

비대각 지능형 재구성 반사패턴 및 빔포밍 설계 기술 동향

전정원, 권진호, 정지혁, 노송[‡]
인천대학교

{jeongwon.jeon, pppe123, jihyuck2291, songnoh}@inu.ac.kr

요약

차세대 통신의 핵심 기술 중 하나인 지능형 재구성 반사체는 송수신 전송 기법 최적화와 별도로 제어가능한 무선 채널 환경을 실현하여 통신 성능을 개선할 수 있다. 기존의 반사요소 간 독립적인 제어를 고려한 대각 행렬 기반 지능형 재구성 반사체 구조를 확장하여, 최근 반사요소 간 연결을 고려한 비대각 행렬 기반 지능형 재구성 반사체가 연구되고 있다. 이에 본 논문에서는 최신 지능형 재구성 반사체의 구조와 실제적인 동작 특성 및 제약 조건을 고려한 반사패턴 및 빔포밍 설계 기법을 소개한다.

I. 서론

6세대(6G, The Sixth-generation) 통신의 핵심기술인 지능형 재구성 반사체(RIS, Reconfigurable Intelligent Surface)는 제어가능한 무선 통신 환경을 구축하여 통신 음영 영역을 해소할 수 있다[1]. 기존의 RIS는 반사요소 간 연결성이 없어 독립적인 제어가 가능한 제한적인 상황을 고려하며, 이때 RIS의 수학적 모델은 대각 행렬로 나타낸다.

최근 RIS 반사요소 간 연결을 고려하여 BD-RIS(Beyond Diagonal RIS)기반 비대각 반사패턴 구조가 제시되었으며, 확장된 설계 자유도에 의해 기존 RIS 대비 향상된 통신성능을 달성할 수 있다[2].

BD-RIS는 반사요소의 연결 구조에 따라, 단일 연결, 완전 연결, 그룹 연결 구조로 분류되며, 반사요소 간 연결 변화성에 따라, 정적성과 동적성을 갖는 구조로도 분류할 수 있다[3, 4]. 이러한 BD-RIS의 구조로 인해, 기존의 대각 행렬 기반 RIS 수학적 모델에서, 비대각 행렬 기반 모델로 확장되었다. 또한, 기존 RIS와 같이, BD-RIS도 반사, 투과, 하이브리드 모드를 지원하며[3, 5], 다양한 BD-RIS 구조 및 운용모드를 고려한 연구가 진행되고 있다[6-8].

이에 본 논문에서는 BD-RIS의 구조 및 운용 모드에 따른 반사패턴 및 빔포밍 설계 기술과, 실제적인 BD-RIS의 동작특성 및 제약조건을 고려한 연구 동향을 간략히 소개한다.

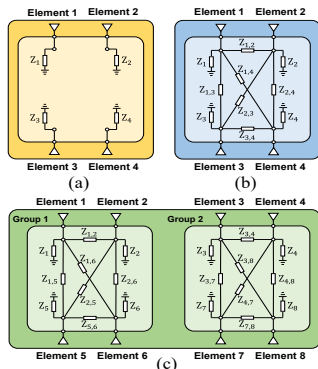


그림 1. BD-RIS 구조에 따른 임피던스(Impedance) 네트워크 예시: (a) 단일 연결, (b) 완전 연결, (c) 그룹 연결

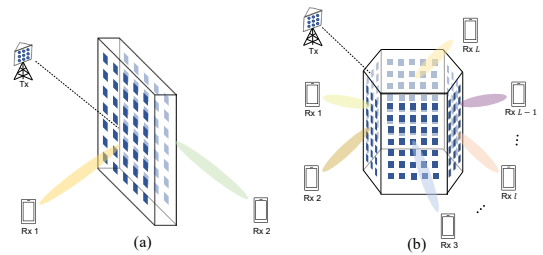


그림 2. 하이브리드 운용모드 예시: (a) 평면 BD-RIS, (b) 멀티 섹터 BD-RIS

II. BD-RIS 구조 및 운용모드

A. BD-RIS 구조

BD-RIS 구조는 반사요소의 연결성에 따라, 단일 연결, 완전 연결, 그룹 연결 구조로 구분된다.

