

V2X 통신에서 평면 지능형 반사 표면의 효율적인 위상 편이 최적화

전준영, 박민혁, 김유청, 김동민*
순천향대학교

kjr05149@naver.com, xlfksh9613@naver.com, yc424k@gmail.com, *dmk@sch.ac.kr

Efficient Discrete Phase Shift Optimization for Planar Intelligent Reflecting Surfaces in V2X Communications

JunYeong JEON, Minhyeok PARK, YuCheong KIM and Dong Min KIM*
Soonchunhyang University

요약

본 연구에서는 V2X 통신용 평면형 지능형 반사면(IRS)의 이산 위상 편이를 낮은 계산복잡도로 향상시키는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 IRS 패널 위에 배열된 이산 위상 편이기 중 중요한 위상 편이기를 먼저 튜닝하거나, 위상 편이기들을 그룹으로 묶어 그룹 내에서의 최적 조합을 찾는 방식이다. 모든 조합을 전수 탐색하지 않아 전수 탐색 대비 연산량을 획기적으로 줄이면서 높은 범포밍 이득을 달성한다. 이로써 IRS 가 변화가 많은 차량 위치에 실시간으로 효율적으로 적응할 수 있어, V2X 애플리케이션에 실용적인 솔루션이 될 수 있다.

I. 서 론

차세대 지능형 교통 시스템에서 차량과 모든 대상 간 통신(V2X)은 높은 데이터 처리량과 신뢰도가 필수적이다. 지능형 반사면(IRS)은 다수의 반사 소자를 통해 전파 경로를 능동적으로 제어하여 통신 품질을 크게 개선할 수 있는 기술로 주목받고 있다 [1]. 그러나 실제 IRS는 하드웨어 제약으로 연속적인 위상 조정이 불가능하고, 수비트로 양자화된 이산 위상만 사용해야 한다 [2]. 이로 인해 위상 양자화 오차가 발생하며, IRS 전체 소자의 가능한 설정 조합 수는 기하급수적으로 증가하여 전수 탐색이 불가능해지는 조합 최적화 문제를 야기한다 [3].

II. 본 론

빔포밍 이득을 최대화하는 연속 위상을 찾은 후, 이를 가장 가까운 이산값으로 근사화하는 단순 이산화 방법(기하학적 매핑)은 입·출사각에 따라 이상적인 연속 위상을 계산한 뒤 가장 가까운 이산 위상으로 양자화 하지만, 전체 소자 간 위상 정렬을 고려하지 못해 한계가 분명하며 소자 간 상호작용을 반영하지 못해 빔 이득이 크게 저하된다. 이를 개선하기 위해 다음과 같은 두 가지 기법을 제안한다.

일반적인 안테나 배열에서 배열의 중심 소자는 주변에 많은 이웃 소자를 가지며, 이로 인해 배열 전체의 방사 패턴(특히 main lobe 형성)에 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 반대로, 배열의 가장자리 소자는 이웃 소자가 적어 edge effect 가 발생해 패턴에 왜곡이 생긴다. 따라서 중심 소자의 위상이 중요한 영향을 미친다고 할 수 있다. 이에 착안한 Progressive Element-wise Refinement (PER)은 IRS 전체 위상 편이기 배열 중 가장 중요한 중심 소자부터 나선형으로 바깥으로 진행하며, 각 소자의 모든 위상 후보를 평가해 전체 범포밍 이득을 최대화하는 위상을 순차적으로 선택한다. 이 과정을 통해 전역적 위상 정렬과 국소적 상호작용을 동시에 반영한다.

다음으로, Group-wise Configuration Refinement (GCR) 은 IRS 를 $S \times S$ 크기의 블록으로 분할한 뒤, 각 블록 내에서 제한된 후보 조합을 국소 탐색하여 블록 단위로 잔여 위상 오차를 보정한다. 이 방식은 블록 크기가 작아 연산량이 적고 국소 최적화를 효과적으로 수행한다. 이 때 블록들을 최적화하는 순서는 PER 에서 착안하여 중심부분의 블록부터 나선형으로 바깥 블록으로 나아간다.

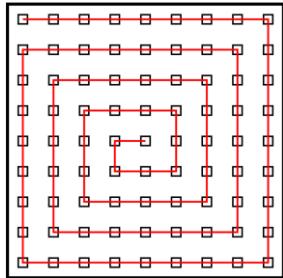


그림 1. PER

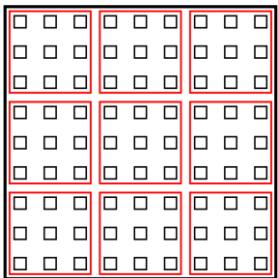


그림 2. GCR

성능 평가를 위해 다양한 IRS 크기 및 위상 해상도에서 시뮬레이션을 수행하였다. 제안하는 PER 과 GCR 이 기하학적 매핑보다 우수함을 확인하였고, 저해상도 조건에서도 높은 성능을 달성했음을 검증하였다.

