

ISAC 지원 멀티홉 V2V 네트워크에서 지연 최적화 연구

백서연, 고덕영, 강진규
명지대학교 반도체 ICT 융합대학

imtjdus100@mju.ac.kr, kdy0527@mju.ac.kr, jkkang@mju.ac.kr

Latency Optimization for ISAC-assisted Multi-Hop V2V Network

Seoyoun Baik, Deokyoung Ko, Jinkyu Kang
Myoungji University

요약

본 논문은 ISAC 환경에서 제한된 총 전력을 센싱과 통신 기능에 분배하는 전략으로 실제 네트워크의 최종 목표인 통신 지연에 미치는 영향을 분석하는 새로운 모델을 제안한다. 제안된 모델은 센싱 전력의 크기가 중계(Relay) 경로의 빔포밍 정확도를 결정하고, 이를 다시 통신 속도와 지연에 직접적인 영향을 미치는 트레이드오프 관계를 수학적으로 정립하였다. 이를 바탕으로 주어진 도로 환경에서 통신 지연을 최소화하는 최적의 통신 경로와 전력 분배를 찾는 최적화 문제를 정립하였다.

I. 서론

6G 시대를 맞이하여 자율주행 및 차량 기술이 빠르게 발전하면서, 차량간(V2V) 통신 네트워크는 도로 안전과 사용자 경험을 보장하기 위한 핵심 인프라로 자리 잡고 있다. 이러한 동적인 차량 환경에서는 주변 상황을 정확히 인지하고 긴급 정보를 신속하게 교환하기 위한 초저지연, 초고신뢰 통신 성능이 필수적으로 요구된다. 이러한 요구사항을 효율적으로 만족시키기 위한 핵심 기술로, 센싱과 통신을 동시에 수행하는 ISAC(Integrated Sensing and Communication) 기술이 큰 주목을 받고 있다. ISAC은 제한된 주파수와 전력 자원을 효율적으로 활용하여 차량의 레이더 성능과 통신 성능을 동시에 제공한다. ISAC 환경에서 제한된 총 전력을 감지 기능과 통신 기능에 어떻게 분배할 것인지는 시스템의 전체 성능을 결정하는 중요한 문제이다.[1]

본 논문에서는 ISAC 기반 V2V 네트워크에서 물리계층의 전력 분배 전략이 네트워크 계층의 경로 선택 및 최종 통신 지연에 미치는 영향을 분석하는 새로운 시스템 모델을 제안한다. 우리는 제한된 총 전력을 통신 전력과 센싱 전력으로 분배하는 트레이드오프 관계를 정의하고, 특히 센싱 전력의 크기가 중계(Relay) 경로의 빔포밍(Beamforming) 정확도에 직접적인 영향을 미치는 현실적인 모델을 도입하였다. 이를 바탕으로, 차량 간 거리, 경로상의 장애물 유무 등 다양한 도로 환경 시나리오에 따라 직접(Direct) 경로와 중계(Relay) 경로의 통신 지연을 각각 수학적으로 모델링하고 비교 분석한다. 본 논문의 핵심 기여는 ISAC의 물리 계층 파라미터와 네트워크 계층의 성능 지표를 직접 연결하여 주어진 환경에서 통신 지연을 최소화할 수 있는 최적의 통신 경로와 그에 맞는 전력 분배 전략에 대한 통찰을 제공한다는 것이다.

II. 본론

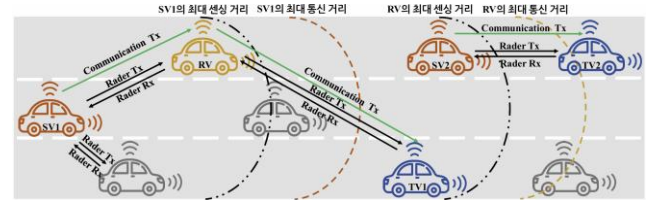


그림 1. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1 과 같이, 소스 차량(SV), 중계 차량(RV), 그리고 타겟 차량(TV)으로 구성된 ISAC 기반 V2V 네트워크 환경을 가정한다. 소스 차량(SV)은 크기가 s 인 데이터를 전송하는 것을 목표로 하며, 이 과정에서 RV가 통신 중계에 참여할 수 있다. 반대 방향으로 이동하는 차량은 작업 차량에 대해 상대 속도가 커서 작업 차량의 통신 범위 내에 머무는 시간이 짧아지므로 시나리오를 단방향 직선 도로로 단순화한다.[2]

데이터 전송 경로는 두 가지 선택지를 가진다. 첫 번째는 SV가 TV에 직접 데이터를 전송하는 직접 경로이며, 두 번째는 SV가 RV를 거쳐 TV로 데이터를 전송하는 중계 경로이다. 본 네트워크의 각 차량은 제한된 총 전력을 가진 ISAC 장치를 탑재한다. 이에 따라 차량은 주변 환경을 탐지하는 센싱 기능과 데이터를 전송하는 통신 기능을 동시에 수행해야 하며, 이는 한정된 자원을 두 기능에 분배해야 하는 근본적인 트레이드오프(trade-off) 관계를 형성한다.

