

실제 IRS 시스템을 위한 동적투표 기반 반복순차 위상 최적화 기법

박재현, 장민재, 강민철, 김준수, 김수민*

한국공학대학교

{ntop3, jang665, swrkdalscjf, junsukim, *suminkim}@tukorea.ac.kr

A Dynamic Voting-Based Iterative Sequential Phase Optimization Method for a Practical IRS System

Jae Hyun Park, Min Jae Jang, Min Chul Kang, Junsu Kim, Su Min Kim*

Tech University of Korea

요약

본 논문에서는 실제 지능반사표면 시스템에서 반복순차 위상 최적화 기법을 적용하여 각 반사 요소의 최적 위상을 설정함에 있어 이미 설정 완료된 반사 요소의 수가 증가함에 따라 수신 SNR 성능이 지수적으로 증가한다는 특성을 활용하여, 위상 정렬이 진행됨에 따라 투표 횟수를 가변시키는 동적 voting 기반의 위상 최적화 기법을 제안한다. 제안한 동적 voting 기반 반복순차 위상 최적화 기법은 실제 지능반사표면 시스템에서 실측 실험을 통해 수신 SNR 분포로 성능을 평가한다. 실험 결과는 제안 기법이 위상 정렬 정확도는 유지하면서 훈련 시간은 효과적으로 단축할 수 있음을 보여준다.

I. 서론

지능형 반사 표면 (intelligent reflecting surface, IRS)은 무선 전파 환경을 능동적으로 재구성하여 통신 성능을 향상시키는 차세대 핵심 기술로 주목받고 있다. IRS는 다수의 수동 반사 요소의 위상을 조절함으로써 반사파의 위상을 정렬시켜 신호 세기, 스펙트럼 효율 그리고 에너지 효율을 동시에 향상시킬 수 있다. 저전력 구조와 기존 송수신기와의 높은 호환성 덕분에 IRS는 차세대 6G 네트워크의 핵심 구성 요소로 여겨진다 [1]. 이러한 성능 향상을 위해서는 정밀한 위상 제어가 필수적이지만 실제 하드웨어는 대부분 1-bit 또는 2-bit 수준의 이산 위상 제어만 지원하기 때문에 제한된 피드백만으로 최적의 위상 구성을 찾는 것이 여전히 주요 과제로 남아 있다. 기존 연구에서는 각 요소의 위상을 순차적으로 0° 또는 180° 로 변경하며 수신 전력을 비교해 더 높은 값을 선택하는 반복 순차 (iterative sequential) 방식이 제안되었다 [2]. 하지만 이 방식은 각 요소마다 충분한 측정 시간과 피드백이 필요하므로 반사 요소의 수가 증가할수록 전체 훈련 시간이 증가한다는 한계가 존재한다. 반복 순차 위상 최적화 방식에서 IRS 시스템의 수신 SNR 성능은 이미 위상 설정이 완료된 반사 요소 수가 늘어남에 따라 지수적으로 증가하는데, 이 특성을 활용하여 초반 반사 요소들이 정렬될수록 후반 반사 요소에서는 두 위상 상태 간의 SNR 차이가 점차 커지므로 더 적은 측정 횟수로도 정확한 위상 판단이 가능하다 [3]. 이 점에 착안하여 본 논문에서는 반복 순차 최적화 진행에 따라 측정 횟수를 점진적으로 감소시켜 위상 결정의 정확도를 유지하면서도 전체 위상 설정 시간을 효과적으로 단축할 수 있는 동적 voting 기반 반복 순차 위상 최적화 기법을 제안하고, 실험을 통해 성능을 검증한다.

II. 시스템 모델 및 실험 환경

그림 1은 본 논문에서 고려하는 IRS-도움 통신 시스템으로 non-line-of-sight (NLoS) 채널을 가진 실내 환경을 고려한다. 송신기는 하나의 지향성 혼 안테나를 사용하며 수신기는 등방성 안테나를 사용한다. IRS는 총 16×16 반사 요소를 갖고, 네트워크를 통해 소켓 통신 방식으로 제어된다. 송신기의 혼 안테나는 IRS와 동일한 높이의 수평선상에 위치하

