

실제 IRS 시스템을 위한 반복-순차 위상 최적화에서 훈련구간에 따른 성능 분석

장민재, 박재현, 강민철, 김준수, 김수민*

한국공학대학교

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

Performance Analysis of Iterative-Sequential Phase Optimization with Different Training Periods for a Practical IRS System

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

Tech University of Korea

요약

본 연구에서는 실내 NLoS 환경에서 1비트 위상 정렬 수신기 기반 IRS의 실제 위상 훈련 구조를 구현하고, 실측 SNR 기반의 위상 결정 방식을 제안하였다. 제안 방식은 측정 SNR만으로 각 반사 소자의 위상을 독립적으로 결정할 수 있어 실제 IRS 시스템의 위상 정렬 훈련 소요시간을 적절하게 줄일 수 있다. 실험 결과, 훈련 구간을 늘릴수록 SNR 성능이 향상되고 분포가 안정화되는 경향을 보여주고, 적절한 훈련 구간을 설정하면 복잡도를 줄이면서도 충분한 SNR 성능을 성취할 수 있음을 보여준다.

I. 서론

지능형 반사 표면 (intelligent reflecting surface, IRS)은 다수의 수동 반사 소자를 이용해 전파의 위상 및 진폭을 제어함으로써 원하는 경로로 신호를 유도할 수 있으며, 장애물이나 전파 방해 요소가 많은 환경에서도 적절한 위상 정렬을 통해 높은 품질의 수신 신호를 제공할 수 있기에 차세대 6G 통신망에서 유망한 기술로 평가된다 [1]. 최근 연구에서는 실내 환경에서 실제 IRS 시스템의 반사 소자에 대한 최적 위상 정렬을 위한 훈련 복잡도를 줄이기 위해 반복-순차 (iterative-sequential) 방식, 코드북 (codebook) 방식, 그룹핑 전략 (grouping strategy) 방식 등이 제안되었다. [2]. 그러나 반복-순차 방식으로 위상 정렬을 위한 훈련 (training)을 할 때의 복잡도는 제시되었으나, 훈련 구간의 영향에 대한 구체적인 분석은 제시되지 않았다. 본 논문에서는 실제 측정을 통한 IRS 위상 정렬의 훈련 과정 분석에 초점을 맞추어, 1-bit 위상 정렬 제어 기반의 실제 IRS 시스템에서 실내 환경 실험으로 훈련 구간에 따른 성능을 분석하고, 적절한 훈련 구간의 길이를 제시하고 그에 따른 실제 훈련 소요시간을 살펴보고자 한다.

II. 시스템 모델 및 실험 환경

본 논문에서 고려하는 IRS-도움 통신 시스템은 그림 1과 같이 실내 non line-of-sight (NLoS) 환경에서 1개의 송신기 (Tx), 1개의 16x16 IRS, 1개의 수신기 (Rx)로 구성된다. Tx는 지향성 혼안테나를 IRS와 동일 높이 선상에 위치시켜 신호를 방사하게 되고, Rx는 직접 line-of-sight (LoS) 링크 없이 IRS로부터 반사된 성분만 수신 가능하다.

본 실험에 사용된 IRS는 TMYTEK사의 Xrifle Dynamic IRS 패널로, 총 16x16 배열로 256개의 1-bit 제어 반사 소자로 구성되어 있다. 즉, 각 소자는 $(0^\circ, 180^\circ)$ 의 두 가지 위상값 제어를 지원하며, 동적 제어가 가능한 PIN 다이오드 기반 구조를 통해 실시간으로 반사 위상을 조절할 수 있다. 송수신기는 NI사 USRP RIO 2943R SDR 장비를 사용하였고, 신호 송수신 및

