펙트럼 추정 기법들 중 하나인 relaxation(RELAX) 기법^[3]은 수신 채널의 공간 영역(spatial domain)과 표적이 존재하는 각도 영역(angular domain) 사이의 푸리에(Fourier) 관계를 이용하여 각도 영역의 스펙트럼(spectrum)을 추정하는 푸리에 기반 기법이다. 다시 말해, 수신 채널에서 얻은 신호들을 이용하여 푸리에 변환(Fourier transform)을 수행하면 각도 영역에서의 스펙트럼을 얻을 수 있는데 이 때 RELAX 기법을 이용해 스펙트럼의 극값(pole)에 해당하는 신호 세기가 높은 순서부터 점상 분포 함수(Point Spread Function: PSF)를 재구성하여 원래의 스펙트럼을 예측한다. 이를 통해 표적의 방위각뿐만 아니라, 빔 내에 존재하는 표적 개수 또한, 추정 가능한 장점이 존재한다.

하지만, 차량용 레이더는 소형화, 경량화의 문제로 인하여 적은 수신 채널을 사용하며, 이에 따라 각도 영역에서의 스펙트럼 및 PSF는 적은 수의 신호 성분으로 구성된다. 이에 따라, 분해능이 좋지 않은 스펙트럼 및 PSF가 형성됨으로 인하여 정밀하지 않은 스펙트럼을 추정하며, 이는 RELAX 기법의 부정확한 표적의 개수 및 방위각 추정을 야기한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 minimum length description(MDL) 기준^[7]을 이용하여 빔 내에 존재하는 표적의 개수를 추정한 후, 스펙트럼 추정 기법 중 하나인 root-multiple signal classification(root-MUSIC) 기법^[4]을 사용하여 표적의 방위각을 추정하는 방법을 제시한다.

이렇게 MDL 기준과 결부한 root-MUSIC 기법은 수신 채널의 공간 영역과 표적이 존재하는 각도 영역 사이의 푸리에 관계를 이용하지 않음에 따라 수신 채널의 개수가 작은 차량용 레이더를 사용하는 경우, 비교적 RELAX 기법에 비해 우월한 성능을 지닌다.

본 논문에서는 표적의 정확한 방위각 추정 과정의 자

세한 설명을 위하여 레이더가 선형 주파수 변조 파형(Linear Frequency Modulated Waveform: LFM waveform)을 송/수신할 경우를 가정하여 각 수신 채널에서 저장한 최종 신호를 모델링 한다. 그 후, 모델링한 신호를 RELAX 기법, MDL 기법, 그리고 root-MUSIC 기법에 적용하여 각 기법에 대해 논한다.

II. 본 론

2-1 수신 신호 모델링

우선, 그림 1과 같이 N 개의 수신 채널로 이루어진 균일 선형 배열(Uniform Linear Array: ULA) 안테나를 사용하는 경우를 가정한다. 하나의 송신 채널에서는 LFM 파형을 송신하며, 각 수신 채널에서는 최종적으로 표적에 맞고 되돌아오는 LFM 파형에 대해 디램핑(deramping) 과정^[8]을 거친 후의 신호를 저장한다. n 번째 수신 채널에서의 최종적인 수신 신호 벡터는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \vec{s}_n(t) = & \sum_{m=1}^M \frac{\sigma_m}{(4\pi r_{m,n}^2)(4\pi r_{m,T}^2)} a(t - \tau_{m,n}) \\
 & \cdot \exp\left(j2\pi f_0 \tau_{m,n} - j\frac{\pi B}{T} \tau_{m,n}^2\right) \\
 & \cdot \exp\left(j\frac{2\pi B}{T} \tau_{m,n} t\right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

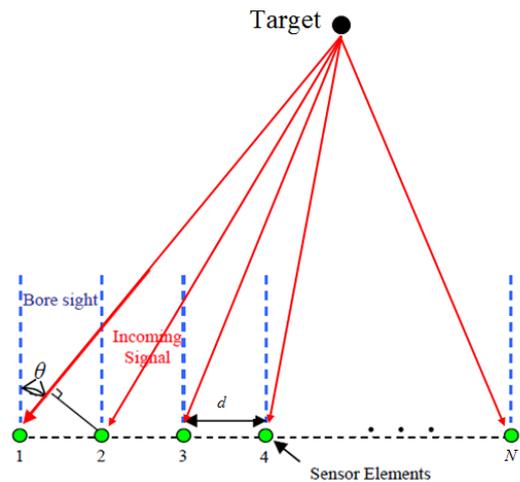


그림 1. 방위각 방향으로의 두 수신 채널
Fig. 1. Two receiving channels in azimuth direction.

