

ISAC 를 통한 차량 네트워크 성능 향상: 예측 동적 빔포밍 접근

신정인, 정재민, 강진규
명지대학교 정보통신공학과

tictoc0215@mju.ac.kr, jmjung@mju.ac.kr, jkkang@mju.ac.kr

Performance Enhancement of Vehicular Networks with ISAC: Predictive Dynamic Beamforming Approach

Jungin Shin, Jaemin Jung, Jinkyu Kang
Myongji University

요약

본 논문은 차량 네트워크의 통신 성능 향상을 위해 예측 동적 빔포밍과 지능형 옴니 표면(IOUS) 기술을 결합하여 통신과 차량의 위치 파악 성능을 향상시키는 2 단계 ISAC 프로토콜을 제안하고, 전송 전력, IOS 위상 편이 계수, 그리고 S&C 단계의 지속 시간을 공동으로 최적화하여 차량 내부 디바이스의 달성 가능한 전송량 최대화 문제를 공식화한다.

I. 서론

통합 센싱 및 통신(ISAC: Integrated Sensing And Communication)기술의 발전은 차량 네트워크에서 높은 처리량과 낮은 지연 시간의 통신을 가능하게 할 뿐만 아니라 고해상도 위치 파악에 필요한 요구 사항을 충족할 수 있다[1]. 특히, ISAC 을 활용하여 빔트레이닝 단계에 소모되는 자원을 획기적으로 줄이는 예측 빔포밍을 통해 차량 간 네트워크의 통신 성능을 향상시킬 수 있다[2]. 또한, 동적 빔을 활용해 정확한 차량의 위치 추정 및 달성 전송률의 향상을 기대할 수 있다[2]. 하지만, 차량 내부의 디바이스의 통신 성능 향상은 기존의 ISAC 기반 예측 빔포밍 접근으로는 한계가 있다. 이 문제를 해결하기 위해 지능형 옴니 표면(IOUS: Intelligent Omni Surface)을 채택한다[3]. IOS 는 입사 신호를 유연하게 반사 및 굴절시켜 에코 신호 세기 강화 및 페이딩 손실 감소를 통해 센싱과 통신의 성능을 향상시킨다[2].

본 논문에서는, 차량 내부의 디바이스의 통신 성능을 보장하기 위해 센싱&통신(S&C) 단계와 통신 전용(C) 단계로 구성된 2 단계 ISAC 예측 동적 빔포밍 프로토콜을 제안한다. 전송 전력, IOS 위상 편이 계수, 그리고 S&C 단계의 지속 시간을 공동으로 최적화하여 차량 내부 디바이스의 달성 가능 전송량을 최대화하는 문제를 공식화한다.

II. 본론

본 논문에서는 그림 1 처럼 로드사이드 유닛(RSU: Road Side Unit)과 IOS 를 탑재한 한 대의 차량 간의 2 단계 통신 네트워크를 고려한다. 먼저 S&C 단계에서는 IOS 로 들어오는 신호의 전력의 일부를 각각 RSU 와 차량 내의 디바이스로 분배하여 센싱 및 통신의 성능을 모두 향상시키고, 차량의 위치 확인과 차량 추적을 위해 동적 빔을 전송한다. C 단계에서는 이전 단계의 센싱 결과를 바탕으로 좁은 빔을 통해 디바이스에 신호 전력을 집중시킨다.

고려되는 시나리오에서 차량의 각도, 거리 및 속도는 시간 $t \in [0, T]$ 의 함수로 간주한다. 여기서 T 는 RSU 의 최대 서비스 시간이고, 이를 동일한 길이의 시간 슬롯 ΔT 로 나누면 각 시간 슬롯 $n \in \mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ 이고 여기서 $N = \frac{T}{\Delta T}$ 이다. RSU 는 x 축을 따라 $M_{t,n}$ 개의 송신