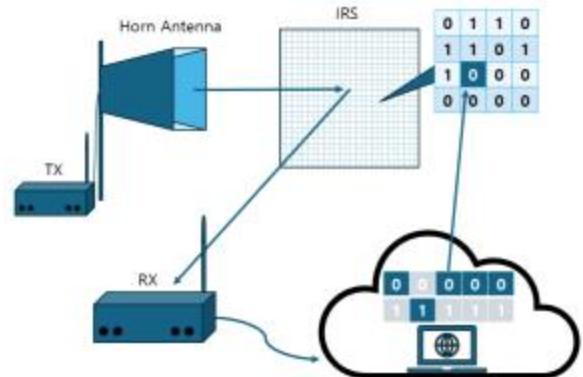


그림 1. 실제 IRS-도움 통신 시스템

며, 수신기는 등방성 안테나를 통해 IRS의 반사된 신호 성분만 수신한다. 이를 통해, NLoS 환경을 구현한다. 사용한 IRS 하드웨어는 각 반사 요소의 위상을 0° 또는 180° 로 설정할 수 있으며, 측정 SNR값에 대한 voting 기반의 반복 순차 방식으로 위상 정렬을 수행한다. 즉, IRS 패널의 좌측 상단 요소부터 행 방향으로 순차적으로 위상 정렬이 진행되며, 각 반사 요소에 대해 두 위상 상태에서 측정한 SNR 실측값을 비교하여 더 높은 SNR값이 더 많이 관측된 위상 상태값을 다수결로 채택한다.

III. 동적 Voting 기반 반복순차 위상 최적화 기법

본 논문에서 제안하는 위상 최적화 기법은 IRS의 위상 정렬 과정에서 사용되는 voting 횟수를 동적으로 조절함으로써 위상 정렬 훈련과정의 효율성을 향상시키는 방법이다. 제안 기법은 전체 위상 정렬 과정을 세 구간으로 나누고 각 구간마다 서로 다른 voting 횟수를 적용한다. 특히, 후순위 반사 요소에 대해 voting 횟수를 점진적으로 감소시키는데, 이는 IRS의 위상 정렬이 진행될수록 수신 전력 세기가 지수적으로 증가하는 경향을 보이기 때문이다 (그림 2) [3]. 따라서 위상 정렬 과정이 일정 수준 진행된 이후에는 각 반사 요소의 두 위상 상태 간 SNR 차이가 점점 커지며

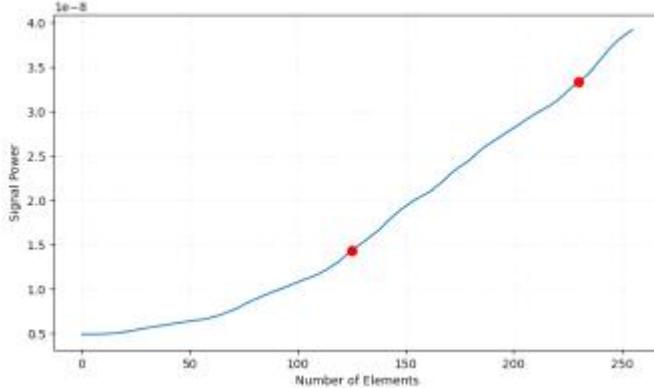


그림 2. 반복 순차 위상 정렬 과정에서 수신 전력 세기의 경향성

후순위로 갈수록 상대적으로 적은 voting 횟수로도 최적 위상 결정에 대한 충분한 신뢰도를 확보할 수 있게 된다.

IV. 성능 평가

실험에 사용된 IRS는 TMYTEK사의 Xrifle Dynamic IRS 패널로, 총 16×16 배열의 256개 1-bit 제어 반사 요소로 구성되어 있다. 각 반사 요소는 0° 또는 180° 의 두 가지 위상값 제어를 지원하고, IRS 위상 설정은 TMYTEK의 TLKCore Service API를 이용하여 제어하였다. 송수신기는 NI사의 USRP RIO 2943R SDR 장비를 사용하였으며, 송수신 및 프레임 처리는 LabVIEW로 구현하였다. 이외 실험 파라미터는 반송파 주파수 4.2 GHz, I/Q 샘플링률 200k/s, RF gain 0 dB로 설정하였다. 신호 취득 단위 구간은 프레임당 5 ms로 약 1,000개의 샘플을 사용하며, 각각의 IRS 상태에 대한 SNR 측정을 위해 총 200 프레임(총 200k 샘플)의 측정 데이터를 수집하였다(훈련 구간 길이: 1초). 이후, 프레임별 및 위상 정렬 패턴별 평균을 계산하여 실측 기반의 평균 수신 SNR을 산출하였으며, 반복순차 정렬 방식으로 순서를 정하여 IRS의 각 반사 요소는 측정 데이터 기반의 voting을 통한 위상을 설정하였다. voting 횟수는 전체 256개의 반사 요소들을 세 구간으로 나누어 각각 5회, 3회, 1회로 설정하는 방식과 전 구간에서 3회 또는 5회로 고정하여 수행한 결과를 비교하였다. voting 횟수 변경 지점은 256개의 반사 요소를 3등분한 85, 170번 지점과 그림 2에서 수신 전력 세기의 기울기가 급증하는 125, 230번 지점으로 설정하였다.