식 (1)에서 M 은 빔 내에 존재하는 표적의 개수, σ_m 은 m 번째 표적의 레이더 단면적(Radar Cross Section: RCS) 값, $r_{m,T}$ 는 송신기와 m 번째 표적과의 거리, $r_{m,n}$ 은 m 번째 표적과 n 번째 수신 채널 사이의 거리, τ_n 은 m 번째 표적에 대한 n 번째 수신 채널에서 적용되는 시간 지연 값, f_0, B, T_p 는 각각 LFM 파형의 시작 주파수, 대역폭, 펄스 폭이다. 결과적으로, $\overline{s}_n(t)$ ($0 \leq t \leq T_p$)는 M 개의 지수 함수의 합으로 이루어져 있다.

이렇게 모든 N 개의 수신 채널에 대한 수신 신호를 모델링한 다음 N_p 개로 샘플링(sampling)한 후, RELAX 기법, MDL 기법, 그리고 root-MUSIC 기법에서 사용할 $N \times N_p$ 크기의 신호 행렬 S 를 아래의 식 (2)와 같이 구성한다.

$$S = [\overline{s}_1(t)^T, \overline{s}_2(t)^T, \dots, \overline{s}_N(t)^T]^T \quad (2)$$

위의 식에서 T 는 벡터의 전치(transpose)를 의미한다.

2-2 RELAX 기법을 이용한 표적의 개수 및 방위각 추정

RELAX 기법은 수신 채널의 공간 영역과 표적이 존재하는 각도 영역 사이의 푸리에 관계를 이용하여 각도 영역의 스펙트럼을 추정하는 푸리에 기반 기법이다. 본 논문에서 다루는 RELAX 기법은 1차원 RELAX 기법으로서, 앞서 구성한 식 (2)의 신호 행렬 S 를 1차원 RELAX 기법에 적용하기 위해 아래와 같은 연산을 거친 후 $N \times 1$ 크기의 벡터 \overline{y} 를 형성한다.

$$\overline{y} = S[1, 1, \dots, 1]^T \quad (3)$$

식 (3)의 결과인 \overline{y} 의 성분들은 수신 채널의 개수만큼 존재하며, \overline{y} 에 대한 푸리에 변환(Fourier transform)을 통해 각도 영역에서의 스펙트럼을 형성한다. 이 때, 스펙트럼의 극값이 존재하는 각도 영역에서의 위치는 표적의 방위각과 대응한다. 이에 기반하여 RELAX 기법은 스펙트럼 상에서 극값(pole)에 해당하는 신호 세기가 높은 순서부터 PSF를 재구성하여 원래의 스펙트럼에서 제거하는 과정을 수행함을 통해 표적의 개수와 방위각을 결정한다. RELAX 기법의 자세한 과정은 다음과 같다.

Step 1: 모든 $k(1 \leq k \leq \hat{K})$ 에 대해 아래의 식 (4)와 같은 연산을 수행한다. 처음 Step 1을 수행할 때 $\hat{K}=1$ 을 만족한다.

$$\overline{y}_k = \overline{y} - \sum_{i=1, i \neq k}^{\hat{K}} \hat{\beta}_i \exp(j\hat{w}_i n) \quad (4)$$

Step 2: \overline{y}_k 의 스펙트럼을 N 개가 아닌 $N^*(N^* \gg N)$ 개의 샘플로 촘촘히 나타내기 위해 \overline{y}_k 에 대하여 N^* 제로-패딩(zero-padding)을 수행한다. 제로-패딩 후의 신호 벡터를 \overline{y}_{zk} 라 정의한다.

