

FMCW 레이다 시스템에서 마이크로 도플러를 이용한 다중 목표물 위치 추정 기법

Multi-Target Position Estimation Technique Using Micro Doppler in FMCW Radar System

유 경 우 · 전 주 환 · 류 충 호*

Kyungwoo Yoo · Joohwan Chun · Chung-Ho Ryu*

요 약

도착시간(Time of arrival : TOA)을 이용한 삼변측량법은 레이다 시스템에서 단일목표물의 위치를 추정할 때 일반적으로 사용되는 기법으로 다중 목표물의 경우에는 각 목표물에 대응되는 측정치를 구별할 수가 없으므로 활용이 어려운 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 측정치와 목표물 간 관계의 모호성을 없애고자 최근 레이다 분야에서 활발히 연구되고 있는 마이크로 도플러를 통해 각 목표물의 마이크로 모션을 측정하여 각 목표물의 측정치를 구별하는데 활용하였고, 구별된 측정치로 각 목표물에 대해 삼변측량법을 적용할 수 있게 하였다. 목표물은 모탄에서 분리되는 자탄을 고려하였으며 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 알고리즘을 검증하였다.

Abstract

Trilateration technique using time of arrival(TOA) is generally used for single target position estimation in radar system. However, trilateration technique has limitation in case of multiple targets, since it is difficult to distinguish the measurements corresponding to the respective targets. In this study, to eliminate ambiguity of relation between measurements and targets, micromotion of each target is measured by micro Doppler which is actively studied in radar industry nowadays and these information are used to distinguish measurements used at trilateration technique. Resultingly, the trilateration technique is applied successfully for each target. The targets are considered as multiple submissiles separated from the missile. Simulation results shows the performance of the proposed algorithm.

Key words: Radar System, Micro-Doppler, Doppler Spectrogram, Trilateration Technique

I. 서 론

레이다 시스템에서 측정되는 도플러 주파수는 해당 물체의 다이내믹스와 밀접한 관련이 되어 있음에 따라 물

체의 속도나 움직임 등을 추정하고자 할 때 매우 중요하게 활용되는 정보라고 할 수 있다. 최근에는 작은 드론의 프로펠러의 회전이나 진자운동과 같이 병진운동과 비교하였을 때 작은 움직임에 해당하는 마이크로 모션에 따

「본 연구는 2014년 방위사업청과 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 ADD-14-01-01).」

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

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received September 13, 2016 ; Revised October 26, 2016 ; Accepted November 15, 2016. (ID No. 20160913-099)

· Corresponding Author: Kyungwoo Yoo (e-mail: babooovv@kaist.ac.kr)

라서 어떤 마이크로 도플러 결과가 나타나는지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1][2]}. 마이크로 도플러의 결과를 이용하여 사물 및 해당 물체의 운동 특성을 구별하고 판단하는 사물 인식 및 패턴 분석 연구는 물론 마이크로 도플러 추출 시 일반적으로 사용하게 되는 도플러 스펙트로그램으로부터 보다 정확한 마이크로 모션 정보를 얻어내는 기법에 대한 연구도 많이 진행되고 있다^{[3]~[7]}. 본 연구에서는 마이크로 모션에 의해 어떠한 마이크로 도플러가 출력되는지에 대한 연구와 패턴인식 연구를 기반으로 하여 모탄에서 분리되는 다수 개의 자탄이 서로 다른 마이크로 모션 파라미터 값을 갖고 있을 경우, 자탄의 위치를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 일반적으로 송수신기가 여러 개인 레이더 시스템의 경우, 목표물의 위치나 속도를 추정하기 위해서는 목표물로부터 반사된 신호를 이용하여 도착시간(Time of Arrival : TOA)이나 도착주파수(Frequency of Arrival : FOA)와 같은 측정치를 이용하여 계산하게 된다. 그러나 여러 개의 목표물을 추적할 경우에는 목표물의 개수만큼 도착시간 및 도착주파수 측정치가 얻어지게 되므로 어떤 측정치가 어떤 목표물에 해당하는 것인지 알 수 없으므로 삼각측량과 같은 방법을 이용하여 목표물의 위치를 추정할 수 없다. 제안하는 기법은 마이크로 도플러로부터 추정된 마이크로 모션 정보를 이용하여 목표물에 해당하는 측정치를 분류함으로써 독립적으로 각 목표물에 대한 삼변측량을 함으로써 다수 개의 목표물의 위치 추정을 가능하게 한다.