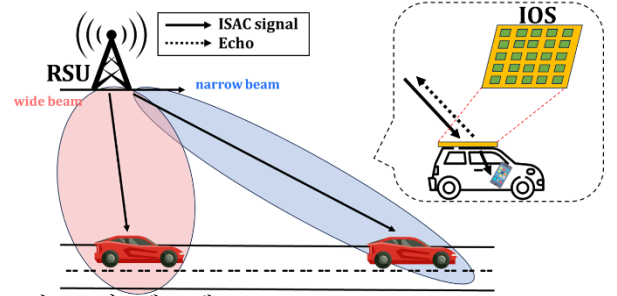


그림 1. 시스템 모델

안테나가 있는 균일 선형 어레이(ULA: Uniform Linear Array)를 사용하고, x 축과 y 축을 따라 각각 M_r 개의 수신 안테나가 있는 두 개의 수직 ULA 를 사용한다고 가정하며, 차량은 x 축과 평행한 직선 도로를 따라 주행한다. IOS 에는 균일 평면 배열(UPA: Uniform Planar Array)이 장착되어 있고 IOS 소자의 수는 $L = L_x \times L_y$ 이며, L_x 와 L_y 는 각각 x 축과 y 축 소자의 수를 나타낸다. 이때, ULA 와 UPA 는 반파장의 안테나 간격을 따른다. RSU-IOS 채널은 자유 공간 경로 손실 모델을 따르며 채널 전력 이득은 $\beta_{G,n} = \beta_0 d_n^{-2}$ 으로 표현할 수 있다. 이때 β_0 는 기준 거리 1(m)에서 채널 전력이고 d_n 은 n 번째 시간 슬롯에서 RSU 부터 IOS 까지의 거리를 나타낸다. $H_n^{DL} \in \mathbb{C}^{M_{t,n} \times L}$ 은 RSU 와 IOS 사이의 다운링크 채널 행렬이며 다음과 같다.

$$H_n^{DL} = \sqrt{\beta_{G,n}} a_{IOS}(\phi_n - \varphi_n) a_{RSU}^T(\varphi_n). \quad (1)$$

이때 φ_n 는 RSU 의 x 축과 IOS 와의 각도, ϕ_n 는 RSU 의 y 축과 IOS 와의 각도를 의미한다. RSU 의 전송 조향 벡터는 $a_{RSU}(\varphi_n) = \frac{1}{\sqrt{M_{t,n}}} [1, \dots, e^{-j\pi(M_{t,n}-1)\cos(\varphi_n)}]^T$ 이고, IOS 의 전송 조향 벡터는 $a_{IOS}(\phi_n - \varphi_n) = [1, \dots, e^{j\pi(L_x-1)\cos(\phi_n)}]^T \otimes [1, \dots, e^{j\pi(L_y-1)\cos(\phi_n)}]^T$ 이고, $\cos(\varphi_n) = \sin(\psi_n^z) \cos(\psi_n^x)$, $\cos(\phi_n) = \sin(\psi_n^z) \sin(\psi_n^x)$ 이다. \otimes 는 Kronecker product 을 의미하고, ψ_n^x 및 ψ_n^z 는 차량의 IOS 와 RSU 를 연결하는 기하학적 경로의 방위각 및 고도각이다. $H_n^{UL,x}$, $H_n^{UL,y} \in \mathbb{C}^{L \times M_r}$ 은 IOS 와 RSU 사이의 업링크 채널 행렬이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_n^{UL,x} = \sqrt{\beta_{G,n}} b_{RSU}(\phi_n) a_{IOS}^T(\phi_n - \varphi_n). \quad (2)$$

$$H_n^{UL,y} = \sqrt{\beta_{G,n}} b_{RSU}(\varphi_n) a_{IOS}^T(\phi_n - \varphi_n). \quad (3)$$

RSU의 수신 조향 벡터는 $b_{RSU}(x) = [1, \dots, e^{-j\pi(M_t-1)\cos(x)}]^T$ 이다. IOS와 차량 내부의 디바이스 사이의 채널은 각 전송 프레임 동안의 가시거리(LoS: Line Of Sight) 채널로 간주되며 h 로 표현한다. $\xi \in \{S\&C, C\}$ 단계에서 IOS의 굴절(T) 및 반사(R) 계수 행렬은 각각 $\theta_n^{\xi,T} = \text{diag}(\sqrt{\beta_{l,n}^{\xi,T}}, e^{j\theta_{1,n}^{\xi,T}}, \dots, \sqrt{\beta_{L,n}^{\xi,T}} e^{j\theta_{L,n}^{\xi,T}})$, $\theta_n^{\xi,R} = \text{diag}(\sqrt{\beta_{l,n}^{\xi,R}}, e^{j\theta_{1,n}^{\xi,R}}, \dots, \sqrt{\beta_{L,n}^{\xi,R}} e^{j\theta_{L,n}^{\xi,R}})$ 으로 표현된다. $\beta_{l,n}^{\xi,T}$ 는 IOS의 입사 신호 중 굴절 신호의 분할 비율이고, $\beta_{l,n}^{\xi,R}$ 는 반사 신호의 분할 비율이다. $\beta_{l,n}^{\xi,T} + \beta_{l,n}^{\xi,R} = 1$, $\beta_{l,n}^{\xi,T}, \beta_{l,n}^{\xi,R} \in [0,1]$ 을 만족한다. 또한, $\theta_{l,n}^{\xi,T}, \theta_{l,n}^{\xi,R} \in [0, 2\pi)$ 는 각각 IOS의 $l \in \mathcal{L} = \{1, \dots, L\}$ 번째 요소의 굴절 및 반사 위상 편이를 나타낸다. 차량의 상태 진화 모델은 [4]에 따라 다음처럼 주어진다.