Step 3: k 번째로 높은 극값이 존재하는 위상 값을 \hat{w}_k ($0 \leq \hat{w}_k \leq 2\pi$), 그 지점의 스펙트럼 크기 값을 $\hat{\beta}_k$ 라고 했을 때, 각각을 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\hat{w}_k = \operatorname{argmax}_w \left\| \sum_{n=0}^{N^*-1} \overline{y}_{zk} \exp(-jwn) \right\|^2 \quad (5)$$

$$\hat{\beta}_k = \frac{1}{N} \overline{y}_{zk} \exp(-jwn) \Big|_{w=\hat{w}_k} \quad (6)$$

Step 4: 아래 식 (7)의 비용함수 $g(\hat{K})$ 를 계산한다.

$$g(\hat{K}) = \sum_{n=0}^{N-1} \left\| \overline{y} - \sum_{k=1}^{\hat{K}} \hat{\beta}_k \exp(j\hat{w}_k n) \right\|^2$$

$$g(0) = \sum_{n=0}^{N-1} \|\overline{y}\|^2 \quad (7)$$

Step 5: $g(\hat{K}) > g(\hat{K}-1)$ 을 만족할 때까지, \hat{K} 를 1씩 증가시켜가며 Step 1부터 Step 4까지 반복 수행한다. 위와 같은 RELAX 알고리즘의 반복 수행을 통하여 \hat{w}_k 와 $\hat{\beta}_k$ 를 새로이 갱신한다.

알고리즘 내의 반복 수행이 종료된 후, 최종 도출한 \hat{K} 는 RELAX 기법을 이용하여 추정된 빔 내의 표적 개수를 나타낸다. 만일 최종적인 \hat{K} 가 실제 빔 내에 존재하는 표적의 개수와 동일하지 않을 경우, 원활한 각도 영역에서의 스펙트럼의 추정이 이루어지지 않음을 의미한다. 위상 값 \hat{w}_k 는 k 번째 표적의 방위각 $\hat{\theta}_k$ 와 아래의 식 (8)의 수식

적인 관계를 만족한다.

$$\hat{\theta}_k = \sin^{-1} \left[\frac{\lambda}{2\pi d} \hat{w}_k \right], \quad (k = 1, 2, \dots, \hat{K}) \quad (8)$$

즉, RELAX 기법을 이용하여 \hat{K} 와 \hat{w}_k 를 얻어냄을 통해, 표적의 개수와 방위각 $\hat{\theta}_k$ 를 추정해낼 수 있다.

하지만, 차량용 레이더는 소형화, 경량화의 문제로 인하여 적은 수신 채널을 사용하며, 이에 따라 각도 영역에서의 스펙트럼 및 PSF는 적은 수의 신호 성분으로 구성된다. 이에 따라, 분해능이 좋지 않은 스펙트럼 및 PSF가 형성됨으로 인하여 정밀하지 않은 스펙트럼을 추정하며, 이는 부정확한 표적의 개수 및 방위각 추정을 야기한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 MDL 기법을 이용하여 빔 내에 존재하는 표적의 개수를 추정한 후, 스펙트럼 추정 기법 중 하나인 root-MUSIC 기법을 사용하여 표적의 방위각을 추정하는 방법을 제시한다.

2.3 MDL 기준을 통한 표적의 개수 추정

MDL 기준을 통한 빔 내의 표적 개수 추정은 우선 아래의 식 (9)처럼 식 (2)의 신호 행렬 S 에 대한 $N \times N$ 공분산 행렬 C 를 형성하는 데서부터 출발한다.

$$C = (1/N_T)SS^H \quad (9)$$

위의 식에서 N_T 는 수신 신호 벡터의 총 샘플 개수이며, 연산자 H 는 에르미트(hermitian) 연산자이다. 그 다음, C 에 대한 고유 값 분해(eigen decomposition)를 수행하면 아래의 식들과 같다.

$$C = QAQ^H \quad (10)$$

$$A = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N] \quad (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N) \quad (11)$$

$$Q = [\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_N] \quad (12)$$

위의 식 (11)은 C 의 고유 값으로 이루어진 대각 행렬 A 이며, 식 (12)는 n 번째 고유 값과 대응하는 $N \times 1$ 크기의 고유 벡터(eigenvector) \bar{q}_n 을 고유 값의 크기가 큰 순서대로 모아놓은 고유 벡터 행렬이다. 그 다음, 식 (11)의 고유 값들을 이용해 표적의 개수 추정을 위한 MDL 기준을

