무선랜 표준 (IEEE 802.11ad) 파형 기반 레이다 이미징

한건호, 최준일*
한국과학기술원, *한국과학기술원

ghhan6@kaist.ac.kr, *junil@kaist.ac.kr

Radar Imaging Based on IEEE 802.11ad Waveform

Han Geonho, Choi Junil*
KAIST, *KAIST

요 약

본 논문은 밀리미터파 대역 기반의 무선랜 표준 파형을 이용한 차량 환경에서의 레이다 이미징 기법을 고안하였다. 역합성 개구 레이다 (ISAR) 이미징을 구현하기 위해 지연시간, 도플러 편이, 차량 속도를 추정하였고, 추정된 변수들로부터 차량 이미지를 구성하였다. 제안된 레이다 이미징 기법은 실제 차량에 기반한 모델과 비교하여 고해상도의 유사한 이미지를 획득할 수 있음을 입증한다.

Ⅰ. 서 론

통신 주파수 대역이 밀리미터파 대역까지 확장되면서 물리적 공간과 전력 소비를 줄일 수 있는 레이다 및 통신 통합 시스템 개발이 가능해지고 있다 [1]. 레이다 및 통신 통합 시스템은 레이다의 기능이 필수적인 차량 환경을 고려하는 차량·사물 (V2X) 통신에서 유용할 것으로 예상된다 [2],[3]. 레이다 및 통신 통합 시스템과 관련하여 성능 트레이드오프, 레이다 빔 패턴 디자인 등과 같은 연구들이 진행되었지만 다중 표적 모델에 기반한 고해상도를 갖는 레이다 이미징 기법은 연구되지 않았다 [4],[5]. 차량 환경에서 무선랜 표준 (IEEE 802.11ad) 파형을 이용한 레이다 기능 구현 및 성능 검증 연구는 진행되었으나, 본 논문에서는 무선랜 표준 파형에 기반한 레이다 이미징 기법을 통해 센싱 기능을 확장시킨다 [6]. 이는 레이다 및 통신 통합 시스템이 어떠한 센서도 없이 주위 환경을 인지하고 이미징할 수 있음을 증명한다.

Ⅱ. 본론

본 논문에서는 그림. 1 과 같이 노변장치 (roadside unit)가 차량에 통신 신호를 송신하는 상황에서 차량으로부터 반사된 신호를 처리하여 레이다 이미징에 필요한 변수들을 추정하고 이미지를 구성하는 방법을 제안한다.

노변장치의 통신용 송신 안테나와 레이다 수신 안테나가 동일한 위치에 배치될 때 레이다 채널은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H}_{\mathrm{rad}}(t)=\sum_{p=0}^{N_p-1}\sqrt{G_p(t)}\beta_p e^{j2\pi\nu_p(t)t}e^{-j2\pi\tau_p(t)f_c}\times\mathbf{a}_{\mathrm{RX}}^{*}(\varphi_p(t),\theta_p(t))\mathbf{a}_{\mathrm{TX}}^{\mathrm{H}}(\varphi_p(t),\theta_p(t))$$

위에서 N_p는 차량의 주요 산란체 개수, $G_p(t)$는 레이다 반사 면적 (radar cross section)과 경로 손실 (path-loss)에 의한 채널 이득, β_p는 소규모 채널 이득, $\nu_p(t)$와 $\tau_p(t)$는 각각 도플러 편이와 지연시간, f_c는 파장 λ에 대한 반송 주파수, $(\varphi_p(t),\theta_p(t))$는 신호의 방위각과 고각이다.

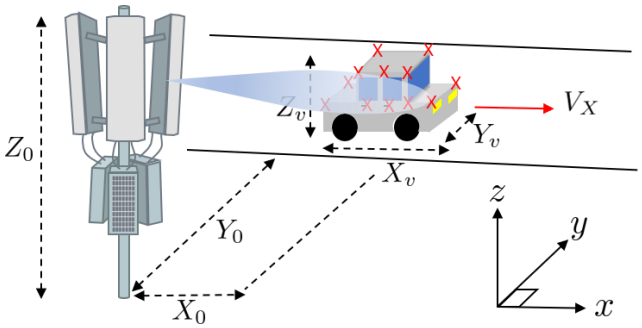

그림. 1 본 논문에서 고려하는 차량·인프라 (V2I) 통신 시나리오. 노변장치로부터 차량까지의 유클리드 거리는 $R_0=\sqrt{X_0^2+Y_0^2+Z_0^2}$이다.

