

# Beyond Diagonal 지능형 재구성 반사체 연구 동향: 빔포밍 기법

전정원, 노송  
인천대학교

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

## 요약

6G 통신에서 주목되는 지능형 재구성 반사체는 무선 통신 시스템에서 기존 송·수신 위주의 전송기술에서 벗어나 향상된 통신 채널 환경을 구성할 수 있다. 최근 대각 행렬로 구성된 지능형 재구성 반사체 구조를 확장하여, 비대각 행렬로 구성된 지능형 반사체 연구가 제시되고 있다. 이에 본 논문에서는 Beyond Diagonal 지능형 재구성 반사체 운용 기법 중 빔포밍 기법에 대해 소개한다.

## I. 서론

차세대 통신에서 주요 기술 중 하나로 고려되는 지능형 재구성 반사체(RIS, Reconfigurable Intelligent Surface)는 신호 및 전달 경로를 조절해 통신 음영지역을 해소하고, 기존 송·수신 단말 간 경로에 추가적인 통신 경로를 제공하여 무선채널 환경에서 통신성을 향상시킬 수 있다[1]. 그러나, 기존의 RIS는 반사요소들이 서로 연결되지 않아 제어 범위가 한정되어 통신성 향상이 제한된다. 이를 극복하기 위해, 반사요소들 간 연결성을 부여해 얻은 유연성을 통해 기존 RIS 대비 발전된 통신성을 갖는 BD-RIS(Beyond Diagonal RIS)가 제안되었다[2].

BD-RIS 구조는 반사요소의 회로 연결성에 따라 구분된다. 이는 단일 연결, 완전 연결, 그룹 연결로 구분된다. 또, 반사요소 간 연결의 변화에 따라 동적성을 띄는 동적 구조 그룹/비대칭 연결로 구분할 수 있다. 이러한 BD-RIS는 송·수신자의 위치에 따라 반사, 투과, 하이브리드 운용모드를 통해 동작한다[3]. 이러한 BD-RIS의 구조적 특성에 의해 기존 RIS(Diagonal RIS)와 달리 수학적 모델인 비대각 행렬로 확장되며, 이는 구현 및 운용 복잡도를 야기한다. 그러므로, BD-RIS의 활용을 위해서는 구조 및 운용모드에 대한 특성이 고려되어야 한다[4]. 이에 본 논문에서는 이를 고려한 BD-RIS의 빔포밍 기법의 기술동향에 대해 소개한다.

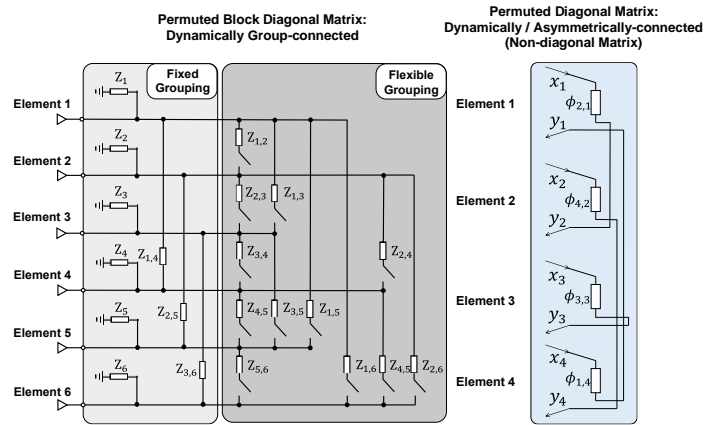


그림 2. 동적형 BD-RIS 구조에 따른 임피던스 네트워크[4, 5]. (Z: Reconfigurable impedance,  $\phi_{m,n}$ : Reflection coefficient,  $x_m/y_m$ : Incident/reflected signal)

## II. BD-RIS 빔포밍 기법

BD-RIS는 구조적 특성에 따라 진폭과 위상 조작에 대한 유연성이 증가해 기존 (대각) RIS에 비해 향상된 통신성을 갖는다. 이러한 구조는 단일 연결, 완전 연결, 그룹 연결로 구분할 수 있다. 이 세 가지 연결구조는 다음과 같은 요소들로 표현된다. 표현 요소는 반사요소 개수  $E$ , 그룹 개수  $g$ , 각 그룹의 반사요소 개수  $N_g = \frac{E}{g}$ 이다. 여기에서  $N_g = 1$ 이라면 단일 연결,  $N_g = E$ 이라면 완전 연결이다.  $N_g$ 에 의해 기존 RIS인 단일 연결 또는 BD-RIS의 그룹 연결, 완전 연결이 결정된다. 그렇기에, 구조 및 운용모드 특성에 의해 변경된 수학적 모델을 고려하는 빔포밍 기법들이 연구되고 있다.

