

Sub-THz 통신 환경에서 RIS 기반 커버리지 확장을 위한 Greedy 기반 위치 최적화 및 LUT 기반 위상 제어

이석현*, 고형석†, 신원재*, †

*고려대학교 차세대통신학과, †고려대학교 전기전자공학부

{leesh0926, hsko99, wjshin}@korea.ac.kr

Greedy-Based RIS Placement Optimization and LUT-Based Phase Control for Sub-THz Coverage Enhancement

Seokhyeon Lee*, Hyungseok Ko†, Wonjae Shin*, †

*Dept. of Communication Engineering, Korea Univ., †Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Korea Univ.

요약

본 논문은 재구성가능한 지능형 표면(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)를 무선 전파 환경을 능동적으로 제어하는 지능형 메타표면 기술로 정의하고, Sub-THz 대역 통신 환경에서 RIS의 필수성을 분석한다. Sub-THz 파장은 파장이 매우 짧아 희석 및 반사 효과가 거의 발생하지 않으므로, 비가시 경로 환경에서 안정적인 통신을 위해서는 RIS를 통한 인위적 경로 확보가 핵심적이다. 이러한 RIS의 상용화를 위해서는 저전력·저비용 구조 설계가 필수적이며, 제한된 수의 RIS로 최대 커버리지를 확보하는 관점의 위치 최적화가 중요하다. 또한 RIS는 수동 소자로 동작하기 때문에 실시간 채널 상태 정보(Channel State Information, CSI)를 획득하는 데 구조적인 한계가 존재한다. 이에 본 논문에서는 제한된 수의 RIS로 최대 커버리지를 확보하기 위해 greedy selection 기반 RIS 배치 알고리즘을 도입하여 효율적인 RIS 배치를 통해 통신 커버리지와 평균 수신 신호를 최대화하고자 한다. 또한, LUT (Look-Up Table) 기반 RIS 위상 최적화 방식을 도입하여 연산 복잡도와 지연 시간을 최소화하는 것을 목표로 하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 RIS 위치 최적화 및 LUT 기반 위상 제어 기법은 제한된 RIS 개수 조건에서도 효율적인 커버리지 확장과 수신 신호 세기 향상을 달성함을 확인하였다.

I. 연구배경 및 목적

차세대 6G 통신에서는 Sub-THz 대역의 활용으로 초고속·초저지연 서비스를 구현할 수 있으나, 높은 직진성으로 인해 희석과 자연 반사가 거의 발생하지 않아 비가시 경로 환경에서 통신 성능이 급격히 저하된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 전파 환경을 능동적으로 제어할 수 있는 재구성가능한 지능형 표면(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)이 유망한 대안 기술로 주목받고 있다. RIS는 다수의 수동 반사 소자로 구성된 메타표면으로, 각 소자의 위상을 조절함으로써 신호의 진행 경로를 재구성하고 커버리지 및 수신 품질을 향상시킬 수 있다 [1].

그러나 RIS 기반 통신의 성능은 위상 제어 기법과 실제 환경에서의 설치 위치에 크게 의존하며, 현실적인 비용·전력 제약으로 인해 제한된 개수의 RIS를 효율적으로 배치하는 문제가 핵심 과제로 작용한다. 특히 Sub-THz 환경에서는 RIS의 위치에 따라 커버리지 확보 여부가 결정되므로, 제한된 RIS 자원을 활용한 위치 최적화가 필수적이다. 또한 RIS는 저전력·저비용 구조를 위해 능동 RF (Radio Frequency) 체인을 포함하지 않는 수동 소자로 구성되므로, 사용자 위치 및 CSI (Channel State Information)를 실시간으로 획득하는 데 구조적 한계가 존재한다 [1].

본 논문에서는 이러한 문제의식을 바탕으로, 제한된 RIS 개수 조건에서 통신 커버리지와 평균 RSS (Received Signal Strength)를 최대화하기 위한 Greedy Selection 기반의 RIS 배치 알고리즘을 제안한다. RIS 위치 최적화 시뮬레이션과 기존 Uniform 및 Random 배치 방식과의 성능 비교를 통해 제안 기법의 유효성을 검증한다. 더 나아가 CSI 피드백 지연 문제를 완화하기 위해 LUT (Look-Up Table) 기반 RIS 위상 제어 구조를 고려함으로써, RIS 기반 Sub-THz 통신의 실용적 구현 가능성을 분석한다.

II. Greedy Selection 기반 RIS 배치 알고리즘 설계

본 연구에서는 Sub-THz 대역 무선 통신 환경에서 제한된 개수의 RIS를 효율적으로 배치하여 통신 커버리지와 RSS를 최대화하는 Greedy Selection 기반 RIS 위치 최적화 알고리즘을 제안한다. Sub-THz 대역은 높은 직진성으로 인해 장애물에 의한 차단이 빈번하게 발생하며, 이로 인해 비가시 경로 환경에서 통신 성능이 급격히 저하된다. 이러한 환경에서는 RIS의 위상 제어뿐만 아니라 실제 설치 위치가 통신 성능에 결정적인 영향을 미치므로, 제한된 RIS 자원을 고려한 위치 최적화가 핵심 문제로 작용한다.

