

실제 도심 지형 기반 V2X 네트워크에서 AmBC 지원 RSMA 시스템 성능 분석

김용균, 이종범, 최용민*, 이병주

인천대학교 정보통신공학과, 제주한라대학교 인공지능학과*

yonggyunkim@inu.ac.kr, sjgsjb3@inu.ac.kr, yongminc@chu.ac.kr, bjlee@inu.ac.kr

AmBC-Assisted RSMA for Urban V2X Systems: A Real-Map-based Study

Yongkyun Kim, Jongbeom Lee, Yongmin Choi*, Byungju Lee

Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National Univ.

Department of Artificial Intelligence, Cheju Halla Univ. *

요약

본 논문은 도심 환경에서 V2X 통신의 음영 문제와 사용자 간 공정성 저하를 해결하기 위해 AmBC와 RSMA를 결합한 통합 시스템을 제안한다. 실제 지형 정보를 반영한 OSM, SUMO, NS-3 연동 시뮬레이션을 통해 차량 수가 안테나 수보다 많은 과부하 환경을 고려하고, RZF 빔포밍, Water-filling 기반 자원 할당, AmBC 위상 최적화를 포함한 공정성 극대화 프레임워크를 설계하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 차량 과부하 환경에서 AmBC-NOMA 기법 대비 약 9.5배, 직접 링크만 활용하는 RSMA 대비 약 4.2 배 향상된 최소 전송률을 달성하였다. 이는 AmBC 기반 물리적 경로 보강과 RSMA의 유연한 간섭 제어 결합이 도심 V2X 연결 신뢰성을 효과적으로 향상시킴을 입증한다.

I. 서론

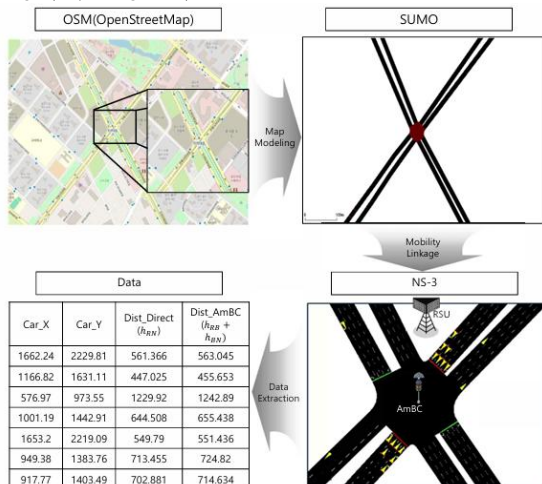
최근 자율주행 및 지능형 교통 시스템의 확산으로 V2X(Vehicle-to-Everything) 네트워크의 신뢰성 확보가 중요해지고 있으나, 도심 환경에서는 통신 음영과 성능 저하가 여전히 주요한 과제로 남아 있다 [1]. 특히 과부하 환경에서 기존 NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access) 기법은 순차적 간섭 제거 과정의 오류 전파와 잔류 간섭으로 인해 성능 향상에 한계를 보인다 [2]-[4].

본 논문은 AmBC(Ambient Backscatter)를 통한 우회 가시선 경로 형성과 RSMA(Rate-Splitting Multiple Access)의 유연한 간섭 제어를 결합한 통합 프레임워크를 제안한다. 최소 전송률 극대화를 통한 공정성 확보를 위해 RZF(Regularized Zero Forcing) 빔포밍, Water-filling 기반 자원 할당, 그리고 AmBC 위상 제어를 포함한 세 단계 최적화를 적용한다. 실제 도심 지형 기반 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 과부하 V2X 환경에서 통신 연결성과 사용자 간 공정성을 효과적으로 향상시킴을 확인하였다.