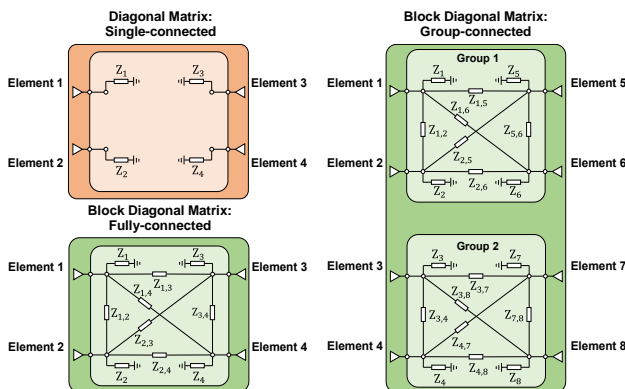


그림 1. 정적형 BD-RIS 구조에 따른 임피던스(Impedance) 네트워크[2]. (Z: Reconfigurable impedance)

\* 본 논문은 BD-RIS 빔포밍 특징 [2], BD-RIS 빔포밍 기법 [3]-[6], 그리고 BD-RIS 연구동향 [7]을 종합적으로 요약하여 BD-RIS 빔포밍 기술동향을 소개한다.

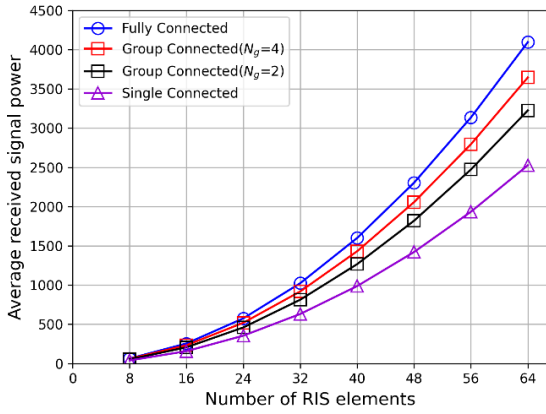


그림 3. 반사요소 개수에 따른 BD-RIS 구조 별 빔포밍 이득[2]

### A. 정적 구조 그룹 연결 BD-RIS 빔포밍

정적 구조는 반사요소 간 연결이 이뤄진 뒤 연결성에 대해 변화가 없는 구조로 그림 1 과 같이 나타낼 수 있다. BD-RIS 의 변경된 반사패턴의 수학적 모델은 유니터리 행렬 조건을 갖는다. 이로 인해, 설계 최적화의 문제의 해를 찾는 것은 어려운 문제이며, 최적점을 찾지 못하는 경우 발생한다. [3]에서는 반사패턴과 송신 빔포밍 벡터 최적화 문제를 직접적으로 해결하기 위해 매니폴드-알고리즘이 제안되었다. [3]의 높은 계산 복잡도를 완화하기 위해서, [6]에서는 두 단계 최적화 기법을 제안했으나, 한정된 채널에서만 동작이 가능하다. 따라서 여러 채널 환경에도 적용 가능한 알고리즘 확장 연구가 필요하다.

### B. 동적 구조 BD-RIS 빔포밍

동적 구조는 정적 구조와는 달리 반사요소 간 연결이 이뤄진 뒤에도 연결성에 대해 변화가 있는 구조로 그림 2 와 같이 나타낼 수 있다. 동적 구조 그룹 연결을 고려하는 [4]에서는 채널 상태 정보에 따라 반사요소 그룹의 상태가 변경 가능하며, [3]과 동일한 매니폴드-알고리즘을 적용한다. 동적 구조 비대칭 연결을 고려하는 [5]에서는 RIS 반사패턴 설계 시 RIS 반사계수 행렬, RIS 반사패턴에 대한 추가적인 순열 행렬에 대한 해를 찾아야 한다.

BD-RIS 빔포밍의 특징을 설명하기 위해 그림 3[2]은 정적 구조로 구성된 단일, 그룹, 완전 연결에 대한 최적 빔포밍 이득을 나타내고 있다.  $E$  가 증가할수록 기존 RIS 인 단일 연결과 BD-RIS 인 완전 연결의 빔포밍 이득 차이는 증가한다. 이에 따라 BD-RIS 의 적용 가능성을 알 수 있다. 하지만, 완전 연결은 구조에 따른 회로 복잡도가 증가하게 되고, 이로 인한 계산 복잡도 또한 증가하게 된다. 따라서 빔포밍 이득 성능과 복잡도 간 상충관계(Trade-off)를 고려한 적절한 BD-RIS 설계가 요구된다. 이에 따라 빔포밍 기법들 또한 특정 구조 및 운용모드에 특화된 기법이 아닌 여러 구조 및 운용모드에 통합 지원 가능한 설계가 요구된다.

## IV. 결론

본 논문에서는 BD-RIS 구조에 따른 빔포밍 설계기법을 소개했다. 본 논문에서 소개된 연구들을 기반으로 여러 BD-RIS 구조에 대한 빔포밍 기법들이 논의될 것으로 사료되며, 향후 BD-RIS 의 구조 및 운용모드에 요구되는 기술사항을 달성하는데 기여하고자 한다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2022 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원과, 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (과제번호: P0022557, IITP-2023-RS-2023-00259061121 82103820101)

## 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] Q. Li *et al*, "Reconfigurable intelligent surfaces relying on non-diagonal phase shift matrices," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 6, pp. 6367-6383, Jun. 2023.
- [6] T. Fang and Y. Mai, "A low-complexity beamforming design for beyond-diagonal RIS aided multi-user networks," *arXiv:2308.09807v1*, Jul. 2023.
- [7] 전정원, 최가은, 노송. (2023), "Beyond Diagonal 지능형 재구성 반사체 연구 동향," 『한국통신학회지 (정보와통신)』 40(12), 56-62.