논문 순서는 다음과 같다. 2장에서는 주파수 변조 연속파(Frequency Modulated Continuous Wave : FMCW) 레이더의 신호 모델링을 간단히 기술하고, 3장에서 도플러 스펙트로그램을 기반으로 한 마이크로모션 파라미터 계산 방법에 대해서 설명한다. 4장에서는 다중 목표물의 위치를 마이크로 도플러를 이용하여 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘의 성능을 분석하기 위해 시뮬레이션 결과를 5장에 도시하였으며, 결론 및 향후 연구 방향을 6장에 기술하였다.

II. FMCW 신호 모델

한 버스트(burst)가 N 개의 펄스로 이루어진 FMCW 레

이다 시스템에서 송신하는 송신 신호는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} s(n, t_n) &= \exp\left(j2\pi\left(f_c + \frac{1}{2}\alpha(t_n - nT_{PRI})\right)(t_n - nT_{PRI})\right), \\ nT_{PRI} &\leq t_n \leq (n+1)T_{PRI}, \\ n &= 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (1)$$

위 신호에서 T_{PRI} 는 펄스 반복 주기(pulse repetition interval)를 나타낸다. f_c 및 α 는 중심주파수와 칩 변화율(chirp rate)이며, αT_{PRI} 는 대역폭 B 가 된다.

위와 같은 송신 신호가 목표물에 반사되어 돌아오면 레이더와 목표물의 거리 $R(t)$ 에 비례하여 시간 지연 $\tau(t) = \frac{2R(t)}{c}$ 가 발생하므로 수신신호 $s_r(n, t_n)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s_r(n, t_n) &= \exp\left(j2\pi\left(f_c + \frac{1}{2}\alpha(t_n - nT_{PRI} - \tau(t))\right) \cdot (t_n - nT_{PRI} - \tau(t))\right) \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 deramping된 신호 $s_d(n, t_n)$ 는 식 (3)과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} s_d(n, t_n) &= s(n, t_n) \cdot (s_r(n, t_n))^* \\ &= \exp(j2\pi f_c \tau(t)) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{1}{2} \alpha (2\tau(t)(t_n - nT_{PRI}) - \tau^2(t))\right) \end{aligned} \quad (3)$$

위의 수식에서 $\exp(j\pi\alpha\tau^2(t))$ 는 잔여 위상(Residual Video Phase : RVP)으로 보정 가능한 값이므로 생략하면 아래와 같다^[8].

$$\begin{aligned} s_d(n, t_n) &= \exp(j2\pi f_c \tau(t)) \exp(j2\pi\alpha\tau(t)(t_n - nT_{PRI})) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 $\tau(t)$ 에서 t 는 한 버스트 동안의 시간을 나타내며 $0 \leq t \leq T_{PRI}$ 동안은 매우 짧은 시간이므로 불변으로 가정하면 $nT_{PRI} \leq t_n \leq (n+1)T_{PRI}$ 동안 $s_d(n, t_n)$ 는 $a \exp(j2\pi\alpha\tau(t)(t_n - nT_{PRI}))$ 로 근사화가 가능하고, $s_d(n, t_n)$ 를 t_n 에 대해서 FFT 함으로써 $\tau(t)$ 를

계산할 수 있다. 해당 FMCW 레이더 시스템이 한 버스트 내에 N 개의 펄스가 있고, 버스트 동안 목표물이 같은 레인지 빈(range bin) 내에 존재한다고 가정한다면 거리를 계산하기 위해 수행한 FFT의 피크(peak) 값들은 모두 같은 레인지 빈에서 나타난다. 즉, $s_d(n, t_n)$ 를 매 펄스마다 FFT의 피크 값의 인덱스인 $t_n = t_n^*$ 으로 고정하고 n 만을 변수로 간주하면 $\exp(j2\pi\alpha\tau(t)(t_n - nT_{PRI}))$ 는 상수에 가까우므로 a' 으로 놓으면

$$\begin{aligned}
 s_d(n, t_n^*) &\approx a' \exp(j2\pi f_c \tau(t)) = a' \exp\left(j2\pi f_c \frac{2R(t)}{c}\right) \\
 &\approx a' \exp\left(j2\pi f_c \frac{2vt}{c}\right) = a' \exp\left(j2\pi f_c \frac{2vnT_{PRI}}{c}\right) \quad (5)
 \end{aligned}$$

로 표현할 수 있다. $R(t)$ 는 버스트 동안 같은 레인지 빈 내에서 등속 운동을 한다고 가정하였다. 따라서 식 (5)를 n 에 대해서 FFT를 수행하면 속도 v 를 얻을 수 있다.