다음과 같이 정립한다.

$$\hat{K} = \underset{k \in 1, \dots, N-1}{\text{argmin}} MDL(k) \quad (13)$$

$$MDL(k) = N_T(N-k) \log \left\{ \frac{1}{N-k} \sum_{i=k}^N \lambda_i \right\} + \frac{1}{2} k(2N-k+1) \log N_T \quad (14)$$

최종적으로, 위의 식 (13)을 만족하는 \hat{K} 를 통해 빔 내에 존재하는 표적들의 개수를 결정할 수 있으며, 이렇게 얻어낸 \hat{K} 를 root-MUSIC 기법에 적용하면 안테나 빔 내에 존재하는 표적들의 정확한 방위각 추정이 가능하다.

2.4 Root-MUSIC 기법을 이용한 빔 내의 표적에 대한 방위각 추정

Root-MUSIC 기법을 이용한 방위각 추정을 위해 우선, 식 (12)의 고유 벡터 행렬을 아래와 같이 두 부분으로 나눈다.

$$Q = [Q_S; Q_N] \quad (15)$$

위의 식에서 행렬 $Q_S = [\bar{q}_1, \dots, \bar{q}_{\hat{K}}]$ 는 신호 성분을 나타내는 고유 벡터 행렬 부분이며, 행렬 $Q_N = [\bar{q}_{\hat{K}+1}, \dots, \bar{q}_N]$ 은 신호 성분 외에 잡음(noise) 성분을 나타내는 고유 벡터 행렬 부분이다. 다시 말해, Q_S 에는 표적의 방위각에 대한 정보가 담겨 있는 반면에, Q_N 은 그 외 잡음에 대한 정보를 담고 있다. 이 때, Q_S 와 Q_N 은 서로 직교함에 따라 아래의 관계식이 성립한다.

$$\overline{v(z_k)}^H Q_N Q_N^H \overline{v(z_k)} = 0 \quad (16)$$

위의 식에서 $\overline{v(z_k)} = [1, z_k^{-1}, \dots, z_k^{-(N-1)}]^T$ 이며, 식 (16)을 만족하는 z_k 들 중, z_k 가 가리키는 복소수 평면에서의 한 점이 단위 원(unit circle)과 가장 인접하게 위치한 \hat{K} 개의 z_k 만을 추출하여 아래의 식 (17)과 같이 \hat{K} 개의 표적들에 대한 각각의 방위각 θ_k 를 결정한다.

$$\theta_k = \sin^{-1} \left[\frac{\lambda}{2\pi d} \arg(z_k) \right], \quad (k = 1, 2, \dots, \hat{K}) \quad (17)$$

식 (17)에서 d 는 안테나의 수신 채널 간 간격이다.

이와 같이 root-MUSIC 기법은 표적이 존재하는 각도 영역 사이의 푸리에 관계를 이용하지 않음에 따라 수신 채널이 적은 차량용 레이더를 사용하는 경우, 비교적 RELAX 기법에 비해 우월한 방위각 추정 성능을 보인다.

III. 시뮬레이션 결과

본 연구의 시뮬레이션에서는 RELAX 기법의 방위각 추정 결과와 MDL 기준과 결부한 root-MUSIC 기법을 이용해 얻은 방위각 추정 결과의 비교를 위해 차량용 레이더에 장착한 안테나를 6개의 수신 채널로 이루어져 있는 ULA 안테나로 설정하였다. 사용하는 ULA 안테나의 수신 채널간의 간격은 λ 로 동일하다.

레이더가 송신하는 LFM 파형의 시작 주파수는 76.5 GHz, 대역폭은 200 MHz, 신호 대 잡음비는 25 dB, A/D 샘플링 주기는 250 ns, 펄스 폭(pulse width)은 70 μ s이다.

안테나 빔 내에는 세 표적이 존재하며, 각 표적은 점산란 원(point scatterer)으로 가정하였다. 표적 1, 표적 2, 표적 3의 RCS 크기는 각각 0.5, 0.8, 0.6으로 설정하였다.