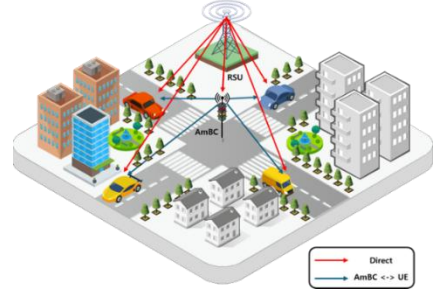
II. 시스템 모델 및 시뮬레이션 프레임워크

본 절에서는 AmBC가 지원되는 과부하 V2X 네트워크의 시스템 모델과 이를 검증하기 위한 실제 지형 기반 통합 시뮬레이션 환경을 설명한다.

현실적인 차량 이동성과 채널 환경을 구현하기 위해 [그림 1]과 같이 OSM(Open Street Map)-SUMO(Simulation of Urban Mobility)-NS-3(Network Simulator-3)를 연동하여 인천대학교 인근 교차로의 실제 신호 체계와 가감속이 반영된 3 차원 좌표를 생성하였다. 생성된 데이터는 MATLAB 과 연동되어 실제 지형 기반 채널 이득 계산 및 알고리즘 성능 평가에 활용한다.



[그림 1] 실제 지도 기반 통합 시뮬레이션



[그림 2] AmBC 보조 RSMA 기반 V2X 네트워크 시스템 모델 및 도심 교차로

[그림 2]는 AmBC 보조 RSMA 기반 V2X 네트워크 구조를 나타낸다. RSU(Road Side Unit)는 고정 배치되며, L 개의 반사 소자를 갖는 AmBC 태그는 도로 인프라에 설치된다. 본 시스템은 RSU 안테나 수 M 보다 차량 수 K 가 많은 과부하 환경(K>M)을 가정한다.

도심 전파 환경을 반영하기 위해 3GPP TR 36.885 Urban Micro 모델을 적용한다 [5]. 표준에 따라 경로손실 및 채널을 모델링하며 다음과 같이 정의한다 [5]. 송수신 거리 d 와 중심 주파수 f_c (5.9 GHz)에 따른 경로손실은 다음과 같이 정의된다.

$$PL_{LoS}(d) = 22.0 \log_{10}(d) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c) \quad (1)$$

$$PL_{NLoS}(d) = 36.7 \log_{10}(d) + 22.7 + 26 \log_{10}(f_c) \quad (2)$$

건물 차폐가 빈번한 RSU-차량 직접 경로에는 NLoS(Non Line-of-Sight) 기반의 Rayleigh 페이딩을 적용한다. 반면, 가시선(LoS) 확보가 용이한 RSU-AmBC-차량 우회 경로는 두 링크 모두 LoS 기반 Rician 페이딩으로 모델링한다. k 번째 차량의 채널 벡터 h_k 는 대규모 페이딩 $\beta_k = 10^{-PL(d_k)/10}$ 과 소규모 페이딩 \tilde{h}_k 의 곱인 $h_k = \sqrt{\beta_k} \cdot \tilde{h}_k$ 로 표현된다.

과부하 V2X 환경에서의 효율적인 간섭 제어를 위해 RSMA를 적용한다 [2], [3]. RSU는 각 사용자의 메시지를 공통 메시지와 개별 메시지로 분할하여 전송하며, 및 개별 부분으로 분할하여 전송한다 [2], [3]. 송신 신호 벡터 $x \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 와 전력 제약 조건은 다음과 같이 정의된다.

$$x = \sqrt{P_c} w_c s_c + \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} w_k s_k \quad (3)$$

$$P_c + \sum_{k=1}^K P_k \leq P_s \quad (4)$$

여기서 s_c, s_k 는 각각 공통 및 k 번째 사용자 개별 심볼이며 w_c, w_k 는 정규화 된 프리 코딩 벡터, P_c, P_k 는 각 심볼이 할당된 송신전력이다. 사용자 k의 유효 채널은 직접 경로와 AmBC 반사 경로의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$h_{e,k}^H = h_{d,k}^H + \sqrt{\eta} \alpha F_k^H G \quad (5)$$

여기서 $h_{d,k}^H$ 는 RSU-차량 직접 경로 채널, G, F_k^H 는 RSU-AmBC 및 AmBC-차량 채널, η, α 는 각각 반사 효율과 반사 계수 ($\alpha = \Gamma e^{j\theta}$)이다.