III. 도플러 스펙트로그램 기반 마이크로 모션 파라미터 계산

일반적으로 미사일은 모탄에서 분리 시에 마이크로 모션이 발생하게 된다. 분리 시 발생하는 마이크로 모션을 살펴보면 회전축이 회전하는 세차운동, 회전축이 운동 방향과 갖는 각도를 나타내는 장동각(nutation angle), 마지막으로 회전축을 기준으로 회전하는 회전 운동으로 나눌 수 있다. 참고문헌 [9]에서 알 수 있듯이, 장동각 이외의 두 개의 값은 짧은 시간 동안의 주파수를 관측하기 위해 단시간 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform: STFT) 기법을 적용하여 출력한 도플러 스펙트로그램 상에서 얻어질 수 있다. 그림 1은 목표물이 마이크로 모션을 가질 때의 도플러 스펙트로그램을 나타낸다.

도플러 스펙트로그램은 2D 신호이나 주파수가 다른 여러 개의 정현파가 합성된 결과이며, 형태학적 알고리즘을 적용함으로써 1D 신호로 변환이 가능하다^[9]. 1D로 변환한 도플러 신호 $f_{mD}(t)$ 는 식 (6)과 같이 간단히 표현할 수 있다^[9].

$$f_{mD}(t) = \alpha_{\psi+\phi} \sin[(\omega_{\psi} + \omega_{\phi})t + \Phi_{\psi+\phi}] +$$

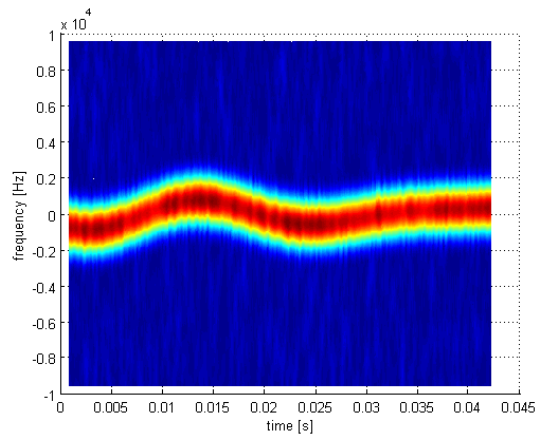


그림 1. STFT을 통해 얻어진 도플러 스펙트로그램
Fig. 1. Doppler spectrogram obtained from STFT.

$$\begin{aligned}
 &\alpha_{\psi-\phi} \sin[(\omega_{\psi} - \omega_{\phi})t + \Phi_{\psi-\phi}] + \\
 &\alpha_{\psi} \sin(\omega_{\psi}t + \Phi_{\psi}) + \alpha_{\phi} \sin(\omega_{\phi}t + \Phi_{\phi}) \quad (6)
 \end{aligned}$$

위 수식에서 ω_{ψ} , ω_{ϕ} 는 각각 회전운동의 주파수, 세차운동의 주파수이며, $\alpha(\cdot)$, $\Phi(\cdot)$ 는 각 정현파의 크기와 위상을 나타낸다. 1D로 변환된 도플러 스펙트로그램의 신호는 앞선 수식과 같이 두 개의 파라미터의 주파수 값과 두 파라미터 주파수의 더한 값, 뺀 값으로 총 네 개의 주파수가 합성된 신호인 것을 알 수 있다^[9]. 본 연구에서는 회전운동의 주파수 ω_{ψ} 가 세차운동의 주파수 ω_{ϕ} 보다 크다고 가정한다. 따라서 위의 네 개의 주파수는 모두 양의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 또한, 본 장에서는 여러 개의 서로 다른 주파수를 갖는 신호가 합성된 신호에서 각 주파수 성분들을 추출할 때 상호 상관(cross correlation)에 의한 오차를 완화하기 위해 RELAX 기법을 적용하여 FFT로 추출한 주파수 추정값보다 정확한 주파수를 계산하도록 하였다^[9]. RELAX 알고리즘을 이용하여 추출된 네 개의 주파수로부터 회전운동의 주파수와 세차운동의 주파수를 추출하게 되고, 이 두 개의 결과와 자탄의 관성(inertia)를 이용해 장동각을 추정하게 되는데, 본 연구에서는 각 자탄의 마이크로 모션을 추정하는 것이 목적이 아니라, 마이크로 도플러를 활용하여 다중 목표물의 위치를 추정하는 것이 목표이므로 자탄의 관성과 같은 추가적인 정보와 계산을 줄이고자 앞선 두 개의 파라미터 값만 추출하도록 한다.