그림 2와 같이, 초기에 표적 1, 표적 2, 표적 3의 중심은 직교 좌표계(cartesian coordinate) [x y z] 내에서 각각 [10 3 0] m, [20 0 0] m, [15 -3 0] m에 위치하며, 레이더는 직교 좌표계 중심에 위치한다. 이 때, 표적 2와 3을 고정

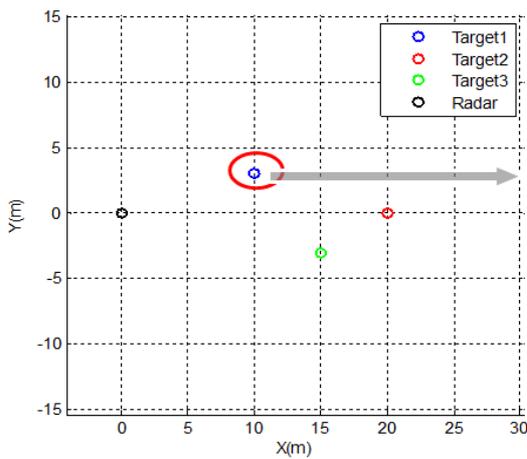


그림 2. 직교 좌표계에서 세 표적들의 위치
Fig. 2. Positions of three targets in cartesian coordinate system.

시킨 채로 표적 1의 x방향으로의 위치를 10 m에서 30 m까지 0.3 m의 간격으로 변화시킬 때마다 시뮬레이션을 반복 수행하였다. 이를 통해, 빔 내에 존재하는 표적들의 배치가 변할 때마다 각 방위각 추정 기법의 성능을 비교할 수 있다.

그림 3(a)에는 각 시뮬레이션에서 RELAX 기법을 통해 추정한 표적의 개수를 나타내었다. 검정색 자취는 각 시뮬레이션마다 추정한 표적의 개수이다. 그림 3(a)의 결과를 통해 시뮬레이션을 수행한 거의 모든 경우에 대해서

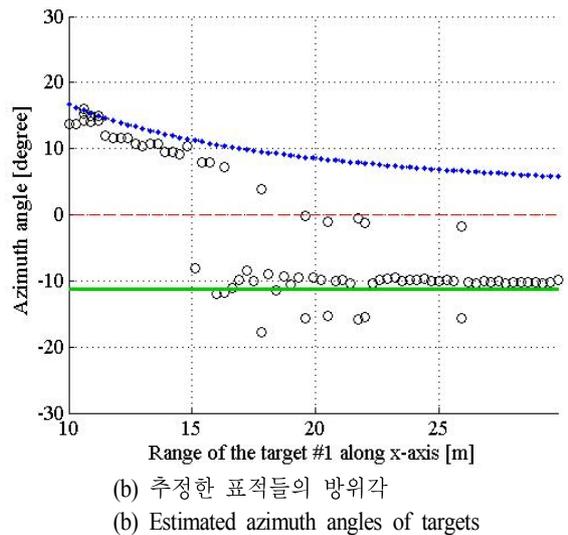
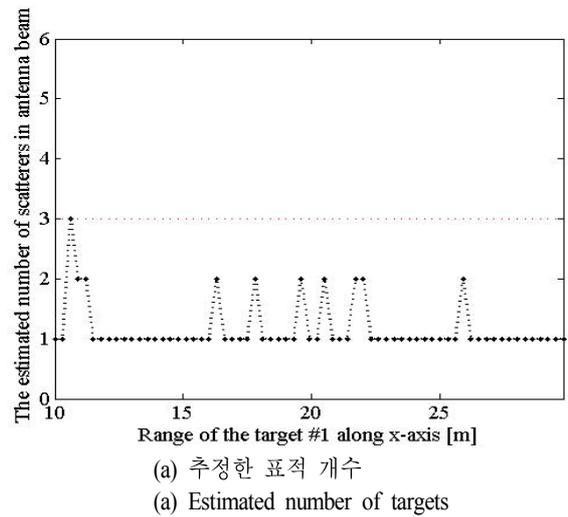


그림 3. RELAX 기법의 결과
Fig. 3. Results of RELAX algorithm.