각 차량은 SIC(Successive Interference Cancellation)를 통해 공통 메시지를 우선 복호화하며 해당 SINR(Signal-to-Interference and Noise Ratio)은 다음과 같다.

$$\gamma_{c,k} = \frac{P_c |h_{e,k}^H w_c|^2}{\sum_{j=1}^K P_j |h_{e,k}^H w_j|^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

이후 공통 메시지를 제거한 뒤, 잔여 SIC 오차(ξ)를 고려한 개별메시지의 SINR 은 다음과 같이 계산된다.

$$\gamma_{p,k} = \frac{P_c |h_{e,k}^H w_c|^2}{\sum_{j \neq k}^K P_j |h_{e,k}^H w_j|^2 + \xi P_c |h_{e,k}^H w_j|^2 + \sigma^2} \quad (7)$$

최종 전송률은 $R_k = C_k + \log_2(1 + \gamma_k)$ 로 정의되며, C_k 는 Water-filling 알고리즘을 통해 채널 상태가 열악한 사용자에게 우선 배분되는 공통 전송률의 일부이다.

III. 공정성 지향 AmBC-RSMA 최적화 프레임워크

본 장에서는 NLoS 환경에서 AmBC 를 활용한 우회 가시선 경로를 형성하고, 이를 RSMA 자원 할당과 결합한 공정성 지향 최적화 프레임워크를 제안한다 [2]. 안테나 수보다 차량 수가 많은 과부하($K > M$) 환경을 고려하여, RZF 빔포밍, Water-filling 기반 전력 할당, 그리고 AmBC 위상 제어를 포함한 최적화 절차를 적용한다.

첫 번째 단계에서는 정규화 계수 α 를 도입한 RZF 빔포밍을 사용하며, 프리코딩 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$W = H_e (H_e^H H_e + \alpha I)^{-1} \quad (8)$$

두 번째 단계에서는 Water-filling 원리에 따라 RSMA 공통 메시지 전송률을 분배하며, 개별 전송률이 제한된 사용자에게 공통 전송률을 우선 할당하여 최대-최소 공정성을 달성한다.

마지막 단계에서는 AmBC 반사소자의 단위 원 제약 ($|\theta_m| = 1$)으로 인한 비볼록성을 해결하기 위해 위상 최적화를 수행한다. 최적 위상 θ^* 는 후보 집합 Θ 에서 다음과 같이 결정된다.

$$\theta^* = \arg \max_{\theta \in \Theta} \left(\min_{k \in \{1, \dots, K\}} |h_{d,k}^H + \sqrt{\eta} \alpha F_k^H G|^2 \right) \quad (9)$$

이를 통해 AmBC 는 NLoS 차량에게 보강된 우회 가시선 경로를 제공하며, 과부하 도심 V2X 환경에서 통신 신뢰성과 사용자 간 공정성을 효과적으로 향상시킨다.

IV. 성능 평가 결과

본 절에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 AmBC-RSMA 기법의 성능을 평가한다. AmBC 보조 경로 사용 여부와 다중 접속 기법에 따른 총 4 가지 시나리오를 비교 대상으로 설정하였으며, 3GPP V2X 표준 파라미터를 기반으로 차량 수를 변화시켜 도심 과부하 환경을 가정하였다. 주요 시뮬레이션 파라미터는 [표 1]에 제시되어 있다.

