

FMCW 레이더의 2 차원 배열 안테나를 활용한 비행체 3 차원 속도 벡터 추정 기법

김지혜, 김성철

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소

{jihyekim224, sckim}@maxwell.snu.ac.kr

3-D Velocity Vector Estimation of Aerial Targets Using FMCW Radar with 2-D Antenna Array

Jihye Kim, Seong-Cheol Kim

Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ.

요약

기존 레이더 시스템의 속도 추정은 타겟의 1 차원 방향 속도만을 추정할 수 있으므로 3 차원으로 이동하는 비행체의 탐지 및 추적 성능에 한계점이 존재한다. 본 논문에서는 FMCW (frequency-modulated continuous wave) 레이더의 2 차원 배열 수신 안테나를 활용하여 타겟의 3 차원 속도 벡터를 추정하는 기법을 제안한다. 쳐프와 안테나 인덱스의 커플링에 의해 발생하는 위상 성분을 분석하여 두 개의 횡방향 속도 추정값을 얻어 속도 벡터를 추정한다. 시뮬레이션 결과, SNR(signal-to-noise ratio)이 -10 dB 일 때 임의의 타겟에 대해 평균적으로 약 1.93 m/s의 속도 벡터 추정 오차를 가짐을 확인하였다.

I. 서 론

드론, UAM(urban air mobility) 등 비행체의 운행 안전성 확보를 위해 센서를 이용한 환경 모니터링의 필요성이 제기되어 왔다.[1] 레이더는 전파를 송수신하여 주변 타겟의 거리, 각도, 속도를 탐지할 수 있는 센서로 날씨 및 조명 조건에 대한 강인함과 긴 거리를 가지고 있기 때문에 비행체의 모니터링 시스템에 적합한 센서이다.[1]

기존 레이더 시스템의 속도 추정은 레이더로부터 타겟을 향하는 방사 방향의 1 차원 속도만을 추정한다.[2] 하지만 비행체의 경우 3 차원 속도 벡터를 가지므로 기존 속도 추정 기법은 제한적인 정보만을 추정하여 타겟 탐지 및 추적 성능의 열화가 야기된다. 이를 극복하기 위해 배열 안테나를 이용한 횡방향 속도 추정 기법이 제안된 바 있으나, 이는 타겟의 2 차원 속도 벡터만을 추정할 수 있다는 한계점을 가진다.[3]

본 논문에서는 2 차원으로 배열된 수신 안테나를 사용하는 FMCW(frequency-modulated continuous wave) 레이더를 이용하여 타겟의 3 차원 속도 벡터를 탐지하는 기법을 제안한다. 또한 시뮬레이션 결과를 분석하여 제안 기법의 성능을 평가한다.

II. FMCW 레이더 신호 모델

FMCW 레이더는 주파수가 선형적으로 증가하는 쳐프 신호를 송수신하는 레이더로, 수신 신호와 송신 신호를 믹싱하여 비트 신호를 생성한다. 여러 쳐프 신호를 시간에 따라 연속적으로 송신하고 다수의 안테나로 신호를 수신하는 경우, 비트 신호의 수식은 다음과 같이 표현된다.

$$x(p, n, m) \approx a_0 \exp \left[j2\pi \left(\frac{2SR}{cf_s} p + \frac{2r_{\Delta}(n, m)}{\lambda} \right) \right] \quad (1)$$

이때 p , n , m 은 각각 시간 샘플, 수신 안테나, 쳐프의 인

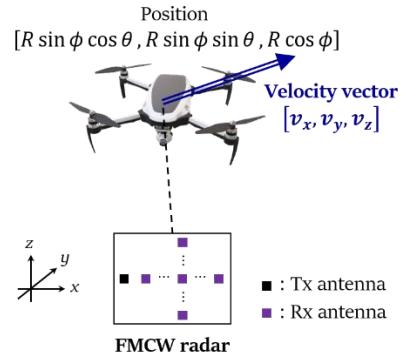


그림 1. 2 차원 배열 안테나를 활용한 FMCW 레이더 시스템 모델

택스를, a_0 는 복소 진폭을, S 와 λ 는 쳐프 신호의 시간-주파수 기울기와 파장을, f_s 는 샘플링 주파수를, R 은 레이더와 타겟 사이 거리를, c 는 빛의 속도를 의미한다. 따라서 비트 신호의 p 에 대한 주파수를 추정하여 타겟의 거리 추정값, \hat{R} ,을 얻을 수 있으며, 위상 성분 분석을 통해 n 과 m 에 대해 발생하는 타겟의 미세한 거리 변화인 $r_{\Delta}(n, m)$ 를 탐지함으로써 타겟의 속도와 각도를 추정할 수 있다.[2]