IV. 다중 목표물 위치 추정

다중 목표물 위치 추정 기법은 여러 개의 FMCW 레이다로부터 얻어진 거리 정보를 이용하여 삼변측량을 기반으로 구현된다. 삼변측량을 통한 위치 추정은 단일 목표물의 경우에 유용하게 사용되는 위치 추정 기법인데, 목표물이 두 개 이상이 되었을 경우, 각 목표물에 해당하는 측정치가 무엇인지 알 수가 없어 적용이 불가하다. 본 논문에서는 각 목표물에 해당하는 측정치를 올바르게 분류하여 삼변측량 기법을 가능하게 하고자 마이크로 도플러가 활용된다. 앞서 말했듯이, FMCW 레이다를 사용하므로 일반적으로 목표물들은 레인지 빈에 의해 구분된다. 그러나 적은 확률로 두 개 이상의 목표물이 같은 레인지 빈에 있을 수 있다. 이에 따라 목표물이 다른 레인지 빈에 있는 경우와 같은 레인지 빈에 있는 경우로 나누어서 알고리즘을 설명한다.

4.1 목표물이 다른 레인지 빈에 존재할 경우

M_r 개의 FMCW 레이다가 고르게 분포해 있고 M_t 개의 목표물이 있을 때 모든 FMCW 레이다에서 M_t 개의 목표물이 모두 다른 레인지 빈에서 측정되었다고 가정하자. 또한, M_t 개의 목표물은 각각 다른 속도로 회전운동 및 세차운동을 하고 있다고 가정한다. 이때 앞선 장에서 기술한 기법을 이용하여 얻은 두 개의 주파수 성분을 i 번째 레이다에서 레인지 빈에 따라서 분류를 하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{r,i} = \begin{bmatrix} p_{r1} \\ p_{r2} \\ \vdots \\ p_{rM_t} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} \omega_{\psi,1}, \omega_{\phi,1} \\ \omega_{\psi,2}, \omega_{\phi,2} \\ \vdots \\ \omega_{\psi,M_t}, \omega_{\phi,M_t} \end{bmatrix}_i \quad (7)$$

다른 레이다에 대해서도 같은 방식으로 나열하면 총 M_r 개의 길이 $M_t \times 2$ 크기의 행렬이 생성된다. 각 행렬의 행은 각 행의 놈(Norm) 값으로 아래와 같이 노말라이즈된다.

$$P_{r,i} = \begin{bmatrix} p_{r1}/\|p_{r1}\| \\ p_{r2}/\|p_{r2}\| \\ \vdots \\ p_{rM_t}/\|p_{rM_t}\| \end{bmatrix}_i \quad (8)$$

이와 같이 생성된 행렬들은 각 목표물마다 어떤 측정치가 대응되는지를 알기 위하여 식 (9)와 같은 연산을 진행한다.

$$P_{r,i}P_{r,j}^T = \begin{bmatrix} p_{r1}/\|p_{r1}\| \\ p_{r2}/\|p_{r2}\| \\ \vdots \\ p_{rM_t}/\|p_{rM_t}\| \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} p_{r2}/\|p_{r2}\| \\ p_{rM_t}/\|p_{rM_t}\| \\ \vdots \\ p_{r1}/\|p_{r1}\| \end{bmatrix}_j^T \quad (9)$$

위의 수식에서 $i \neq j, j = 1, \dots, i-1, i+1, \dots, M_r$ 이다. 레이다마다 레인지 빈에 따라서 원소를 나열하였을 때 순서가 다르기 때문에 위 수식에서 $P_{r,i}$ 와 $P_{r,j}$ 의 원소 순서를 임의로 다르게 표현하였다. $P_{r,i}P_{r,j}^T$ 는 M_t M_t 의 크기를 갖는 행렬이 되고, c 번째 열에서 1에 가장 가까운 값을 갖는 r 행의 위치가 i 번째 레이다의 c 번째에 해당하는 거리값과 j 번째 레이다의 r 번째에 해당하는 거리값이 대응되는 것을 의미한다. 임의의 기준이 되는 행렬에 위의 과정을 모든 레이다의 행렬들에 대해 수행하면 각각의 목표물마다 거리값이 분류되어 삼변측량을 통해 다중 목표물의 위치를 계산을 할 수 있다.