노변장치에서 K개의 샘플로 구성된 M개의 프레임을 송신했을 때 위의 레이다 채널을 통과한 수신 신호를 표본 추출 (sampling)하여 이산 시간 도메인에서 나타내면 다음과 같다.

$$y[m,k]=\sum_{p=0}^{N_p-1}\sqrt{E_s}h_p e^{j2\pi\nu_p^m(k+mK)T_s}s\left[k-\ell_p^m\right]+z[m,k]$$

위에서 $k\,(\ell_0^m,\ell_0^m+1,\ldots,K-1+\ell_{N_p-1}^m)$ 와 $m\,(0,1,\ldots,M-1)$은 샘플 및 프레임 인덱스이고, E_s는 송신 심볼 에너지, h_p는 에너지가 1 인 송신 신호에 대한 반사 신호의 세기, T_s는 심볼 주기, ℓ_p^m은 수신 신호의 지연시간, $s[k]$는 송신 심볼, $z[m,k]$는 클러터의 영향이 더해진 잡음을 나타낸다.

레이다 이미징을 수행하기 위해 무선랜 표준 (IEEE 802.11ad) 파형의 앞 블록에 있는 Golay 시퀀스의 자기 상관관계를 통해 지연시간 ℓ_p^m을 추정한다. 문턱 값 (threshold)을 잡음과 Golay 시퀀스의 상관관계 상계로 설정하고, 512 개의 Golay 시퀀스와 수신 신호의 상관관계가 문턱 값보다 큰 값을 갖는 인덱스로부터 주요 산란체들의 지연시간을 추정할 수 있다. 지연시간 추정 과정은 먼저 가장 큰 상관관계를 갖는 인덱스로부터 하나의 지연시간을 얻어내고, 그 지연시간을 기준으로 문턱 값보다 큰 인덱스로부터 나머지 지연시간을 추정한다.

도플러 편이는 두 프레임에서의 레이다 채널을 최소제곱법으로 추정하여 얻어진다. 무선랜 표준 파형의 짧은 심볼 주기로 인해 0 번째 프레임에서 수신 신호는 다음과 같이 근사된다.

$$y[0,k] \approx \sum_{p=0}^{\hat{N}_p-1} \sqrt{E_s} s\left[k-\hat{\ell}_p^0\right] h_p + z[0,k]$$

모든 샘플 인덱스에 대한 수신 신호들을 통합하여 벡터 및 행렬 형태로 나타낼 수 있고, 최소제곱법을 이용하여 h_p 를 성분으로 갖는 벡터를 추정한다. m 번째 프레임에서는 0 번째 프레임에서의 근사를 동일하게 적용시킬 수 없지만 $k \ll mK$ 에 기반하여 지수 함수 위상에 있는 k 를 수신 샘플의 중점으로 고정시키면 다음과 같이 얻어진다.

$$y[m,k] \approx \sum_{p=0}^{\hat{N}_p-1} \sqrt{E_s} s\left[k-\hat{\ell}_p^m\right] h_p e^{j2\pi v_p^m\left(\left(\hat{\ell}_0^m+\hat{\ell}_{\hat{N}_p-1}^m+K-1\right)/2+mK\right)T_s} + z[0,k]$$

m 번째 프레임에서는 $h_p e^{j2\pi v_p^m\left(\left(\hat{\ell}_0^m+\hat{\ell}_{\hat{N}_p-1}^m+K-1\right)/2+mK\right)T_s}$ 을 성분으로 갖는 벡터를 최소제곱법으로 추정한다. 두 프레임에서 얻어진 레이다 채널로부터 도플러 편이 $\hat{v}_p^m$를 얻어내고, 빠른 속도로 인한 위상 회전도 보상한다.

앞서 추정한 지연시간과 도플러 편이에 추가적으로 역합성 개구 레이다 이미지를 획득하기 위해서는 각속도를 구성하는 차량 속도를 추정해야 한다. 이는 도플러 편이 추정치와 한 상관 처리 시간 (coherent processing interval, CPI) 동안의 운동 방정식으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\hat{V}_X = \sqrt{\frac{\lambda R_0(\hat{v}_p^0 - \hat{v}_p^{M-1})}{2 \cdot \mathrm{CPI}}}$$