$$\begin{cases} \varphi_{n|n-1} = \varphi_{n-1} + d_{n-1}^{-1} v_{n-1} \Delta T \sin(\varphi_{n-1}) + \omega_\varphi \\ \phi_{n|n-1} = \phi_{n-1} + d_{n-1}^{-1} v_{n-1} \Delta T \tan(\phi_{n-1}) + \omega_\phi \\ d_{n|n-1} = d_{n-1} - v_{n-1} \Delta T \cos(\varphi_{n-1}) + \omega_d \\ v_{n|n-1} = v_{n-1} + \omega_v \end{cases} \quad (4)$$

이를 바탕으로 확장 칼만 필터링(EKF: Extended Kalman Filtering) 기법을 사용하여 빔 추적의 정확성을 높인다[2]. 차량이 Time-Doppler 영역 내에서 구별될 수 있다고 가정하여 매칭 필터링 함수[4]를 통과한 에코 신호 \tilde{r}_n^x 를 기반으로, 최대 가능도(MLE: Maximum Likelihood Estimation) 방법[5]이나 다중 신호 분류(MUSIC: Multiple Signal Classification) 방법[6]을 통해 φ_n 와 ϕ_n 를 측정할 수 있다. 차량 내 디바이스의 달성 가능 전송량을 극대화하기 위해 차량에 대한 전송 빔포밍 벡터를 추정 및 측정 결과에 따라 정렬하며 S&C 단계와 C 단계의 동적 빔포밍 벡터는 각각 다음처럼 나타낼 수 있다[1][2].

$$f_n^{S\&C} = \sqrt{p_n^{S\&C}} a_{RSU}(\varphi_{n|n-1}). \quad (5)$$

$$f_n^C = \sqrt{p_n^C} \bar{a}_{RSU}(\tilde{\varphi}_n). \quad (6)$$

여기서 C 단계의 좁은 빔의 조향 벡터는 $\bar{a}_{RSU} = \frac{1}{\sqrt{M_t}} [1, \dots, e^{-j\pi(M_t-1)\cos(\varphi_n)}]^T$ 으로 표현되며, $p_n^{S\&C}, p_n^C$ 은 각 단계의 전력이고 $\varphi_{n|n-1}, \tilde{\varphi}_n$ 은 각각 (n-1) 번째 측정값을 기반으로 한 n 번째 에포크에서의 추정각도, 추적각도이다. S&C 단계의 $f_n^{S\&C}$ 의 빔폭은 차량 전체를 커버해야 하므로 RSU와 차량과의 거리에 따라 실시간으로 달라지며 이는 n 번째 에포크마다 안테나 수의 변화와 RSU의 전송 조향 벡터의 변화를 야기한다. 이때, 반전력 빔폭은 $\vartheta_{BW} = \frac{1.78}{M_{t,n} \sin(\varphi)}$ 이고[2], 차량의 커버리지 폭은 $\Delta d = 2d_n \cdot \tan\left(\frac{0.89}{M_{t,n} \sin(\varphi)}\right)$ 로 일정하다고 가정한다. (n-1) 번째 값을 사용하여 계산한 n 번째 에포크의 예측 거리 $\hat{d}_{n|n-1}$ 와 예측 각도 $\hat{\varphi}_{n|n-1}$ 에 기반한 전송 안테나의 수 $M_{t,n}$ 는 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$M_{t,n} = \min \left\{ \left\lceil \frac{0.89}{\arctan^{-1}\left(\frac{\Delta d}{2\hat{d}_{n|n-1}}\right) \cdot \sin(\hat{\varphi}_{n|n-1})} \right\rceil, M_{t,\max} \right\}. \quad (7)$$

S&C 단계와 C 단계의 달성 가능한 전송량은 각 단계의 신호 대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)인 $\gamma_n^{S\&C}, \gamma_n^C$ 로 표현할 수 있으며, 각각 다음과 같다.