통신 성능을 결정하는 물리 계층의 핵심 지표인 신호 대 잡음 비(SNR)를 통신과 센싱 모델로 나누어 정의한다. 통신 품질은 수신 신호의 SNR 값에 의해 결정된다. 차량 $m \in \{SV, RV\}$ 에서 차량 $n \in \{RV, TV\}$ 으로의 통신 SNR $\gamma_{c,m,n}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_{c,m,n} = \frac{P_{c,m} \lambda_c^2}{N_{c,t} (4\pi R_{m,n})^2} \frac{|\mathbf{w}_{m,n}^* \mathbf{H}_{c,m,n} \mathbf{f}_{m,n}|^2}{\eta_c} \quad (1)$$

여기서 $P_{c,m}$ 는 통신에 할당된 전력, λ_c 는 통신 파장, $R_{m,n}$ 는 차량 간 거리, $N_{c,t}$ 는 통신 수신 안테나 수, η_c 는 수신기 잡음 전력을 의미한다. 특히 빔포밍 이득을 나타내는 $|\mathbf{w}_{m,n}^* \mathbf{H}_{c,m,n} \mathbf{f}_{m,n}|^2$ 항은 송신 빔포밍 벡터와 수신

빔포밍 벡터가 채널 $\mathbf{H}_{c,m,n}$ 에 얼마나 잘 정렬되었는지에 따라 결정되며, 통신 품질에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 변수이다. 송신 빔포밍 벡터, 수신 빔포밍 벡터, 통신 채널 모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{f}_{m,n} = \mathbf{P}_{N_{c,t}}(\sin(\theta_{m,n}) + \mathbf{e}_{t,m,n}) \quad (2)$$

$$\mathbf{w}_{m,n} = \mathbf{P}_{N_{c,r}}(\sin(\theta_{m,n}) + \mathbf{e}_{r,m,n}) \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_{c,m,n} = \sqrt{\frac{KN_{c,r}N_{c,t}}{K+1}} \alpha_{m,n,0} \alpha_r(\theta_{m,n,0}) \mathbf{a}_t^*(\theta_{m,n,0}) + \sqrt{\frac{N_{c,r}N_{c,t}}{(K+1)P}} \sum_{i=1}^P \alpha_{m,n,i} \alpha_r(\phi_{m,n,i}) \mathbf{a}_t^*(\theta_{m,n,i}) \quad (4)$$

이때 빔포밍 벡터에서의 \mathbf{e} 는 불완전한 레이더 탐지로 인해 발생하는 각도 편차를 나타낸다. 이러한 요인은 평균이 0인 가우시안 변수로 모델링되며, 분산은 δ/γ_r 로 표현된다. 여기서 δ 는 레이더의 수신 민감도, γ_r 는 반사 신호의 SNR이다. θ 는 출발각을, ϕ 는 도착각을 나타낸다. 통신 채널은 LoS(Line of Sight)와 NLoS(Non-Line of Sight)로 구성된 Rician 채널 모델을 사용한다. 여기서 K 는 Rician factor 이고, $\alpha_{m,n,i}$ 는 i 번째 경로에서의 경로 이득을 의미한다. $i = 0$ 인 경우, LoS 구성요소를 나타낸다. 추가적으로, 경로 선택을 위한 차량 탐지가 요구되어진다. 센싱 성능을 나타내는 센싱 SNR γ_r 은 다음과 같다.

$$\gamma_r = \frac{P_{r,m} N_{r,r} G_t G_r \sigma \lambda_r^2}{(4\pi)^3 (\eta_r + C + J) R_{r,m,n}^4} \quad (5)$$

이때 $P_{r,m}$ 는 센싱에 할당된 전력이며, $N_{r,r}$ 은 레이더 수신 안테나 수, G 는 안테나 이득이고, σ 는 타겟의 레이더 단면적(RCS), λ_r 는 레이더 신호 파장이다. η_r 는 센싱 수신기 잡음이고, C 는 클러터 간섭, $R_{r,m,n}$ 은 센싱 거리이고, $J = \sum_i z^2 P_{r,r} N_{r,r} G_t G_r \sigma \lambda_r^2 / (4\pi)^3 R_i^4$ 는 주변 차량으로 인한 간섭 잡음을 나타내며, 여기서 z 는 side lobes의 평균 이득을 나타낸다. 본 연구에서는 성공적인 탐지를 위해서 센싱 SNR이 사전에 정의된 최소 임계값 $\gamma_{r,th}$ 을 넘어야 한다고 가정한다. 여기서 센싱의 목적은 단순히 중계를 위한 차량을 찾는 것뿐만 아니라, 그 차량의 정확한 각도 θ 를 알아내어 빔을 정밀하게 조준하여 성능을 향상시킬 수 있다.