4.2 목표물이 같은 레인지 빈에 존재할 경우

자탄의 개수를 알고 있다고 가정했을 때 목표물이 같은 레인지 빈에 존재할 경우에는 레인지 빈에서 관측된 피크의 개수가 자탄의 개수보다 적은 것은 당연하다고 할 수 있다. 이때 어떤 레인지 빈에 두 개 이상의 자탄이 존재하는지를 알기 위해서 SVD를 이용한다^[10]. 일반적으로 한 개의 자탄이 레인지 빈에 존재할 경우, 해당 신호 $f_{mD}(t)$ 로 식 (10)과 같이 헨켈 행렬 H를 생성한다.

$$H = \begin{bmatrix} f_{mD}(0) & f_{mD}(T_s) & \dots & f_{mD}((M-1)T_s) \\ f_{mD}(T_s) & f_{mD}(2T_s) & \dots & f_{mD}(MT_s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{mD}((M-1)T_s) & f_{mD}(MT_s) & \dots & f_{mD}((2M-2)T_s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

위의 수식에서 T_s 는 $f_{mD}(t)$ 의 샘플 간격으로 NT_{PRI} 의 값을 가지며, $M \times M$ 의 헨켈 행렬을 생성하려면 총 $2M-1$ 개의 샘플이 필요하다. 위와 같이 생성된 헨켈 행

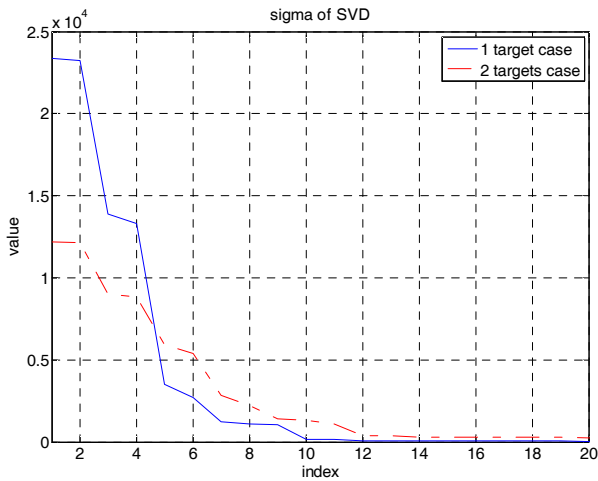


그림 2. 레인지 빈 내 자탄 개수에 따른 특이값 분포
 Fig. 2. Singular values with respect to the number of sub-missile in same range bin.

렬을 SVD를 통해 특이값(singular value)를 계산하면 대략 네 개 이하의 특이값만이 상대적으로 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 도플러 신호가 식 (6)과 같이 네 개의 주파수를 갖는 합성 신호임에 따라 나타나는 결과로 유추할 수 있다. 그러나 만약 두 개 이상의 목표물이 한 레인지 빈에 있을 경우에는 서로 다른 주파수의 개수가 네 개 이상이므로 앞선 특이값의 추이와는 달리 보다 많은 개수의 특이값들이 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 아래 그림은 두 경우에 대한 특이값의 결과를 도시한다.

본 연구에서는 적절한 임계값(threshold)을 두어 레인지 빈에 두 개 이상의 목표물이 존재하는지의 여부를 판단 하도록 하였다. 임계값을 통해서 두 개 이상의 목표물이 존재한다고 가정했을 때, 여러 개의 주파수로부터 각 목표물에 해당하는 네 개의 주파수를 추출하는 방법은 다음과 같다. 본 장에서는 두 개의 목표물의 경우에 대해서 기술한다.