단일 연결 BD-RIS는 기존 RIS와 같이 반사요소를 개별적으로 제어하는 구조로, 그림 1(a)와 같이 표현되며, 주로 입사신호의 위상만을 제어할 수 있다.

완전 연결 BD-RIS는 모든 반사요소들이 상호 연결된 구조로, 그림 1(b)와 같이 표현되며, 입사신호의 위상 및 진폭이 제어 가능하다. 이때, RIS 반사패턴은 대각행렬 모델이 아닌, 밀집행렬(Dense Matrix)로 표현된다.

그룹 연결 BD-RIS는 전체 M 개의 반사요소를 g 개의 그룹으로 동일하게 나누어 배치한 구조로, 각 그룹 내 반사요소들은 상호 연결된다. 이는 그림 1(c)와 같이 표현된다. 그룹 연결 구조는 단일 연결($g = M$) 및 완전 연결 구조($g = 1$)를 포함하며, 일반적으로 RIS 반사패턴은 블록 대각행렬로 구성된다.

이론적으로, 비 대각행렬 RIS 모델은 신호의 손실이 없는 이상적인 상황을 고려할 때, 유니타리 행렬 조건을 가진다.

B. BD-RIS 운용모드

RIS 평면의 접선 방향으로 공간을 나눈다고 가정할 때, 반사모드는 입사된 신호가 같은 평면 방향으로 반사되는 모드이고, 투과모드는 RIS의 한 면에 입사된 신호가 RIS의 다른 방향의 면을 통해 신호가 전달되는 모드이다. 하이브리드 모드는 반사, 투과모드를 동시에 지원하는 경우이며, 그림 2(a)와 같은 평면 BD-RIS의 상황과 그림 2(b)의 $L(L \geq 2)$ 개의 섹터로 구성된 멀티 섹터 BD-RIS 상황에 적용 가능하다.

III. BD-RIS 구조 및 운용모드에 따른 빔포밍 기법

BD-RIS의 수동 반사패턴 빔포밍 설계는 일반적으로 유니타리 행렬 공간 내의 존재하는 최적의 해를 찾기 어려우며, 근사 해를 찾을 시에도 높은 계산 복잡도를 갖는다. 따라서, 빔포밍 설계 기법은 BD-RIS의 구조 및 운용모드의 차이에 따라 다른 형태의 최적화 문제 구성 및 복잡도를 가진다.

먼저, 완전 연결 및 그룹 연결 구조로 구성된 BD-RIS 경우, 특이값 분해(SVD, Singular Value Decomposition) 기반 Takagi 분해를 이용하여 신호 대 잡음비를 최대화하는 반사패턴의 근사해를 구한다[6]. 그리고, Takagi 분해를 이용하여, 완전 연결 구조에서 송신 빔포밍 및 반사패턴을 반복 최적화하는 기법이 제안되었다[7]. Takagi 분해를 사용할 경우 닫힌 형태의 반사패턴 설계가 가능하다, 다수 송수신 안테나 및 RIS 운용 환경에서 추가 연구가 필요하다.

다중 송수신 안테나 시스템에서, 그룹 연결 구조 BD-RIS 및 반사모드로 운용할 경우, 매니폴드-알고리즘을 통해 반사패턴 근사 설계가 가능하다. 멀티 섹터 BD-RIS 및 하이브리드 모드로 운용할 경우, 전송 빔포밍 및 반사패턴의 최적화를 위해 분수 계획법 기반 반복적 알고리즘과 매니폴드-알고리즘을 순서대로 적용하여 근사 설계가 가능하다[8]. 이때, 매니폴드-알고리즘은 반복 최적화 과정에서 높은 계산 복잡도를 필요로 하기에, 저복잡도 빔포밍 알고리즘 연구가 필요하다.

