

적층형 BD-RIS 기반 무선 통신 시스템을 위한 파동영역 프리코딩 설계 연구

김유겸, 이시현*

한국과학기술원 전기및전자공학부

yukyumin@kaist.ac.kr, *sihyeon@kaist.ac.kr

Wave-Domain Precoding Design for Stacked BD-RIS-Assisted

Wireless Systems.

Kim Yukyumin, Lee Si-Hyeon*

School of Electrical Engineering, KAIST

요약

본 논문은 다중 레이어 BD-RIS 를 적층한 stacked bd-reconfigurable intelligent meta surface (SBIM) 구조를 통해 디지털 제로포싱 프리코더를 파동 영역에서 근사하는 문제를 MSE 관점에서 다룬다. 유니터리 및 대칭 제약을 보존하는 레이어별 최적화 기법을 적용한 결과, SBIM 은 단일 레이어 BD-RIS 대비 향상된 근사 성능과 합전송률을 달성함을 확인하였다.

I. 서 론

재구성 지능형 표면(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)은 전자기 파면을 수동적으로 제어함으로써 RF 체인 수를 줄이면서도 빔포밍 이득을 제공할 수 있는 유망한 무선 통신 기술로 주목받고 있다. 그러나 기존 RIS 는 대각 위상 행렬로 모델링되기 때문에 파면 조형의 자유도가 제한되며, 다중 사용자 환경에서 간섭을 효과적으로 제거하는 데 구조적인 한계를 가진다. 이러한 한계를 극복하기 위해 다중 레이어를 적층한 stacked intelligent metasurface(SIM) 구조가 제안되었으나[1], 레이어 수 증가에 따라 Rayleigh-Sommerfeld 기반 회절 전파 손실이 누적되고, 여전히 대각 구조 제약으로 인해 표현력이 제한되는 문제가 존재한다[2]. 그 결과, SIM 은 깊은 레이어 구조에서 전력 손실이 발생하는 한계를 보인다. Beyond-diagonal RIS(BD-RIS)는 메타소자 간 비대각 결합을 허용함으로써 파동 영역에서의 선형 변환 공간을 확장할 수 있으며, 소수의 레이어만으로도 디지털 빔포밍에 근접한 성능을 구현할 수 있다. 그러나 기존 연구들은 주로 단일 레이어 BD-RIS 에 국한되어 있으며, 다중 레이어 BD-RIS 를 적층 했을 때의 성능 이점과 최적화 구조에 대한 분석은 충분히 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 다중 레이어 BD-RIS 를 적층한 stacked bd-reconfigurable intelligent meta surface(SBIM) 구조를 고려하여, 디지털 zero-forcing(ZF) precoder 를 파동 영역에서 근사하는 문제를 평균제곱오차(MSE) 기준으로 정식화한다. 또한, BD-RIS 의 unitary 제약을 정확히 보존하는 layer-wise alternating optimization 기반의 매니폴드 최적화 기법을 제안한다.