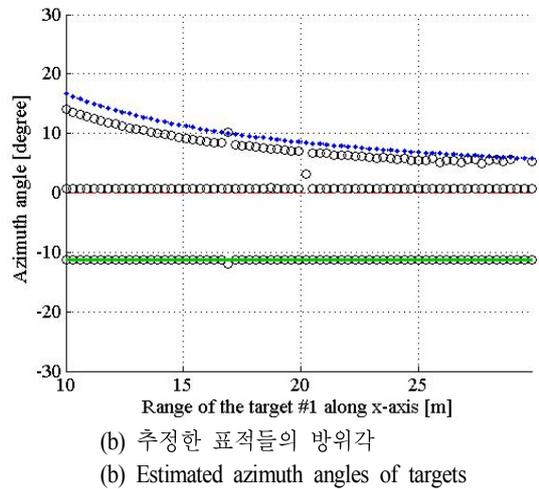
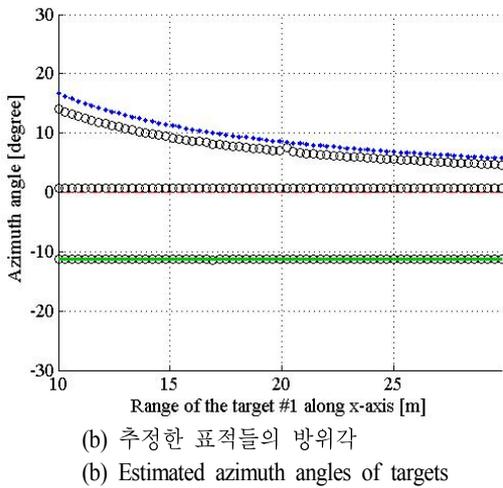
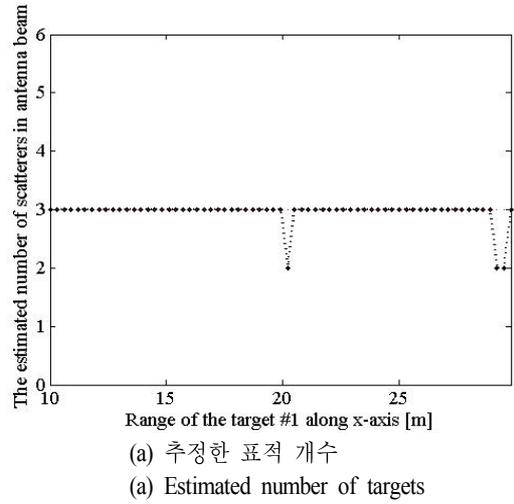
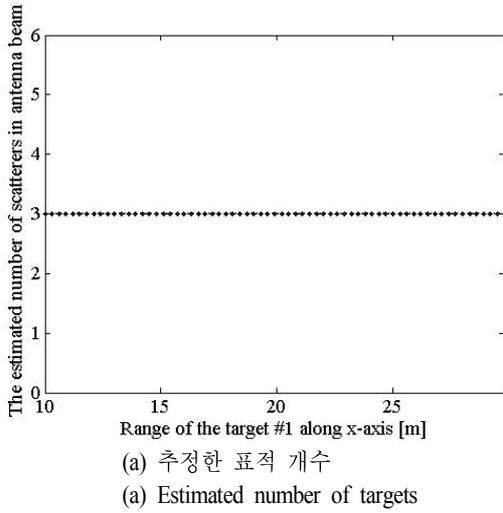


그림 4. MDL 기준과 결부한 root-MUSIC 기법의 결과
Fig. 4. Results of root-MUSIC algorithm with MDL criterion.

부정확한 \hat{K} 가 도출되었음을 알 수 있으며, 이는 분해능이 좋지 않은 PSF에 따른 정밀하지 않은 각도 영역의 스펙트럼 추정으로 인한 것이다. 이와 관련하여 RELAX 기법을 이용해 추정된 표적의 방위각을 그림 3(b)에 도시하였다. 검정색 점은 각 시뮬레이션마다 추정된 표적의 방위각을 나타내며, 파란색 굵은 점선, 빨간색 가는 점선, 초록색 실선은 각각 표적 1, 표적 2, 표적 3의 실제 방위각을 나타낸다. 그림 3(b)의 결과는 앞에서 소개한 RELAX 기법 내 반복과정의 조기종료로 인해 모든 표적들의 방위각이 추정되지 않음을 보여줄 뿐만 아니라, 정밀하지

그림 5. MDL 기준과 결부한 root-MUSIC 기법의 결과($N=4$)
Fig. 5. Results of root-MUSIC algorithm with MDL criterion($N=4$).