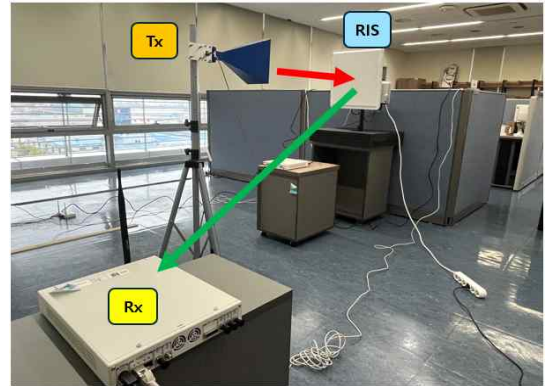


그림 1. 시스템 모델

프레임 처리는 LabVIEW로 구현하였고, IRS의 위상 설정은 TMYTEK TLKCoreService API를 이용하여 제어하였다. 측정 파라미터는 반송파 주파수 4.2 GHz, I/Q 샘플링률 (sampling rate) 200k/s, RF gain 0 dB로 설정하였다. 신호 취득 구간은 프레임당 5 ms로, 약 1,000개의 샘플에 해당되며, 각 IRS 상태에 대해 총 200 프레임 (약 200k 샘플)의 측정 데이터를 수집하였다. 이 후, 프레임별 평균과 위상 정렬 패턴별 평균을 계산하여 최대 수신 SNR을 실측 데이터 기반으로 제공할 수 있도록 구현하였으며 IRS의 각 반사 소자들의 위상이 측정 기반으로 설정되도록 하였다.

III. 측정 기반 반복-순차 위상 최적화 기법

본 장에서는 IRS 패널의 각 반사 소자의 위상값을 실측 SNR 측정값에 기반하여 결정하기 위해 수행하는 두 가지 절차를 설명한다. 첫 번째는 위상값 설정을 위한 반사 소자의 스캔 순서에 관한 것으로 시작점에서 인접 반사 소자에 대해 순차적으로 SNR를 측정하면서 반복적으로 모든 반사 소자의 위상값을 결정할 수 있도록 한다. 두 번째는 IRS의 각 반사 소자에 대해 $(0^\circ, 180^\circ)$ 의 두 가지 위상값 후보 중 더 높은 SNR를 제공하는 위상값을 선택하여 설정하는 방법에 관한 것이다.

(1) IRS 패널 반사 소자의 스캔 순서

스캔 순서는 먼저 IRS 패널의 좌측 상단의 첫 반사 소자를 기준으로 (0,0)부터 (0,15)까지 순차적으로 스캔을 진행하며, 측정 SNR 기반으로 최상 위상값을 설정하게 된다. 이후, (1,0)부터 (1,15)까지 동일한 방식을 반복하여 최종적으로 (15,15)까지 반사 소자의 위상값을 순차적으로 결정한다. 이 때, 이미 확정된 반사 소자의 위상값은 고정하고, 현재 스캔 중인 반사 소자의 위상값만 측정 SNR 기반으로 제어한다. 따라서 이 방식으로는 최적 위상값을 순차적으로 설정하면, 위상값 설정이 진행됨에 따라 수신 SNR은 단조 증가하는 경향성을 가지며, 반사 소자의 수를 $N \times M$ 이라 하면, 전체 위상 설정 시간은 훈련기간 τ 에 대해서 $2\tau \times N \times M$ 이다.

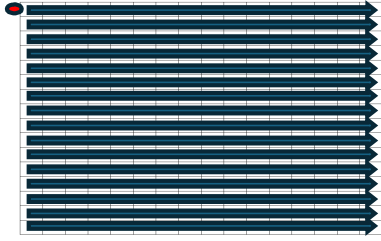


그림 2. 반복-순차 위상 최적화 스캔 순서

(2) 반사 소자별 위상값 확정 및 설정 규칙

각 반사 소자에 대해 두 후보 위상값에 대해 SNR 측정값으로 비교한다. 스캔 순서에 해당되는 반사 소자의 위상값을 0 or π 로 설정하고, 나머지 반사 소자의 위상 값은 모두 직전까지 확정된 값으로 고정한다. 각 위상값 설정에 대해 훈련기간 τ 동안 평균 SNR값을 측정하고, 두 평균값을 비교해 SNR이 더 큰 위상값을 최종 위상값으로 채택하고 이 과정을 스캔 순서에 따라 반복한다. 이 방식은 채널 모델이나 보정 파라미터 없이 수신단 품질 지표인 SNR만 필요로 하므로 IRS 위상 정렬을 위한 훈련 시간을 줄이면서도 실효적인 성능을 제공한다. 결과적으로 전체 IRS 패널의 최종 위상 패턴은 SNR 측정값 기반으로 완성되며 훈련기간 τ 를 조절함으로써 위상 정렬 소요 시간과 수렴 안정성 사이의 트레이드 오프를 정량적으로 다룰 수 있다.

IV. 실측 데이터 기반 훈련기간 길이에 따른 성능 분석

본 장에서는 실측 데이터 기반으로 훈련기간 길이에 따른 제안 방식의 성능을 평가한다. 반사 소자의 수 $N \times M = 16 \times 16$ 이고, 훈련기간 τ 에 대해서 전체 위상 정렬 소요시간은 $2\tau \times N \times M$ 으로 주어진다. 본 실험에서는 τ 를 {0.1, 0.5, 1, 3, 5, 7, 9, 11}(sec)로 조정하면서 살펴본다. 각 반사 소자의 위상 설정 후, 훈련 기간 동안 Rx에서 수신 SNR을 측정한다. 먼저, 미리 측정된 잡음 전력 P_{noise} 을 기반으로 매 훈련기간에서 $SNR = P_{rx}/P_{noise}$ 을 수신전력 기반으로 측정한다. 훈련 기간 길이에 따른 평균 수신전력과 평균 SNR은 표 1과 같다.