IV. BD-RIS 동작특성 및 제약조건을 고려한 빔포밍 기법

실제적인 상황에서의 BD-RIS 동작특성 및 제약조건을 고려한 대표적인 빔포밍 기법을 간략히 소개한다.

[7]에서는 이산 값 반사패턴 구현을 위해 전력 분배기, 위상 변위 시스템으로 나뉜 반사요소를 고려한 BD-RIS 모델에서, Takagi 분해 기반 빔포밍 기법을 제안한다. [9]에서는 반사요소 간 상호 결합을 고려한 BD-RIS 회로 구조를 분석하고, 빔포밍 설계를 위한 보조변수-대체증가 알고리즘과 뉴턴-급수 근사기법의 반복적 접근 최적화를 제안한다. [10]에서는, BD-RIS의 광대역 시스템에 적용가능한 반사패턴을 얻기 위해, BD-RIS 회로 모델을 기반으로 준-뉴턴 기반 반복적 접근 최적화 기법을 제안한다. [11]은 커버리지 확대를 위한 분산된 반사요소 연결 간 전송선로 손실이 존재하는 상황에서, BD-RIS 회로 모델과 준-뉴턴과 SVD 기반의 반복적 접근 최적화 설계 기법을 제안한다.

V. 결론

본 논문에서는 BD-RIS 구조 및 운용모드에 따른 반사패턴 및 빔포밍 기법, 그리고 실제 BD-RIS의 제약조건을 고려한 연구결과를 소개하였다. 향후 BD-RIS의 실제적인 적용을 위해, 복합적인 BD-RIS 구조 및 운용 모드를 지원하는 빔포밍 기법들이 연구될 것으로 사료되며, 지상 및 비지상 지능형 통신 네트워크 구축에 기여할 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원과, 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원과, 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (과제번호:

P0022557, NRF-2022R1F1A1074612, IITP-2024-RS-2023-00259061).

참고 문헌

- [1] M. A. ElMossallamy *et al.*, "Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Principles, challenge, and opportunities," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 6, no. 3, pp. 990-1002, Sep. 2020.
- [2] S. Shen *et al.*, "Modeling and architecture design of reconfigurable intelligent surfaces using scattering parameter network analysis," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 2, pp. 1229-1243, Feb. 2022.
- [3] H. Li *et al.*, "Beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces: From transmitting and reflecting modes to single-, group-, fully-connected architectures," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 4, pp. 2311-2324, Apr. 2023.
- [4] H. Li *et al.*, "A dynamic grouping strategy for beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces with hybrid transmitting and reflecting mode," *arXiv:2210.02499v3*, Jun. 2023.
- [5] H. Li *et al.*, "Beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces: A multi-sector mode enabling highly directional full-space wireless coverage," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, no.8, pp.2446-2460, Aug. 2023.
- [6] I. Santamaria *et al.*, "SNR maximization in beyond diagonal RIS-assisted single and multiple antenna links," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 30, pp. 923-926, Jul. 2023.
- [7] W. Sun *et al.*, "A new model of beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces (BD-RIS) for the corresponding quantization and optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications (Early Access)*, Apr. 2024.
- [8] H. Li *et al.*, "Channel estimation and beamforming for beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces," *arXiv:2403.18087v1*, Mar. 2024.
- [9] H. Li *et al.*, "Beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces with mutual coupling: modeling and optimization," *IEEE Communications Letters*, vol. 28, no. 4, pp. 937-941, Apr. 2024.
- [10] H. Li *et al.*, "Wideband modeling and beamforming for beyond reconfigurable intelligent surfaces," *arXiv:2403.12893v1*, Mar. 2024.
- [11] M. Nerini *et al.*, "Localized and distributed beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces with lossy interconnections: Modeling and optimization," *arXiv:2402.05881v1*, Feb. 2024.