$$\bar{R}_n^{S\&C}(\theta_n^{S\&C,T}) = \mathbb{E}_{\varphi,\phi} [\log_2(1 + \gamma_n^{S\&C})] \\ \stackrel{(a)}{\leq} \log_2 \left(1 + \frac{\mathbb{E}_{\varphi,\phi} [|h^T \theta_n^{S\&C,T} H_n^{DL} f_n^{S\&C}|^2]}{\sigma_{S\&C}^2} \right) \triangleq R_n^{S\&C}. \quad (8)$$

$$\bar{R}_n^C(\theta_n^{C,T}) = \mathbb{E}_{\varphi,\phi} [\log_2(1 + \gamma_n^C)] \\ \stackrel{(a)}{\leq} \log_2 \left(1 + \frac{\mathbb{E}_{\varphi,\phi} [|h^T \theta_n^{C,T} H_n^{DL} f_n^C|^2]}{\sigma_C^2} \right) \triangleq R_n^C. \quad (9)$$

이때, σ^2 는 노이즈를 나타내고, (a)는 Jensen's inequality, 즉 $\mathbb{E}[\log(x)] \leq \log(\mathbb{E}[x])$ 에 따라 유지된다. 또한, n 번째 시간 간격에서 차량 내 디바이스의 대략적인 달성 가능 전송량은 아래와 같이 도출할 수 있다.

$$R_n(\eta, \theta_n^{S\&C,T}, \theta_n^{C,T}) = \eta R_n^{S\&C}(\theta_n^{S\&C,T}) + (1 - \eta) R_n^C(\theta_n^{C,T}). \quad (10)$$

여기서 η 는 S&C 단계의 지속 시간을 의미한다. 본 논문에서는 전송 전력, IOS 위상 편이 계수, 그리고 S&C 단계의 지속 시간을 공동으로 최적화하여 R_n 최대화를 목표로 최적화 문제를 공식화하며 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\max_{\{\theta_n^{\xi,T}, \theta_n^{\xi,R}\}, \eta} \sum_{n=1}^N R_n(\eta, \theta_n^{S\&C,T}, \theta_n^{C,T}) \quad (11)$$

$$s. t. \quad p_n^{S\&C}, p_n^C \leq p_{\max}, \quad (11a)$$

$$p_n^{S\&C} \geq 0, p_n^C \geq 0, \quad (11b)$$

$$\theta_{l,n}^{\xi,T}, \theta_{l,n}^{\xi,R} \in [0, 2\pi), \forall l, \xi, \quad (11c)$$

$$\beta_{l,n}^{\xi,T}, \beta_{l,n}^{\xi,R} \in [0, 1], \beta_{l,n}^{\xi,T} + \beta_{l,n}^{\xi,R} = 1, \forall l, \xi, \quad (11d)$$

$$\eta \in [0, 1]. \quad (11e)$$

여기서 p_{\max} 는 RSU의 최대 전송 전력을 의미하며, 제안된 최적화 문제를 해결하기 위해 모든 IOS 소자는 동일한 굴절 및 반사 전력 분할 비율을 공유한다고 가정한다.

III. 결론

본 연구에서는 차량 네트워크의 통신 성능 향상을 목표로 예측 동적 빔포밍과 IOS 기술을 조합하여 통신 및 차량 위치 파악의 정확성과 효율성을 향상시키는 2 단계 ISAC 프로토콜을 제안한다. 이를 위해 전송 전력, IOS 위상 편이 계수, S&C 단계의 지속 시간을 공동으로 최적화하여 차량 내부 디바이스의 달성 가능한 전송량의 최대화 문제를 공식화한다. 이후 연구에서는 공식화된 문제를 바탕으로 최적화 문제를 해결하고 결과를 비교하여 제안된 기법의 우수성을 증명할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.NRF-2021R1F1A1050734).

참고 문헌

- [1] Meng, Kaitao, et al. "Sensing-assisted communication in vehicular networks with intelligent surface." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2023).
- [2] Du, Zhen, et al. "Integrated sensing and communications for V2I networks: Dynamic predictive beamforming for extended vehicle targets." *IEEE Transactions on Wireless Communications* (2022).
- [3] Huang, Zixuan, Beixiong Zheng, and Rui Zhang. "Transforming fading channel from fast to slow: Intelligent refracting surface aided high-mobility communication." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 21.7 (2021): 4989-5003.
- [4] Liu, Fan, et al. "Radar-assisted predictive beamforming for vehicular links: Communication served by sensing." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 19.11 (2020): 7704-7719.
- [5] Li, Jian, and R. T. Compton. "Maximum likelihood angle estimation for signals with known waveforms." *IEEE Transactions on Signal Processing* 41.9 (1993): 2850-2862.
- [6] Schmidt, Ralph. "Multiple emitter location and signal parameter estimation." *IEEE transactions on antennas and propagation* 34.3 (1986): 276-280.