

다중 사용자 - 다중 백스캐터 디바이스 환경에서의 Symbiotic 통신: 기본 원리 및 빔포밍 최적화
 김병조, 이인규
 고려대학교 전기전자공학과
 {kbj981219, inkyu}@korea.ac.kr

Symbiotic Communication: Fundamentals and Beamforming Optimization in Multi-User Multi-Backscatter Device Scenario

Byeongjo Kim and Inkyu Lee
 School of Electrical Engineering, Korea Univ.

요약

본 논문에서는 symbiotic radio (SR) 기반 다중 사용자-다중 backscatter device (BD)환경을 고려한 전송 구조를 분석하였다. 다중 BD로 인한 상호 간섭이 시스템 성능에 미치는 영향을 고려하여, 채널의 통계적 특성을 활용한 빔포밍 설계 문제를 고려하였다. 제안한 기법은 BD 링크의 전송률을 일정 수준 이상으로 보장하면서 primary link의 전송률을 효과적으로 향상시킨다.

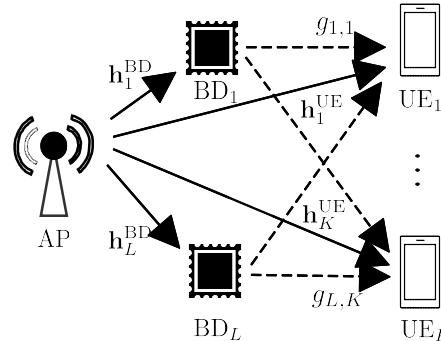
I. 서론

차세대 통신 시스템에서는 사물인터넷 (internet of things, IoT)으로 대표되는 다연결, 저지연 통신에 대한 요구가 증가함에 따라, 주파수 스펙트럼 및 에너지 효율 측면에서 심각한 제약이 예상된다. 특히 기존 IoT 송신 방식은 능동 RF 회로에 기반하고 있어 대규모 저전력 디바이스의 배치에 적합하지 않으며, IoT 전용 주파수 할당 역시 비현실적인 스펙트럼 소모를 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 symbiotic radio (SR)[1]은 backscatter device (BD)가 primary 전송 신호와 공생하여 동일한 스펙트럼과 RF 소스를 공유하면서 user equipment (UE)와 데이터를 송수신하는 통신 구조로 제안되었다. SR 환경에서 BD는 primary 전송 신호를 반사함으로써 추가적인 다중경로를 형성하는 동시에, 반사된 RF 신호에 자신의 정보를 중첩하여 전송한다. 이와 같은 공생적 전송 구조는 단일 RF 소스를 활용하여 추가적인 정보 전송을 가능하게 할 뿐만 아니라, 다중경로 이득을 통해 primary 링크의 전송률을 향상까지 기대할 수 있다.

그러나 보다 많은 연결을 지원하기 위해 다중 BD 및 다중 UE 환경을 고려할 경우, 상호 간섭의 증가로 인해 전체 시스템의 데이터 전송률 저하가 발생할 수 있다[2]. 이러한 문제를 완화하기 위해서는 간섭을 효과적으로 억제하면서도 데이터 전송률을 향상시킬 수 있는 전송 기법의 설계가 필수적이다. 이에 본 논문에서는 통신 노드 간 채널의 통계적 특성을 활용하여 BD 링크의 전송률을 일정 수준 이상으로 유지함과 동시에, primary link의 전송률을 최대화 할 수 있는 빔포밍 설계 기법을 제안한다.

II. 본론

본 논문에서는 M 개의 안테나를 장착한 AP, L 개의 BD, 그리고 K 명의 UE로 구성된 symbiotic radio 시스템을 고려한다. AP는 q 번째 타임슬롯에서 k 번째 UE에게 AP 심볼 $s_{k,q} \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 를 전송하며 l 번째 BD는 AP 심볼을 UE에게 반사함과 동시에 반사계수를 조절하여 BD 심볼 $c_l \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 을 반사 신호에 실어 보낸다. 이 때 BD 심볼은 Q 타임슬롯동안 같은 심볼을 반사하는 CSR (commensal symbiotic radio) 셋업을 가정한다.