두 개의 목표물의 경우에는 총 여덟 개의 주파수가 존재하게 된다. 이 때 목표물이 하나의 경우와는 달리 가장 큰 주파수와 두 번째로 큰 주파수 값이 결정이 불가능하다. 이에 따라서 여덟 개의 주파수 중 두 개의 네 개의 주파수 쌍을 선정하였을 때 올바르게 선정되었는지를 알기 위해서 내적이 적용된다. 최대 주파수를 기준으로 정하고, 그에 해당하는 나머지 세 개의 주파수 쌍의 경우의 수

는 $7C_3$ 이므로 총 $7C_3$ 개의 후보 중에서 가장 큰 내적값을 갖는 것이 올바른 추정결과로 여기며, 각 목표물에 해당하는 주파수를 추출하여 앞선 방식과 같이 위치를 추출한다.

자탄의 개수를 모를 경우에는 레인지 빈에서 관측된 피크의 개수로부터 레인지 빈에 두 개 이상의 목표물이 존재하는지 알 수 없으므로 무조건적으로 레인지 빈의 피크마다 SVD를 수행하여야 한다.

V. 시뮬레이션

앞서 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 여러 가지 시뮬레이션이 수행되었으며, FMCW 레이다 시스템 파라미터와 기타 시뮬레이션 환경은 각각 표 1, 2와 같다.

거리 빈 회전운동 벡터, 세차운동 벡터 및 자탄의 위치 벡터는 원점에서 정의된 값이며, 자탄의 위치에 평행이동 시켰다. 또한, 도플러 스펙트로그램을 통해 회전 및 세차운동의 주파수를 추출할 때 주파수 분해능이 1 Hz 이하가 되도록 zero-padding을 수행하였다. 자탄은 점표적으로 간주하여 자탄마다 하나의 산란점을 갖는다고 가정했다.

그림 3은 버스트 개수가 각각 50개와 100개일 때 첫 번째 레이다와 자탄을 고려하였을 경우, 회전운동 주파수와 세차운동 주파수의 RMSE 결과를 SNR에 따라 나타내었다. 100회의 몬테 카를로 시뮬레이션으로 결과를 출력하였으며, 뒤이어 나올 모든 결과들 또한 반복횟수를 100회로 설정하였다.

위 결과에서 보듯이, 버스트의 개수가 클 경우 회전운동 및 세차 운동의 추정성능이 향상되는 것을 알 수 있었다. 버스트의 개수는 두 배만 증가하였으나, 성능이 확연

표 1. FMCW 레이다 시스템 파라미터
 Table 1. FMCW radar system parameters.

항목	값
중심 주파수	10 [GHz]
샘플링 주파수	41.235 [MHz]
대역폭	750 [MHz]
펄스 반복 주기(PRI)	52.6 [μ s]
한 버스트 내 coherent 펄스	16
버스트 개수	50, 100

표 2. 시뮬레이션 환경

Table 2. Simulation environments.

항목	값
레이더 개수	5
자탄의 개수	1~3
회전운동 주파수	40, 30, 55 [Hz]
세차운동 주파수	13, 20, 42 [Hz]
회전운동 벡터	$(0, 0, 1)^T$
세차운동 벡터	$(1/\sqrt{2}, 0, 1/\sqrt{2})^T$
자탄의 위치벡터	$(0.03, 0.04, -0.05)^T$
레이더의 위치	$(-150, 0, 10)^T, (100, 0, -7)^T,$ $(50, -100\sqrt{3}/2, 0)^T,$ $(-100/\sqrt{2}, -100/\sqrt{2}, 10)^T,$ $(100\sqrt{3}/2, 50, -20)^T$
자탄의 위치	$(50, 0, 100)^T, (-20, 0, 20)^T, (0, 0, 60)^T$
SNR	-20~10 [dB]

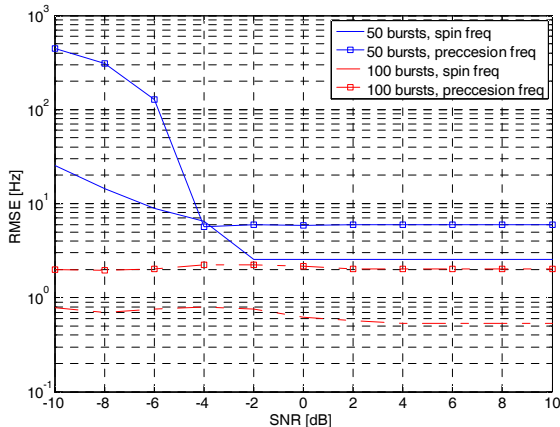


그림 3. SNR에 따른 주파수의 RMSE

Fig. 3. Frequency RMSE with respect to SNR.