II. 본 론

본 논문에서는 $K = N_t$ 인 UPA 구조의 기지국을 통해 하향링크 다중 사용자에게 서비스를 제공하는 MIMO

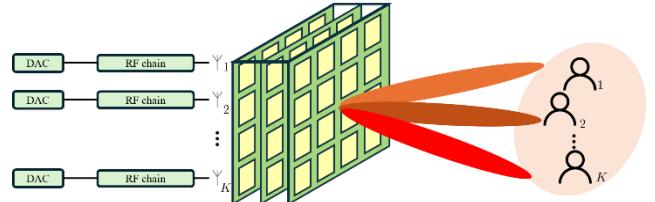


그림 1. 시스템 모델

시스템을 고려한다. 기지국은 전력 할당만 수행하며, 모든 공간 빔포밍은 L 개의 레이어로 구성된 SBIM 경우 $M = M_x M_y$ 개의 메타소자로 이루어진 UPA 구조를 가지며, 레이어 및 메타소자 간의 간격은 $d_L = d_e = 0.5\lambda$ 으로 설정한다. m 번째 메타소자의 좌표는, $(x_m, y_m) = (\text{mod}(m-1, M_x) + 1, \lceil \frac{m}{M_x} \rceil)$ 으로 설정한다. SBIM 내의 BD-RIS 사이의 채널은 Rayleigh-Sommerfeld 기반의 식 $[\mathbf{W}_l]_{m,n} = \frac{S_e d_L}{d_{mn}^2} \left(\frac{1}{2\pi d_{mn}} - \frac{j}{\lambda} \right) e^{\frac{j2\pi}{\lambda} d_{mn}}$ 으로 정의한다. 해당 식에서 S_e 는 메타소자의 면적을 의미하고, d_{mn} 는 m 번째에 있는 원소와, 이전 레이어의 n 번째 원소사이의 거리를 의미한다. SBIM 을 통과한 후 얻어지는 행렬은 BD-RIS 에서의 유니터리 및 대칭인 위상 변환 행렬 Φ_l 과 l 번째 레이어와 $l+1$ 번째 레이어 사이의 채널 \mathbf{W}_l 을 반복해 곱하는 다음과 같은 형태로 이루어져 있다. 또한 \mathbf{W}_0 의 경우 안테나와 첫 레이어 사이의 채널을 의미한다. $\mathbf{G} = \Phi_L \mathbf{W}_{L-1} \Phi_{L-1} \mathbf{W}_{L-2} \dots \Phi_1 \mathbf{W}_0$ 마지막 BSIM 레이어에서 k 번째 유저까지의 채널은 path loss β_k 를 반영한 correlated Rayleigh $\mathbf{h}_k \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \beta_k \mathbf{R}_e)$ 로 모델링하였으며, 최종적으로 end-to-end channel 은 $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_K]$ 을 통해 $\mathbf{H}^H \mathbf{G}$ 의 형태로 나타낼 수 있다[1]. 또한, 여기에 AWGN 잡음을 더하고, BS 에서 보내는 신호 스트림 벡터 $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_K]$ 와, 파워 할당을 담당하는 $\mathbf{P} = \text{diag}(\sqrt{p_1}, \dots, \sqrt{p_K})$ 를 반영한 전체 신호 모델은 $\mathbf{r} = \mathbf{H}^H \mathbf{G} \mathbf{P} \mathbf{s} + \mathbf{n}$ 으로 나타낼 수 있다. 우리는 이때 주어진

SBIM에서의 채널을 디지털 제로포싱 프리코더 \mathbf{G}_{ZF} 를 근사하는 것을 목적함수로 한다. 우리 논문에서는 두 가지 방식의 근사를 비교한다.

유저까지의 end-to-end 채널이 디지털 프리코더 \mathbf{G}_{ZF} 를 통해 빔포밍한 end-to-end 채널 $\mathbf{H}^H \mathbf{G}_{ZF}$ 과 근사 되게 하는, $P_u: \min_{\Phi, \alpha} \|\alpha \mathbf{H}^H \mathbf{G} - \mathbf{H}^H \mathbf{G}_{ZF}\|_F^2$ 와 SBIM에서의 채널이 제로포싱 프리코더 \mathbf{G}_{ZF} 에 근사 되게 하는 $P_s: \min_{\Phi, \alpha} \|\alpha \mathbf{G} - \mathbf{G}_{ZF}\|_F^2$

방식이다. 두 방식의 차이점은, 첫번째 방식의 경우 채널에 수직인 성분의 오차가 채널과 곱해지면서 상쇄되어 근사의 난이도가 비교적 낮지만, 그만큼 채널이 감소한다. 두번째 방식의 경우 채널에 수직인 성분의 오차도 모두 반영하기 때문에 난이도가 높지만 수직인 성분에 의한 감소를 최소화할 수 있다. 해당 minimization 문제를 해결하기 위해서 우리는 크게 두 가지 과정을 거친다. 먼저 우리의 문제는 레이어 간의 곱으로 인한 강한 결합을 가지고 있는데 이를 해결하기 위해 AO 방식을 사용해야 하는데, 다른 레이어는 고정한 상태에서 한 번에 한 레이어만 업데이트하는 방식을 선택하였다. 또한 앞에 곱해져 있는 스케일 factor α 는 폐형식으로 계산되며, 이를 통해 비교하는 행렬의 스케일을 맞춘다 [1]. 그 이후에 위상 변환 행렬의 unitary 및 대칭 제약을 정확히 보존하기 위해 Takagi 분해를 적용하여 문제를 unitary 행렬에 대한 최적화 문제로 변환한다[3]. 이후 Wirtinger 미분을 통해 계산된 gradient 를 unitary 매니폴드의 접공간으로 사영하여 skew-Hermitian 하강 방향을 도출하고, 지오데식 업데이트를 적용함으로써 모든 반복 과정에서 unitary 제약이 정확히 유지되도록 한다 [4],[5]. 또한 해당 업데이트에서의 수렴은 목적함수 값의 상대 변화량이 사전된 임계 값 ϵ 보다 충분히 작아지는 상황이 연속적으로 일정 횟수 T_{max} 이상 발생할 경우 수렴한 것으로 판단하고 업데이트를 종료한다. 그 이후 파워 할당의 경우 워터필링 알고리즘을 통해 업데이트 한다[6].