파라미터	값
반송파 주파수 (f_c)	5.9 GHz
시스템 대역폭 (B)	10 MHz
안테나 수 (M)	4
AmBC 반사소자 수 (L)	4
차량 수 (K)	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20
RSU 송신전력 (P_s)	35 dBm
잡음전력 스펙트럼 밀도 (N_0)	-174 dBm/Hz
AmBC 반사효율 (η)	0.8
채도잉 표준편차(σ^2)	3 dB

[표 1] 주요 시뮬레이션 파라미터

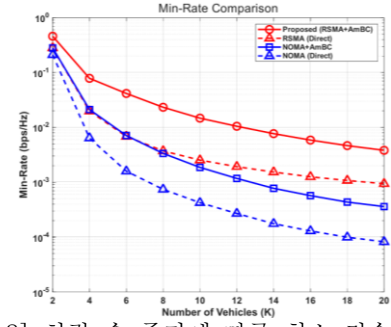
사용자 k 의 최종 전송률은 개별 전송률 $R_{p,k}$ 와 공통 전송률 C_k 의 합 $R_k = R_{p,k} + C_k$ 로 정의된다. 성능 지표 R_{min} 은 다음과 같다.

$$R_{min} = \min_{k \in \{1, \dots, K\}} R_k \quad (10)$$

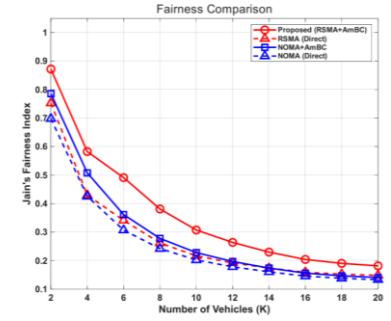
둘째, 사용자 간 전송률의 공정성을 평가하기 위해 JFI(Jain's Fairness Index)를 도입한다. 전송률 벡터 $\mathcal{R} = [R_1, \dots, R_K]$ 에 대해 JFI는 다음과 같이 정의된다.

$$J = \frac{(\sum_{k=1}^K R_k)^2}{K \cdot \sum_{k=1}^K R_k^2} \quad (11)$$

여기서 J 는 $1/K$ 에서 1 사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 완전한 공정성을 의미한다.



[그림 3] 차량 수 증가에 따른 최소 전송률 성능 비교



[그림 4] 차량 수 증가에 따른 Jain's Fairness Index

[그림 3]에서 제안된 RSMA+AmBC 기법은 NOMA+AmBC 대비 9.5 배, RSMA(Direct) 대비 약 4.2 배이상의 성능 향상을 보였다. [그림 4]는 JFI 결과를 나타낸다. $K = 20$ 에서 0.1817 을 유지하여 NOMA+AmBC 및 RSMA(Direct) 대비 각각 약 1.3 배, 1.2 배 높은 공정성을 확보하였다. 이는 Water-filling 기반 자원 할당이 물리적 채널 편차를 효과적으로 완화하고 있음을 입증한다.

V. 결론

본 논문은 도심 V2X 환경을 위한 AmBC 지원 RSMA 시스템을 제안하였다. 제안 기법은 AmBC 의 물리적 경로 보강과 RSMA의 유연한 간섭 제어 결합을 통해 차세대 도심 V2X 네트워크의 신뢰성을 효과적으로 개선함을 보여준다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2025 년도 교육부 및 제주도의 재원으로 제주 RISE 센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다 (2025-RISE-17-003).

참 고 문 헌

- [1] H. Lee et al., "Towards 6G hyper-connectivity: Vision, challenges, and key enabling technologies," J. Commun. Netw., vol. 25, no. 3, pp. 344-354, June 2023, doi: 10.23919/JCN.2023.000006.
- [2] Y. Mao, B. Clerckx, and V. O. K. Li, "Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: Bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA," EURASIP J. Wireless Commun. Netw., vol. 2018, no. 1, p. 133, May 2018.
- [3] Y. Mao, O. Dizdar, B. Clerckx, R. Schober, P. Popovski, and H. V. Poor, "Rate-splitting multiple access: fundamentals, survey, and future research trends," IEEE Commun. Surv. Tutor., vol. 24, no. 1, pp. 406-488, First Quarter 2022.
- [4] P. Ramezani and A. Jamalipour, "Backscatter-assisted wireless powered communication networks empowered by intelligent reflecting surface," IEEE Trans. Commun., vol. 69, no. 8, pp. 5126-5142, Aug. 2021.
- [5] 3GPP, "Study on LTE-based V2X Services (Release 14)," 3GPP TR 36.885 V14.0.0, June 2016.