히 좋아진 이유는 주파수 추정 분해능을 높이고자 zero padding을 했다고 하더라도 추정하고자 하는 주파수를 표현할 수 없는 정도의 매우 짧은 시간동안의 샘플만 사용되기 때문에 버스트를 늘릴수록 처리이득과 더불어 실제 주파수를 표현하는 실제 샘플, 즉 시간이 늘어나기 때문에 해석할 수 있다. 또한, 하나의 주파수만 추정하는 것이 아닌 네 개의 주파수를 추정하다 보니 생기는 상호 상관에 의한 오차 또한 영향을 미친 것으로 예상된다. 또한,

표 3. 자탄 및 레이더 수에 따른 위치 RMSE

Table 3. Position RMSE w.r.t # of targets and radars.

레이더 수 / 자탄의 수	3	4	5
1	0.0911	0.0841	0.0727
2	0.3868	0.3149	0.2660
3	8.2325	6.4550	2.1193

일정 SNR 이상이 되었을 때 오차가 더 이상 줄어들지 않는 것은 레이더와 자탄 사이의 기하학적인 구조에 의한 정확도의 한계로 판단된다.

표 3은 버스트 개수가 100개이고, SNR이 10 dB일 때 레이더의 개수와 자탄의 개수에 따라 위치오차 RMSE를 정리한 것이다. 표 3에서 알 수 있듯이, 레이더의 개수가 증가할수록 위치 오차가 감소하였으며, 자탄의 수가 증가할수록 성능이 저하되는 것을 알 수 있었다. 이는 레이더의 개수가 늘어남에 따라 측정치가 많아지고, 목표물을 보다 다각도에서 관측가능한 장점으로 위치 오차가 감소하는 것으로 판단되고, 자탄이 두 개 이상이 되어 측정치를 분류할 때, 분류가 올바르게 되지 않는 경우가 생김에 따라 잘못된 쌍의 측정치와 자탄이 묶여 삼변측량을 통한 위치 추정 시에 오차를 일으킨 것으로 예상된다.

그림 4는 첫 번째 레이더에서 한 레인지 bin에 두 개의

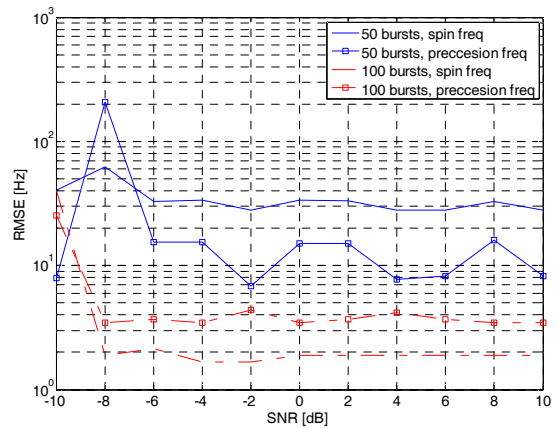


그림 4. 한 레인지 bin에 두 개의 자탄이 존재할 때의 SNR에 따른 주파수의 RMSE

Fig. 4. Frequency RMSE with respect to SNR in presence of 2 targets in same range bin.

자탄이 존재하는 환경으로 자탄의 위치를 조정된 뒤 회전운동 주파수와 세차운동 주파수의 RMSE를 SNR에 따라 나타낸 결과이다.

이 결과는 앞선 그림 3의 결과보다 성능이 악화된 것을 알 수 있는데, 이는 앞선 경우보다 많은 주파수를 추정함에 따라 상호 상관의 영향이 증가했기 때문으로 생각할 수 있다. 또한, 여덟 개의 주파수가 서로 가까이 있는 경우에는 알고리즘의 성능 열화를 완화하기 위해 보다 정확한 주파수 추정 알고리즘이 필요할 것으로 사료된다.