그림 4 는 위상 조정기의 비트 수를 2 비트로 고정한 상태에서 IRS 의 소자 수를 증가시킬 때 베포밍 이득이 어떻게 변화하는지를 보여준다. IRS 크기가 커질수록 수신 신호 강도가 꾸준히 향상되며, 제안하는 PER 및 GCR 방법은 지속적으로 성능이 상승하는 경향을 보여준다. 그림 5 는 IRS 크기를 9×9 로 고정하고, 위상 조정기의 비트 수를 증가시킬 때 각 최적화 기법이 달성하는 베포밍 이득을 비교한 결과를 나타낸다. 비트 수가 증가함에 따라 모든 기법에서 성능이 향상되는 경향을 확인할 수 있으며, 특히 제안하는 PER 및 GCR 방법은 기하학적 매핑 대비 상당한 성능 향상을 달성하는 것으로 나타났다. PER 및 GCR 방법은 특히 낮은 비트 수 영역에서도 빠르게 성능을 끌어올려, 3 비트 이상의 경우 거의 포화 수준의 성능을 확보하는 경향을 보여준다.

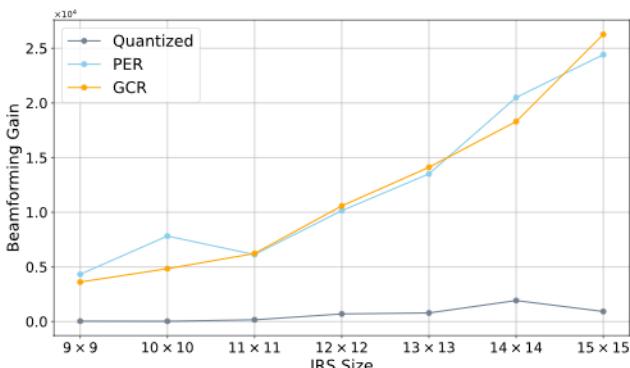


그림 4. 위상 조정기 수에 따른 베포밍 이득

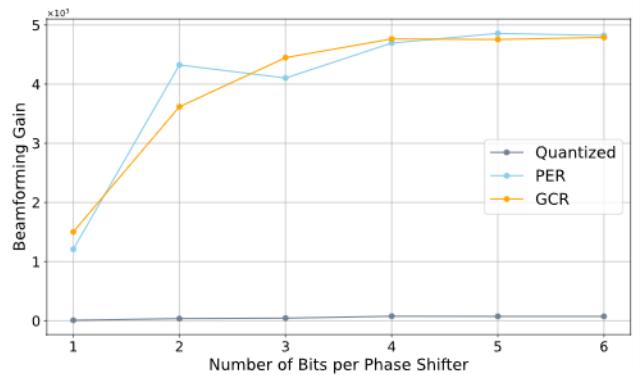


그림 5. 해상도에 따른 베포밍 이득

III. 결 론

본 논문은 평면 IRS 의 이산 위상 최적화를 위해 PER, GCR 기법을 제안하였다. 제안 기법들은 하드웨어 제약으로 인한 위상 양자화 오차를 효과적으로 줄이면서도, 계산 복잡도를 대폭 낮춰 실시간 V2X 통신에 적용 가능한 실용적 솔루션이라고 할 수 있다. 향후 연구를 통해 다중 사용자 지원, 채널 추정 오차 및 피드백 지연 고려, 머신러닝 기반 빠른 구성 예측, 실제 V2X 테스트베드 구현 등을 통해 성능과 범용성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 학·석사연계 ICT 핵심인재양성사업의 연구결과로 수행되었음. (IITP-2025-RS-2024-00436500)

참 고 문 헌

- [1] P. Wang and W. Wu, "Channel-adaptive robust resource allocation for highly reliable IRS-assisted V2X communications," arXiv preprint arXiv:2504.11871, 2025.
- [2] Q. Wu and R. Zhang, "Beamforming optimization for intelligent reflecting surface with discrete phase shifts," in 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2019, pp. 7830– 7833.
- [3] R. Dong, Y. Teng, Z. Sun, J. Zou, M. Huang, J. Li, F. Shu, and J. Wang, "Performance analysis of wireless network aided by discrete-phase-shifter IRS," Journal of Communications and Networks, vol. 24, no. 5, pp. 603– 612, 2022.