RIS 위치 최적화 문제는 전체 공간에서 RIS 설치로 커버되는 격자점의 개수를 최대화하는 집합 선택 문제로 정의된다. RIS 후보 위치 중 최대 k 개의 위치를 선택하여 커버리지를 최대화하는 것이 목표이며, 커버리지는 RIS를 추가할수록 감소하지 않는 단조성과 추가 RIS의 기여도가 점차 감소하는 열등모듈성(Submodularity)을 만족한다. 이러한 특성으로 인해 Greedy 알고리즘은 최적 해 대비 63.2 % 이상의 근사 성능을 이론적으로 보장한다.

제안한 알고리즘은 Iterative Greedy Selection 방식으로 동작한다. 초기 상태에서 시작하여 각 단계마다 모든 RIS 후보 위치에 대해 RIS를 추가로 설치했을 때 증가하는 커버리지 이득을 계산한다. 이 중 가장 큰 커버리지 증가를 제공하는 위치를 선택하여 RIS를 배치하고, 현재 커버리지 상태를 갱신한다. 이 과정을 목표 커버리지나 최대 RIS 개수에 도달할 때까지 반복하며, 각 단계에서 RIS 반사 경로에 따른 수신 RSS 변화가 함께 계산되어 커버리지와 RSS를 동시에 고려한 배치가 이루어진다. 이러한 Greedy 기반 배치 방식은 복잡한 환경에서도 효율적인 커버리지 확장을 가능하게 한다.

III. LUT 기반 RIS 위상 최적화 알고리즘 설계

RIS의 수동적 특성으로 인해 발생하는 CSI 획득 지연 문제를 완화하기 위해 LUT 기반 RIS 위상 최적화

알고리즘을 제안한다. RIS의 기존 방식은 송수신기 간 반복적인 파일럿 신호 교환을 통해 cascaded channel을 추정하지만, 이는 Sub-THz 환경에서 과도한 파일럿 오버헤드와 피드백 지연을 초래하여 빠르게 변화하는 채널 환경에 실시간으로 대응하기 어렵다.

이를 해결하기 위해 다중 RIS 환경에서 좌표별 가능한 전파 경로를 사전 탐색 후, 해당 경로에 최적화된 RIS 위상 값을 LUT 형태로 저장하는 방식을 제안한다. 송신기에서 수신기까지 도달 가능한 경로를 그래프 구조로 모델링하고, DFS (Depth-First Search) 기반 탐색 알고리즘을 적용하여 송신단에서 수신단까지 도달하는 모든 가능한 다중 반사 경로를 재귀적으로 탐색한다. 이 과정에서 물리적으로 의미 있는 경로만을 선별하기 위해 반사 횟수, 차단 여부 등을 고려하여 비현실적인 경로는 제거한다.

탐색된 경로 중에서는 서로 다른 RIS 조합을 포함, 독립적인 전파 경로를 동시에 고려하며, 각 경로에 대해 수신 신호가 수신단에서 동위상으로 합성되도록 RIS 위상 값을 계산한다. 이렇게 계산된 위상 값은 각 경로 및 RIS 조합에 대해 LUT로 저장되며, 실제 통신 시에는 사용자 위치 또는 사전 정의된 환경 상태에 대응하는 LUT 항목을 참조하여 즉시 RIS 위상을 설정한다. 이를 통해 과도한 실시간 CSI 피드백 없이도 위상 제어가 가능해지며, 연산 복잡도와 제어 지연을 크게 감소시킬 수 있으며, 하드웨어 제약 없이 빠른 빔포밍을 구현할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

Greedy Selection 기반 RIS 위치 최적화 알고리즘과 LUT 기반 RIS 위상 제어 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 20×20 m 크기의 2차원 BOX 공간을 설정하고, 해당 공간 내에 랜덤한 위치와 방향을 갖는 벽 10개를 생성하여 전파 차단 효과를 모델링하였다. 이후 RIS의 개수를 증가시키며 위치 최적화를 수행한 결과, RIS 개수가 증가함에 따라 커버리지와 평균 RSS가 모두 단조 증가하는 경향을 확인하였다. RSS 및 전송률 히트맵을 통해 Greedy 방식이 Shadow Zone을 효과적으로 해소함을 확인할 수 있다.