기존의 레이더 시스템은 타겟의 거리 변화를 m 과 n 에 대한 1 차식으로 근사하여 사용하지만, 본 기법에서는 m 과 n 의 커플링(coupling)에 의한 항을 추가로 고려한다. 수신 안테나가 x 축 상에 균등하게 배열되어 있다고 가정했을 때, 아래와 같이 식을 근사할 수 있다.

$$r_{\Delta,x}(n, m) \approx -\frac{d \cos \psi}{2} n + v_r T_c m + \frac{v_{l,ant} d T_c \sin \psi}{2R} mn \quad (2)$$

이때 d 는 안테나 간 간격을, T_c 는 쳐프 간 시간 간격을 ψ 는 x 축과 타겟 사이의 각도를, v_r 은 타겟의 방사 방향 속도를, $v_{l,x}$ 는 타겟의 x 축에 대한 횡방향 속도를 의미한다.

이때 $\cos\psi = \sin\phi \cos\theta$ 가 성립하며, θ 와 ϕ 는 각각 타겟의 azimuth 각도와 elevation 각도이다. 마찬가지로 수신 안테나가 z 축 상에 균등하게 배열되어 있다고 가정했을 때, 아래와 같이 식을 근사할 수 있다.

$$r_{\Delta z}(n, m) \approx -\frac{d \cos\phi}{2} n + v_r T_c m + \frac{v_{l,z} d T_c \sin\phi}{2R} mn \quad (3)$$

이때 $v_{l,z}$ 는 타겟의 z 축에 대한 횡방향 속도를 의미한다.

세 가지 속도 성분 v_r , $v_{l,x}$, $v_{l,z}$ 은 타겟의 실제 속도 벡터를 각각 다음의 단위 벡터로 투영한 값에 해당한다.

$$\begin{aligned} \vec{a}_r &= [\sin\phi \cos\theta, \sin\phi \sin\theta, \cos\phi]^T, \\ \vec{a}_{l,x} &= \left[\sin\psi, -\frac{\sin\phi \sin\theta}{\tan\psi}, -\frac{\cos\phi}{\tan\psi} \right]^T, \\ \vec{a}_{l,z} &= [-\cos\phi \cos\theta, -\cos\phi \sin\theta, \sin\phi]^T \end{aligned} \quad (4)$$

III. 3 차원 속도 벡터 추정 기법

본 논문에서는 그림 1 과 같은 2 차원 배열 안테나를 사용한다고 가정한다. 기준의 신호 처리 방법에 따라, 비트 신호의 x 축과 z 축 배열 안테나 인덱스에 대한 주파수를 추정하여 타겟의 azimuth 와 elevation 각도 추정값, $\hat{\theta}$ 와 $\hat{\phi}$ 를 얻을 수 있으며, 쳐프 인덱스에 대한 주파수를 추정하여 타겟의 방사 방향 속도 추정값, \hat{v}_r , 을 얻을 수 있다. 추가적으로 커플링에 의한 항을 분석하기 위해 배열 안테나를 두 개의 부배열로 나누어 부배열들의 신호를 나눈 간섭 신호를 계산한다. 그리고 그림 2 와 같이 unwrapping 된 간섭 신호의 위상 성분에 최소자승법을 통한 선형 회귀를 적용하여 위상 변화율을 추정한다.[3] 이때 x 축과 z 축 상의 안테나 배열에 대해 추정된 위상 변화율이 \hat{k}_x 와 \hat{k}_z 라고 했을 때, x 축과 z 축에 대한 횡방향 속도는 각각 다음과 같은 식으로 추정될 수 있다.

$$\hat{v}_{l,x} = \frac{\lambda \hat{R} \hat{k}_x}{2\pi D T_c \sin\hat{\psi}}, \quad \hat{v}_{l,z} = \frac{\lambda \hat{R} \hat{k}_z}{2\pi D T_c \sin\hat{\phi}} \quad (5)$$

이때, D 는 두 안테나 부배열의 중심 사이 거리를 의미한다.

최종적으로, 타겟의 속도 벡터는 다음의 행렬식으로 추정할 수 있다.

$$[\hat{v}_x, \hat{v}_y, \hat{v}_z]^T = ([\vec{a}_r, \vec{a}_{l,x}, \vec{a}_{l,z}]^T)^{-1} [\hat{v}_r, \hat{v}_{l,x}, \hat{v}_{l,z}]^T \quad (6)$$

이때, $\vec{a}_r, \vec{a}_{l,x}, \vec{a}_{l,z}$ 는 각도 추정값을 식 (4)에 대입하여 구한 단위 벡터이다.