그림 3은 voting 횟수에 따른 평균 SNR 성능의 누적분포함수 (CDF)를 보여준다. voting 횟수가 증가할수록 CDF 곡선이 오른쪽으로 이동하여 더 높은 평균 SNR 값을 성취할 수 있음을 확인하였다. 특히, 85번, 170번 지점에서 voting 횟수를 5→3→1회로 감소시킨 경우, 전체 측정 시간은 3회 고정 방식과 유사하지만 CDF가 오른쪽으로 이동하며 더 높은 평균 SNR 성능이 확인되었다. 이는 IRS의 성능이 이미 위상 정렬된 반사 요소 수에 따라 지수적으로 증가하기 때문으로, 초반 반사 요소들이 정렬될수록 후반 반사 요소에서의 두 위상 상태 간 SNR 차이가 커져서 더 적은 voting 횟수로도 정확한 위상 판단이 가능함을 의미한다. 또한, 125번과 230번 지점에서 voting 수를 5→3→1회로 감소시킨 경우, 85번, 170번 지점에서 voting 횟수를 감소시킨 경우와 비교하여 초반 구간에서 voting 횟수를 더 늘릴수록 성능이 더 향상되는 것을 확인하였다. 반대로, 85번과 170번 지점에서 voting 횟수를 1→3→5회로 증가시킨 경우에는 같은 위상 설정 시간을 사용함에도 성능이 현저히 저하되었다. 이는 초반 위상 정렬 단계에서는 두 위상 상태 간 SNR 차이가 작아 채널 변동의 영향을 크게 받기 때문에 정확한 위상 판단이 어렵기 때문이다. 마지막으로,

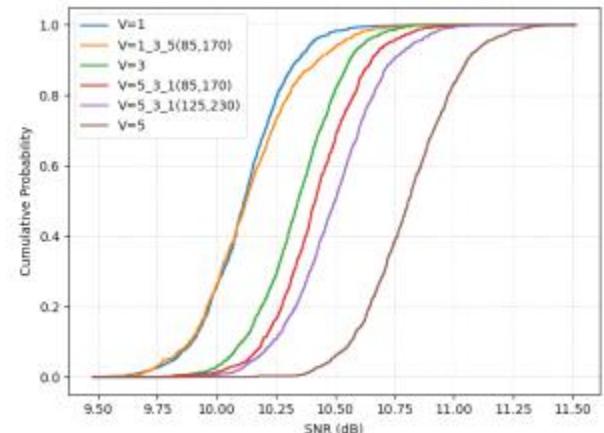


그림 3. voting 횟수에 따른 평균 SNR 성능 (CDF of SNR)

voting 횟수를 5회로 고정한 경우가 가장 높은 SNR 성능을 보였으나, 이 경우, 성능은 약 0.35 dB 우수하지만 2,560초로 가장 긴 훈련 시간을 소요하여 (125, 230)지점 동적 voting 기법 대비 약 33% 훈련 시간을 더 요구한다.

V. 결론

본 논문에서는 실내 NLoS 환경에서 실제 IRS-도움 통신 시스템을 위해 동적 voting 기반 반복순차 위상 최적화 기법을 제안하였다. 제안 기법은 위상 정렬 과정을 반사 요소에 대해 여러 구간으로 분할하고 후반부 반사 요소로 갈수록 voting 횟수를 점진적으로 감소시켜 훈련 시간을 단축하는 구조를 가진다. 실험 결과, 제안 동적 voting 기법은 고정 voting 방식과 동일한 평균 위상 정렬 훈련 시간을 유지하면서도 더 높은 평균 SNR 성능이 성취하였다. 이는 IRS의 위상 정렬이 진행됨에 따라 반사 요소 간 위상 정합 효과가 누적되어, 후반부 요소에서는 위상값별 SNR 차이가 커짐으로써 더 적은 측정으로도 더 높은 신뢰도의 위상값 결정이 가능함을 의미한다. voting 횟수, voting 변화 구간 수, 다른 위상 최적화 방식과의 비교 등 다양한 환경에 대한 최적화 이슈는 추후 연구로 남긴다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원-학·석사 연계ICT 핵심인재양성(IITP-2025-RS-2022-00156326, 50%)과 과학기술 사업화진흥원-대학기술경영촉진(TLO혁신형)(RS-2024-00456813)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 11, pp. 5394-5409, Nov. 2019.
- [2] S. Kayraklik, I. Yildirim, I. Hokelek, Y. Gevez, E. Basar and A. Gorcin, "Indoor Measurements for RIS-Aided Communication: Practical Phase Shift Optimization, Coverage Enhancement, and Physical Layer Security," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 1243-1255, 2024.
- [3] Q. Wu and R. Zhang, "Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 1, pp. 106 - 112, Jan. 2019.