표 1. 훈련기간 길이에 따른 평균 수신전력 및 SNR 성능

| τ [sec] | 평균 수신전력 [nW] | 평균 SNR [dB] |
|--------------|--------------|-------------|
| 0.1 | 26.8 | 8.51 |
| 0.5 | 31.8 | 9.26 |
| 1 | 39.8 | 10.22 |
| 3 | 40.0 | 10.25 |
| 5 | 42.3 | 10.49 |
| 7 | 43.4 | 10.60 |
| 9 | 46.0 | 10.85 |
| 11 | 46.3 | 10.88 |

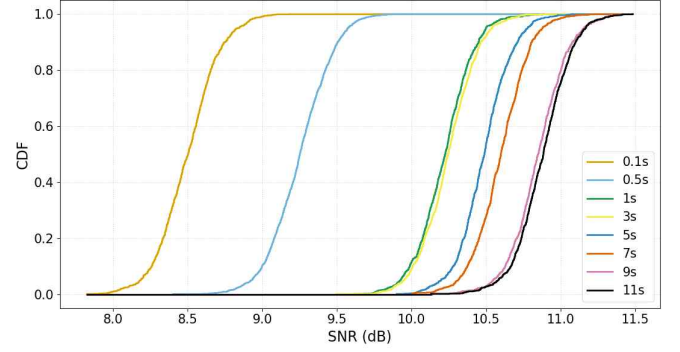


그림 3. 훈련 기간 길이에 따른 평균 SNR 성능 (CDF of SNR)

그림 3은 훈련 기간 길이별 평균 SNR의 누적분포함수 (CDF)를 보여준다. 훈련 기간이 길어짐에 따라 곡선이 오른쪽으로 이동하여 측정 시간이 길어질수록 평균 SNR 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 향상 정도는 선형적이라 할 수는 없다. 훈련 기간 $\tau=0.5$ sec 대비 $\tau=1$ sec 일 때, 약 1 dB의 SNR 이득을 얻을 수 있는 반면, 훈련 기간 $\tau=1$ sec 대비 $\tau=3$ sec 일 때, 약 4배의 시간을 더 썼지만 거의 성능 이득이 없다. 특히, $\tau=1$ sec 대비 $\tau=11$ sec 일 때, 반사 소자 훈련별 10 sec 시간을 더 사용했지만, 약 0.6 dB SNR 성능 향상에 그친다. 반면, 훈련 기간 $\tau=0.5$ sec 대비 $\tau=1$ sec 일 때, 반사 소자 훈련별 0.5 sec 추가 소요로 약 1 dB의 SNR 이득을 얻을 수 있기에 $\tau=1$ sec 가 적절한 훈련 기간 길이라 할 수 있다. 이 때, 전체 256개 반사 소자의 위상 정렬 훈련 소요 시간은 512 sec가 되며, 성능 요구도에 따라 이 구간의 길이는 적절히 늘리거나 줄일 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 실내 NLoS 환경에서 1비트 위상 정렬 제어 기반의 실제 IRS-도움 통신 시스템을 구현하고, 실제 SNR 측정 기반 반복-순차 위상 최적화 절차를 제안하였다. 그리고 실험을 통해 훈련기간이 위상 정렬 훈련 소요시간과 수신 SNR 성능에 미치는 영향을 살펴본다. 실험 결과, 훈련기간이 길어짐에 따라 평균 SNR 성능은 향상되는 경향을 나타내지만 선형적인 관계를 갖지는 않는다. 평균 SNR 분포를 기준으로 $\tau=1$ sec 가 시간 대비 이득이 큰 지점으로 확인되었으며, 서비스 요구 SNR 및 훈련 소요시간 제약에 따라 최적 훈련 기간은 조정 가능하다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [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. Gocin, "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] V. Popov, M. Odit, J.-B. Gros, V. Lenets, A. Kumagai, M. Fink, K. Enomoto, and G. Lerosey, "Experimental Demonstration of a mmWave Passive Access Point Extender Based on a Binary Reconfigurable Intelligent Surface," *Frontiers in Communications and Networks*, vol. 2:733891, Oct. 2021.