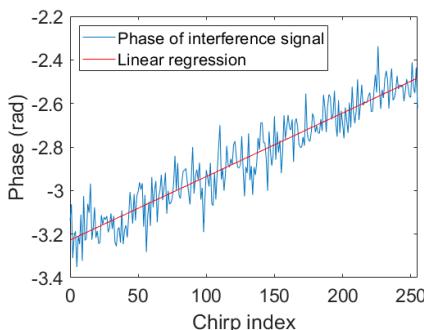


그림 2. 간섭 신호의 위상 성분의 선형 회귀

IV. 시뮬레이션 결과

제안된 3 차원 속도 벡터 추정 기법의 성능을 평가하기 위해 표 1 의 FMCW 레이더 파라미터를 이용한 시뮬레이션을 진행하였다. 타겟 신호의 SNR(signal-to-noise ratio)은 -10 dB로, D 는 8λ로 설정하였다. 그림 3은 위치가 [-5 m, 10 m, -3 m]이고 속도 벡터가 [30 m/s, 10 m/s, -10 m/s]인 타겟에 대한 3 차원 위치 및 속도 벡터 추정 결과를 보여준다. 이때 속도 벡터 추정 오차의 L2 norm은 0.49 m/s로 나타났다.

그림 4 는 SNR 에 따른 속도 벡터 추정 오차의 L2 norm 의 평균을 나타내며 총 500 번의 반복 시행을 통해

계산되었다. 매 시행에서 타겟의 거리는 5 m에서 50 m의 범위에서, azimuth 와 elevation 각도는 30°에서 150°의 범위에서, 절대 속도는 30 m/s 이하에서, 속도 벡터의 방향은 전체 각도 구간에서 균등 분포를 따라 임의의 값을 갖도록 설정하였다. 그 결과, SNR 이 증가할수록 추정 오차가 줄어들었으며, -10 dB 의 SNR 에서는 약 1.93 m/s 의 평균 속도 벡터 추정 오차가 발생함을 확인하였다.

추후 연구에서는 다양한 레이더 파라미터에 대한 제안 기법의 성능 분석을 수행할 예정이며, 또한 잡음에 강인한 속도 벡터 추정 기법에 대해 연구할 계획이다.

표 1. FMCW 레이더 파라미터

파라미터	값	파라미터	값
반송 주파수	77 GHz	처프 당 샘플 수	256
처프 시간-주파수 기울기	30 MHz/μs	프레임 당 처프 수	256
샘플링 주파수	15 MHz	처프 간 시간 간격	25 μs
안테나 간 간격	$\lambda/2$	송신 안테나 개수	1
x 축 수신 안테나 개수	32	z 축 수신 안테나 개수	32

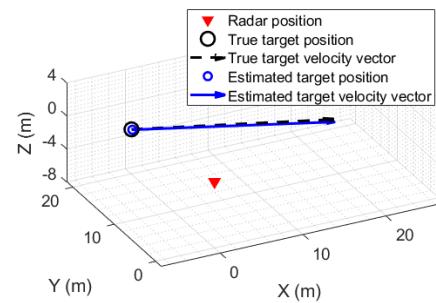


그림 3. 3 차원 위치 및 속도 벡터 추정 결과

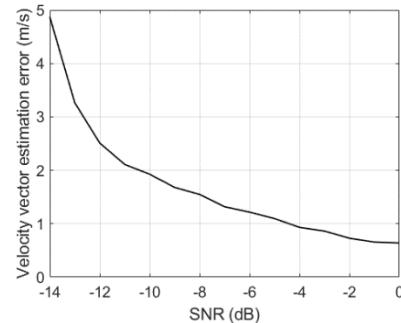


그림 4. SNR에 따른 속도 벡터 추정 평균 오차

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2021-II212048).

참 고 문 헌

- [1] P. Hügler, F. Roos, M. Schartel, M. Geiger, and C. Waldschmidt, "Radar taking off: New capabilities for UAVs," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 19, no. 7, pp. 43–53, Nov. 2018.
- [2] M. Jankiraman, *FMCW Radar Design*. MA, USA: Artech House, 2018.
- [3] M. Li, X. Wu, Z. Chen, J. Liu, W. J. Emery, and C. Li, "A scheme for multitarget lateral velocity measurement with high-frequency monostatic radar," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 45, no. 4, pp. 1427–1438, Oct. 2020.