다음으로 제안한 Greedy 기반 위치 최적화 알고리즘의 성능을 기존 배치 방식과 공정하게 비교하기 위해, Greedy 알고리즘이 특정 공간에서 목표 커버리지(99%)를 달성하는 데 사용한 RIS 개수를 기준으로 Uniform 및 Random 배치 방식을 적용하였다. 이를 통해 배치 전략 자체의 성능 차이를 정량적으로 평가하였다. 이 비교 실험은 50개의 서로 다른 랜덤 공간에 대해 반복 수행되었다. 각 시나리오마다 벽의 위치와 형상이 무작위로 생성되었으며, 동일한 조건에서 Greedy, Uniform, Random 배치 방식을 적용하였다. 시뮬레이션 결과, Greedy 기반 배치 방식은 약 99%의 높은 커버리지를 달성한 반면, Uniform 및 Random 배치 방식은 각각 약 60~70% 및 50~60% 수준의 커버리지에 머무르는 것을 확인하였다. 또한 평균 RSS 측면에서도 Greedy 방식이 가장 우수한 성능을 보였으며, Uniform 및 Random 배치는 환경에 따라 성능 편차가 크게 나타났다. 이는 Greedy 알고리즘이 각 단계에서 커버리지 증가 효과가 가장 큰 위치를 선택함으로써 제한된 RIS 자원을 효율적으로 활용하고 있음을 보여준다.

마지막으로 LUT 기반 RIS 위상 최적화 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 위상 제어 방식의 동작을 검증하였다. DFS 기반 다중 경로 탐색을 적용한 결과, 다중 RIS 반사 경로가 효과적으로 탐색되었으며, 두 개 이상의 물리적으로 독립적인 경로가 동시에 선택되는 것을 확인하였다. 각 경로에 대해 사전에 계산된 RIS 위상 값이 LUT 형태로

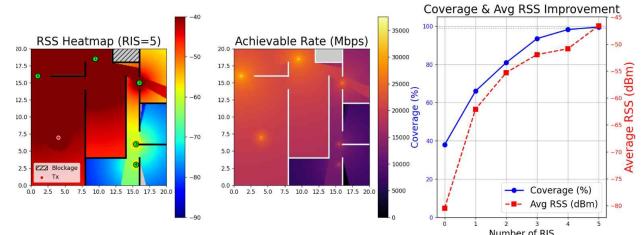


Figure 1. Greedy 기반 RIS 위치 및 위상 최적화 알고리즘의 시뮬레이션 성능 분석 결과.

(a) 5개의 RIS 배치에 따른 RSS 히트맵, (b) 최적화 이후의 위치별 전송률(Achievable Rate) 분포, (c) RIS 개수 증가에 따른 시스템 커버리지 및 평균 RSS 성능 향상 추이

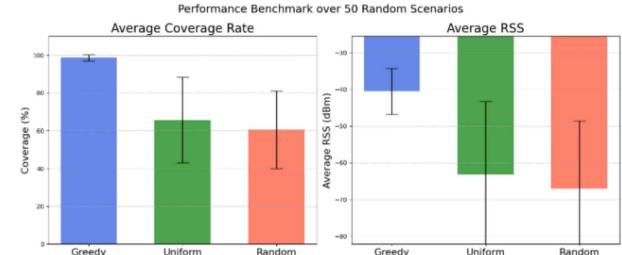


Figure 2. Greedy, Uniform, Random RIS 배치 방식 간 평균 커버리지, 평균 RSS 비교(50개 랜덤 시나리오)

Target Rx : [10. 1.]

```

 Active Independent Paths Found: 1
 [Path 1] RSS Expectation: -64.81 dBm
Route: Tx -> RIS#1 -> RIS#2 -> RIS#4 -> Rx
>> RIS#1 [Source Relay]
- Aiming at : RIS#2
- Beam Angle : 331.70°
- Phase Ctrl : Passthrough (Relay Mode)
>> RIS#2 [Middle Relay]
- Aiming at : RIS#4
- Beam Angle : 267.61°
- Phase Ctrl : Passthrough (Relay Mode)
>> RIS#4 [End Relay]
- Aiming at : Rx
- Beam Angle : 199.98°
- Phase Ctrl : 22.63° (Constructive)

```

Figure 3. LUT 기반 RIS 위상 제어 프로그램 출력 예시

적용되어 수신기에서 신호가 동위상으로 합성되도록 제어되었다. 이를 통해 실시간 CSI 피드백 없이도 안정적인 신호 결합이 가능함을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 Sub-THz 대역 무선 통신 환경에서 제한된 RIS 자원을 효율적으로 활용하기 위한 Greedy Selection 기반 RIS 위치 최적화 기법과 LUT 기반 위상 제어 구조를 제안하였다.

시뮬레이션 결과, 제안한 기법은 기존 Uniform 및 Random 배치 방식 대비 커버리지와 평균 RSS 측면에서 우수한 성능을 달성하였으며, 소수의 RIS만으로도 효과적인 커버리지 확장이 가능함을 확인하였다. 이를 통해 Sub-THz 통신 환경에서 RIS 설계 및 배치 전략 수립을 위한 기초적인 시뮬레이션 기반 분석 결과로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 고려대학교 차세대통신학과 ACSESS 진리장학 프로그램의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Basar, E., et al., "Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 108–116, 2019.