않은 스펙트럼의 추정에 따라 각 표적에 대한 부정확한 방위각 추정이 이루어짐을 보여준다. 대체적으로, 빔 내에 위치하는 표적들 중 레이더와 가장 거리가 가까운 표적에 대한 방위각을 추정하였으며, 이는 전체적인 도로 상황의 탐지를 위해서는 적절하지 않다.

그림 4(a)와 그림 4(b)에는 각각 MDL 기준을 통해 추정된 표적의 개수와 MDL 기법과 결부한 root-MUSIC 기법의 방위각 추정 결과를 도시하였다. 그림 4(a)는 MDL 기준을 통한 표적의 개수 추정이 정확히 이루어졌음을 보

여준다. 또한, 그림 4(b)의 root-MUSIC 기법의 방위각 추정 결과는 빔 내에 존재하는 모든 표적들에 대한 실제 방위각을 유사하게 나타내었으며, 결과적으로, MDL 기준과 결부한 root-MUSIC 기법은 RELAX 기법과 달리 전체적인 도로 상황의 탐지가 가능함을 알 수 있다.

그림 5(a)와 (b)에는 동일한 시물레이션 상황에 대해서 ULA 안테나의 수신 채널의 개수를 6개에서 4개로 줄였을 경우, MDL 기준과 결부한 root-MUSIC 기법의 표적의 개수 추정 결과와 방위각 추정 결과를 나타내었다. 이를 통해 수신 채널의 개수가 줄어도 대체로 정확한 표적의 개수 및 방위각 추정이 가능함을 알 수 있다.

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 적은 개수의 수신 채널로 이루어진 차량용 레이더에서 MDL 기준과 결부한 root-MUSIC 기법을 이용하여 빔 내에 존재하는 모든 표적에 대한 방위각 추정 시, RELAX 기법에 비해 더 우월한 방위각 추정 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구로는 표적의 개수를 달리 하거나, 잡음의 정도를 달리하는 등의 다양한 시물레이션 조건에서 각각의 알고리즘에 따른 방위각 추정 성능을 평가해야 할 것이다.

References

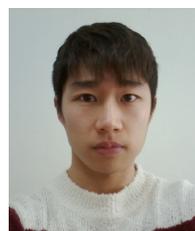
- [1] H. Rohling, C. Moller, "Radar waveform for automotive radar systems and applications", *Radar Conference 2008*, pp. 1-4, May, 2008.
- [2] S. M. Sherman, *Monopulse Principles Andtechniques*, Dedham, MA: Artech House, 1994.
- [3] J. Li, P. Stoica, "Efficient mixed-spectrum estimation with applications to target feature extraction", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, no. 2, 1996.
- [4] A. Vesa, "Direction of arrival estimation using MUSIC and root-MUSIC algorithm", In *Proc., 18th Telecommunications Forum TELFOR 2010*, pp. 582-585, Nov, 2010.
- [5] P. Stoica, R. Moses, *Introduction to Spectral Analysis*, Prentice Hall, Inc., New Jersey 07458.
- [6] 조희진, 최각규, 한승구, 김경태, 송성찬, "RELAX 기법을 이용한 미사일의 길이 추정 신호 처리 기법 연구", *한국전자과학회논문집*, 24(3), pp. 292-298, 2013.
- [7] M. Wax, I. Ziskind, "Detection of the number of coherent signals by the MDL principle", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 37, no. 8, pp. 1190-1196, 1989.
- [8] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MALAB*, John Wiley & Sons, 1999.

이 성 현



2013년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2015년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2015년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 모노펄스 신호처리, 스펙트럼 추정

최 인 오



2012년 8월: 부경대학교 전자정보통신공학과 (공학사)
 2014년 8월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)
 2015년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호처리, 패턴인식, 스펙트럼 추정 등

김 경 태



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)

1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2002년 3월 ~ 2011년 2월: 영남대학교 전

자공학과 교수

2011년 3월 ~ 현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

2012년 9월 ~ 현재: 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실장

[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정 등