VI. 결 론

본 연구에서는 FMCW 레이더 시스템에서 도플러 스펙트로그램을 통해 여러 목표물들의 서로 다른 마이크로 모션을 추출하여 거리를 분류함으로써 일반적인 TOA를 통한 삼각측량 알고리즘에서는 매우 어려웠던 다중 목표물 환경에서 위치를 추정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 분류된 거리 값들은 삼변측량에 활용되었으며, 시뮬레이션을 통해서 다중 목표물의 위치 추정 성능을 분석하였다. 추가적으로 같은 레인지 bin에 두 개 이상의 목표물이 존재할 경우, 각 목표물의 마이크로 모션에 해당하는 주파수를 추출하는 기법을 연구하였고, 이 또한 시뮬레이션을 통해 성능이 분석되었다. 시뮬레이션 결과로부터 알고리즘을 통한 다중 목표물의 위치 추정이 가능한 것을 확인하였고, SNR뿐만 아니라 마이크로 도플러가 기하학적인 구조에 영향을 받음에 따라 제안된 알고리즘 또한 성능에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 향후 연구로는 추가적인 회전운동 및 세차운동 주파수 환경에서의 알고리즘 성능 분석과 거리 분류 및 동일 레인지 bin에 두 개 이상의 목표물이 존재할 경우, 주파수를 분류할 때 내적이 아닌 보다 신뢰성이 높고 경제적인 알고리즘을 적용하여 계산량을 줄이고, 다른 목표물 간에 특징을 극대화시켜 알고리즘의 정확도를 향상시킬 수 있는 방안을 연구할 계획이다.

References

[1] H. Gao, L. Xie, S. Wen, and Y. Kuang, "Micro-Doppler

signature extraction from ballistic target with micro-motions", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 46, no. 4, pp. 1969-1982, 2010.

[2] C. Clemente, J. J. Soraghan, "Vibrating target micro-Doppler signature in bistatic SAR with a fixed receiver", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 50, no. 8, pp. 3219-3227, Aug. 2012.

[3] J. J. M. De Wit, R. Harmanny, and P. Molchanov, "Radar micro-Doppler feature extraction using the singular value decomposition", in *Proc. IEEE Int. Radar Conf.*, Lille, France, pp. 1-6, Oct. 2014.

[4] Y. Kim, S. Ha, and J. Kwon, "Human detection using Doppler radar based on physical characteristics of targets", *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 12, no. 2, pp. 289-293, Feb. 2015.

[5] S. Björklund, H. Petersson, and G. Hendeby, "Features for micro-Doppler based activity classification", *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 9, no. 9, pp. 1181-1187, Dec. 2015.

[6] Y. Kim, H. Ling, "Human activity classification based on micro Doppler signatures using a support vector machine", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 5, pp. 1328-1337, May 2009.

[7] 박지훈, 최익환, 명로훈, "수정된 HHT 기법을 이용하여 회전하는 프로펠러 날개에 의한 마이크로 도플러 신호의 해석", *한국전자과학회논문지*, 23(9), pp. 1100-1106, 2012년 9월.

[8] W. Q. Wang, J. Y. Cai, and Q. C. Peng, "Models and signal processing for millimeter-wave LFM SAR imaging", *Proc. of IEEE Aerospace Conf.*, Big Sky, USA, 2008.

[9] P. Lei, J. Sun, J. Wang, and W. Hong, "Micromotion parameter estimation of free rigid targets based on radar micro-Doppler", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 50, no. 10, pp. 3776-3786, Oct. 2012.

[10] H. Hossein, *Singular Spectrum Analysis : Methodology and Comparison*, J. Data Sci, pp. 239-257, 2007.

유 경 우



2012년 2월: 인하대학교 전기공학전공 (공학사)
2014년 2월: 한국과학기술원 조천식녹색
교통대학원 (공학석사)
2015년 3월~현재: 한국과학기술원 전기
및 전자공학부 박사 과정
[주 관심분야] Signal Processing for Radar
Systems

류 충 호



2000년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학
사)
2012년 2월: 충남대학교 전자정보통신공
학과 (공학석사)
2001년 7월~현재: 국방과학연구소 선임
연구원
[주 관심분야] 레이더 신호 처리

전 주 환



1980년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학
사)
1984년 2월: Cornell University 전자공학과
(공학석사)
1989년 2월: Stanford University 전자공학
과 (공학박사)
1992년 2월~현재: 한국과학기술원 전기

및 전자공학부 교수

[주 관심분야] Signal Processing for Wireless Communication,
Signal Processing for Radar Systems, Detection and Estimation