해당 시나리오의 시뮬레이션을 위해 반지름 5 m 원 내에 분포한 25 명의 사용자가 SBIM을 통해 근사한 zero-forcing precoder를 이용하여 통신할 때의 합 전송률을 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 SBIM의 성능은 지배적인 성능 요인에 따라 상이한 특성을 보임을 확인하였다. 고 SNR 환경에서는 잡음 영향이 미미해지고 간섭 제거 성능이 지배적이므로, P_u 의 단일 레이어 BD-RIS와 precoder 기준의 P_s SBIM ($L = 3$)가 유사한 sum-rate 성능을 달성하였다. 이는 P_u 에서는 채널에 수직인 성분이 모두 상쇄되어 없어지기 때문에 더 간섭을 효과적으로 제어할 수 있기 때문이다. 반면 잡음이 지배적인 저-중 SNR에서는 P_s SBIM ($L = 2,3$)이 더 우수한 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 저-중 SNR에서는 채널 크기가 합 전송률에 지대한 영향을 미치는데, P_u 에서는 근사 과정에서 채널에 수직인 성분을 무시함으로써 해당 방향에서 발생한 오차만큼 채널 크기가 감소하게 된다. 또한, P_s 는 SBIM의 레이어 수가 늘어갈수록 근사율이 더 좋아지기 때문에, 고 SNR 영역에서는 3-레이어, 2-레이어, 1-레이어 순으로 성능이

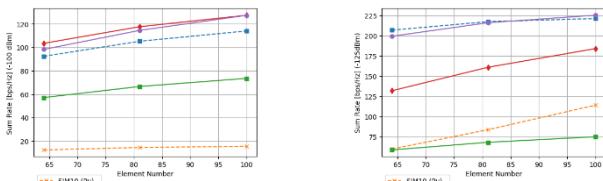


그림 2 -100dBm, -125dB(b)에서 합 전송률

개선되는 것을 확인할 수 있다. 반면 저·중 SNR 영역에서는 전파 과정에서 발생하는 손실로 인해 채널 노름이 더 작은 3-레이어 SBIM 보다, 상대적으로 채널 노름이 큰 2-레이어 SBIM이 가장 우수한 sum-rate 성능을 달성함을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 다중 레이어의 BD-RIS를 적층한 SBIM 구조를 고려하여, 디지털 제로포싱 프리코더를 파동 영역에서 근사하는 문제를 MSE 관점에서 정식화하고, 유니타리와 대칭성을 보존하며 최적화하였다. 그 결과, SBIM을 쌓았을 때 기존 한겹의 BD-RIS로는 근사할 수 없었던 문제를 근사할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 일부 통신 환경에서는 단일 레이어 BD-RIS 기반 근사 방식보다 더 우수한 성능을 보임을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 SBIM을 통해 기존의 단일 레이어 BD-RIS 보다 더 높은 표현력과 유연성을 가지고 더 많은 빔포밍을 근사 할 수 있음을 보여준다. 향후에 MSE 최소화 관점을 넘어 합전송률 기반의 직접적인 최적화를 고려하는 것이 중요한 연구 과제가 될 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(RS-2024-00398948 기여율 50%)의 지원과, 정보통신기획평가원-6G·클라우드 리더십구축을 위한 교육·연구 오픈 허브(IITP-2026-RS-2024-00428780 기여율 50%)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] AN, Jiancheng, et al. Stacked intelligent metasurfaces for efficient holographic MIMO communications in 6G. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41.8: 2380–2396.
- [2] NERINI, Matteo; CLERCKX, Bruno. Physically consistent modeling of stacked intelligent metasurfaces implemented with beyond diagonal RIS. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28.7: 1693–1697.
- [3] TAKAGI, Teiji. On an algebraic problem related to an analytic theorem of carathéodory and fejér and on an allied theorem of landau. In: *Japanese journal of mathematics: transactions and abstracts*. The Mathematical Society of Japan, 1924. p. 83–93.
- [4] HJORUNGNES, Are; GESBERT, David. Complex-valued matrix differentiation: Techniques and key results. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55.6: 2740–2746.
- [5] SANTAMARIA, Ignacio, et al. MIMO capacity maximization with beyond-diagonal RIS. In: *2024 IEEE 25th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. IEEE, 2024. p. 936–940.
- [6] YU, Wei; GINIS, George; CIOFFI, John M. Distributed multiuser power control for digital subscriber lines. *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, 2002, 20.5: 1105–1115.