이때, 물리 계층의 통신 SNR γ_c 과 통신 대역폭 B_c 는 Shannon-Hartley 정리에 따라 아래와 같이 네트워크의 최대 전송 속도를 결정한다.

$$r_{SV,RV} = B_{c,SV,RV} \log(1 + \gamma_{c,SV,RV}) \quad (6)$$

$$r_{RV,TV} = B_{c,RV,TV} \log(1 + \gamma_{c,RV,TV}) \quad (7)$$

$$r_{SV,TV} = B_{c,SV,TV} \log(1 + \gamma_{c,SV,TV}) \quad (8)$$

식 (6)-(8)을 기반으로 크기가 s 인 데이터를 전송하는데 걸리는 시간, 즉 통신 지연은 데이터 크기를 전송 속도로 나누어 계산할 수 있다. 직접 경로와 중계 경로는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$D_{relay} = \frac{s}{r_{SV,RV}} + \frac{s}{r_{RV,TV}} \quad (9)$$

$$D_{direct} = \frac{s}{r_{SV,TV}} \quad (10)$$

두 경로를 통합하여 표현하기 위해 이진 경로 선택 변수 β 를 도입한다. $\beta = 1$ 이면 중계 경로를, $\beta = 0$ 이면 직접 경로를 선택하며, 총 지연은 다음과 같이 하나의 식으로 표현된다.

$$D_{total} = \beta \left[\frac{s}{r_{SV,RV}} + \frac{s}{r_{RV,TV}} \right] + (1 - \beta) \frac{s}{r_{SV,TV}} \quad (11)$$

앞서 정의된 시스템 모델과 제약 조건들을 바탕으로 주어진 환경에서 경로선택 β 와 각 차량의 통신 전력 $P_{c,m}$ 및 센싱 전력 $P_{r,m}$ 을 최적화하여 총 통신 지연을 최소화하는 문제를 다음과 같이 정립할 수 있다.

$$\min_{\beta} D_{total} \quad (12a)$$

$$s.t. \quad P_{c,m} + P_{r,m} \leq P_{max,m} \quad (12b)$$

$$\gamma_{r,th} \leq \gamma_r \quad (12c)$$

$$\beta \in \{0,1\} \quad (12d)$$

$$d_{m,n} \leq R_{c,max,m}, d_{m,n} \leq R_{r,max,m} \quad (12e)$$

이때, 최적화 문제의 제약 조건들 (12b)-(12e)을 만족해야 한다. (12b)는 통신 전력과 센싱 전력의 합은 차량의 최대 총 전력을 초과하지 못하는 제약조건; (12c)는 만약 중계 경로를 선택한다면, 반드시 센싱 최소 성능 조건을 만족해야 하는 제약조건; 마지막으로 (12e)는 센싱과 통신을 위해서는 센싱과 통신의 주체가 되는 차량의 센싱 범위, 통신 범위 안에 있어야 하는 제약조건을 나타낸다. 차량 m 과 차량 n 사이의 거리는 $d_{m,n}$ 로 표현된다.

III. 결론

본 논문은 차세대 V2V(차량 간 통신) 네트워크의 핵심 기술인 ISAC 환경에서 물리 계층의 자원분배가 네트워크 계층의 통신 성능에 미치는 영향을 분석하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해, 제한된 총 전력을 통신과 센싱 기능에 분배하는 트레이드오프 관계를 정의하고, 이 모델을 기반으로 도로 환경에서의 end-to-end 통신 지연을 최소화하기 위한 경로 선택 및 전력 분배 최적화 문제를 제안하였다.

제안된 시스템 모델은 기존의 계층별 개별 최적화 방식의 한계를 넘어, ISAC의 물리 계층 파라미터인 전력과 네트워크 계층의 성능 지표인 지연을 직접적으로 연결했다는 점에서 중요한 의의를 갖는다. 본 모델을 통해, 최적의 통신 전략은 고정된 것이 아니라 차량 간 거리, 경로상의 장애물 유무와 같은 동적인 환경 요인에 따라 능동적으로 변해야 함을 이론적으로 분석할 수 있는 기반을 마련하였다. 이는 향후 V2V 네트워크에서 제한된 자원을 효율적으로 사용하기 위해서는 환경에 맞는 경로 선택과 전력 분배를 동시에 고려하는 통합적인 접근 방식이 필수적임을 시사한다.

향후 연구로는 본 논문에서 정립한 최적화 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 동적 알고리즘을 개발하고, 다중 중계 및 통신 간섭 환경을 고려한 모델을 확장하는 연구를 진행하여 시뮬레이션 결과를 통해 제안 기법의 우수성을 증명하려고 한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 결과물은 교육부와 경기도의 재원으로 지원을 받아 수행된 경기 지역혁신중심 대학지원사업 (경기 RISE 사업)의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] Fan, Yajun, et al. "Radar Integrated MIMO Communications for Multi-Hop V2V Networking" in IEEE Wireless Communications Letters vol. 12, no.2, pp. 307-311, February 2023.
- [2] Cao, Dun, et al. "Joint optimization of computation offloading and resource allocation considering task prioritization in ISAC-assisted vehicular network." In IEEE Internet of Things Journal vol. 11, no.18, pp. 29523-29532, September 2024.