추정된 변수들을 기반으로 역합성 개구 레이다 이미지를 구성하는 레인지 (range) 및 크로스 레인지 (cross-range) 단면도를 주요 산란체가 존재하는 위치에 배치하여 사전 이미지를 만들고, 사전 이미지를 크로스 레인지 방향으로 고속 푸리에 변환 (FFT)하여 그림. 2 와 같은 최종 이미지를 획득한다. 그림. 2 는 점 산란체 차량 모델과 비교하여 역합성 개구 레이다 이미지가 동일한 크기를 보여주고, 무선랜 표준 파형의 넓은 주파수 대역과 고 반송 주파수 (high carrier frequency)으로 인해 본 논문에서 제안한 레이다 이미징 기법이 차량 모델에 벗어나지 않는 고해상도 이미징임을 확인할 수 있다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 차량·인프라 통신 상황에서 무선랜 표준 파형을 이용하여 지연시간, 도플러 편이, 차량 속도를 추정하고 역합성 개구 레이다 이미징 기능을 구현하였다. 파형에 존재하는 Golay 시퀀스의 자기 상관관계 특성으로부터 주요 산란체들로부터 반사된 신호의 지연시간을 추정하였고, 수신 신호 근사와 최소제곱법을 통해 도플러 편이를 추정하였으며, 차량 속도는 도플러 편이 추정치와 운동 방정식으로부터 얻어졌다. 추정된 변수들로부터 역합성 개구 레이다 이미지를 획득하여 무선랜 표준이 레이다 이미징에 적합한 파형임을 입증하였다. 기존에는 레이다 및 통신 통합 시스템에서 레이다의 타겟 탐지 및 속도 추정과 같은 센싱 기능을 활용하여 통신 성능을 극대화하는 것에 집중하였지만 레이다 이미징 기능이 추가되면 다양한 활용 방안을 고려해볼 수 있다.

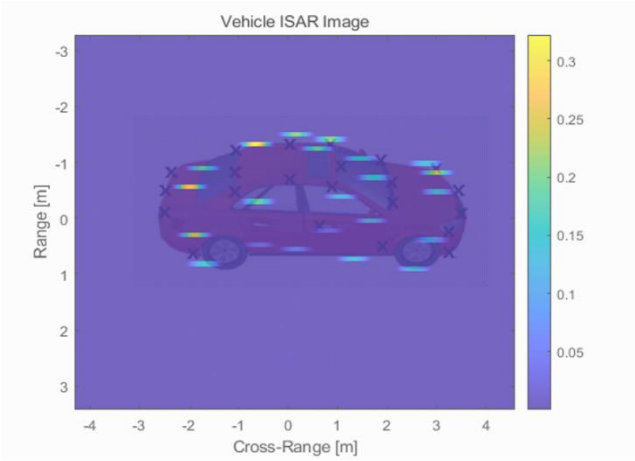

그림. 2 점 산란체 모델과 무선랜 표준 파형을 이용하여 얻어진 역합성 개구 레이다 이미지 비교

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 2019 년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019R1C1C1003638).

참 고 문 헌

[1] J. Choi, V. Va, N. Gonzàlez-Prelcic, R. Daniels, C. R. Bhat, and R. W. Heath, “Millimeter-Wave Vehicular Communication to Support Massive Automotive Sensing,” IEEE Commun. Mag., vol. 54, no. 12, pp. 160-167, 2016.

[2] S. Chen, J. Hu, Y. Shi, Y. Peng, J. Fang, R. Zhao, and L. Zhao, “Vehicleto-Everything (V2X) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G,” IEEE Commun. Standards Mag., vol. 1, no. 2, pp. 70-76, 2017.

[3] K. Abboud, H. A. Omar, and W. Zhuang, “Interworking of DSRC and Cellular Network Technologies for V2X Communications: A Survey,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 65, no. 12, pp. 9457-9470, Dec. 2016.

[4] A. R. Chiriyath, B. Paul, G. M. Jacyna, and D. W. Bliss, “Inner Bounds on Performance of Radar and Communications Co-Existence,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 64, no. 2, pp. 464-474, Jan. 2016.

[5] F. Liu, C. Masouros, A. Li, H. Sun, and L. Hanzo, “MU-MIMO Communications With MIMO Radar: From Co-Existence to Joint Transmission,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 17, no. 4, pp. 2755-2770, Apr. 2018.

[6] P. Kumari, J. Choi, N. Gonzàlez-Prelcic, and R. W. Heath, “IEEE 802.11ad-Based Radar: An Approach to Joint Vehicular Communication-Radar System,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 67, no. 4, pp. 3012-3027, 2017.