<그림 1>: 다중 사용자 - 다중 백스캐터 디바이스 시스템

AP가 BD와 UE에게 전파하는 신호는 다음과 같이 각 유저를 위한 프리코더 \mathbf{f}_k 를 거친다.

$$\mathbf{x}_q = \sum_{k=1}^K \mathbf{f}_k s_{k,q} \quad <\text{식 1}>$$

이 때 k 번째 UE가 q 번째 타임슬롯에서 수신받는 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_{k,q} = & (\mathbf{h}_k^{\text{UE}})^H \mathbf{f}_k s_{k,q} + \sum_{l=1}^L \sqrt{\alpha} g_{l,k} c_l (\mathbf{h}_l^{\text{BD}})^H \mathbf{f}_k s_{k,q} \\ & + \sum_{i=1, i \neq k}^K (\mathbf{h}_i^{\text{UE}})^H \mathbf{f}_i s_{i,q} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1, i \neq k}^K \sqrt{\alpha} g_{l,i} c_l (\mathbf{h}_i^{\text{BD}})^H \mathbf{f}_i s_{i,q} \\ & + z_{k,q} \end{aligned} \quad <\text{식 2}>$$

여기서 채널 \mathbf{h}_k^{UE} $\mathbf{h}_\ell^{\text{BD}}$, $g_{\ell,k}$ 는 각각 AP와 k 번째 유저와의 채널, AP와 ℓ 번째 BD와의 채널, ℓ 번째 BD와 k 번째 UE와의 채널이며 α 는 BD의 반사계수이며, 첫 번째 항은 desired 신호, 두 번째 항은 BD심볼 신호, 세 번째 항은 UE 상호간의 간섭신호, 네 번째 항은 BD와 UE간의 간섭신호, 마지막 항은 $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 를 따르는 노이즈이다. k 번째 UE는 $y_{k,q}$ 를 통해서 s_k 와 $\{c_1, \dots, c_\ell\}$ 을 디코딩하는 것을 목표로 한다.

AP와 UE는 모든 채널 정보를 알고 있다고 가정하며, AP 심볼과 BD 심볼을 디코딩 하는 방법으로는 successive interference cancellation (SIC)을 사용한다. k 번째 UE는 우선 신호의 세기가 가장 큰 $s_{k,q}$ 를 우선 디코딩하며 채널벡터의 2-norm값이 큰 순서대로 BD 심볼을 디코딩한다. 그에 따른 desired AP 심볼의 data-rate는 다음과 같이 c_ℓ 에 대한 기댓

값 형태로 나타난다.

$$R_k^* = \mathbb{E}_{\{c_l\}} \left[\log_2 \left(1 + \frac{\left| \left(\mathbf{h}_k^{\text{UE}} + \sum_{l=1}^L \alpha g_{l,k} c_l \mathbf{h}_l^{\text{BD}} \right)^H \mathbf{f}_k \right|^2}{\sum_{i \neq k}^K \left| \left(\mathbf{h}_k^{\text{UE}} + \sum_{l=1}^L \alpha g_{l,k} c_l \mathbf{h}_l^{\text{BD}} \right)^H \mathbf{f}_i \right|^2 + \sigma_k^2} \right) \right] \quad <\text{식 3}>$$

또한 BD 심볼들의 data rate의 합은 다음과 같다.

$$R_k^c = \sum_{m=1}^L R_{k,m}^c = \frac{1}{Q} \log_2 \left(1 + \frac{Q \sum_{l=1}^L |\alpha g_{l,k} (\mathbf{h}_l^{\text{BD}})^H \mathbf{f}_k|^2}{\sum_{i \neq k}^K \left| (\mathbf{h}_k^{\text{UE}})^H \mathbf{f}_i \right|^2 + \sum_{l=1}^L \sum_{i \neq k}^K |\alpha g_{l,k} (\mathbf{h}_l^{\text{BD}})^H \mathbf{f}_i|^2 + \sigma_k^2} \right) \quad <\text{식 4}>$$

이 때 R_k^c 는 CSR 셋업을 가정했기 때문에 BD 심볼 전송주기 Q 로 나누어야한다.

본 논문에서는 AP의 송신 파워 제약이 있을 때 UE의 weighted sum-rate를 최대화하는 동시에 BD 심볼의 data rate도 일정 수준을 유지하는 문제를 최적화한다. 최적화 변수는 범포 \mathbf{f}_k 이며 해당 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\mathbf{P1}) \quad & \max_{\{\mathbf{f}_k\}} \quad \sum_{k=1}^K w_k R_k^* \\ \text{s.t.} \quad & R_k^c \geq \bar{R}_{c,k}, \quad \forall k, \\ & \sum_{k=1}^K \|\mathbf{f}_k\|^2 \leq P \end{aligned}$$

이 때, w_k 는 weight factor이다. 문제 **P1**은 non-convex 문제이고 목적 함수에 기댓값 연산이 있어 tractable하지 못한 문제이다. 따라서 fractional programming (FP)[3]을 이용하여 분수형태의 목적함수를 affine 함수와 concave 함수의 차 형태로 변형을 한다. 이 과정에서 목적 함수의 하한(lower-bound)를 유도할 수 있고 기댓값 연산을 쉽게 계산할 수 있게된다.

변형된 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (\mathbf{P2}) \quad & \min_{\{\mathbf{f}_k\}} \quad \sum_{k=1}^K \omega_k \left[(1 + \gamma_k) \left(\left(\sum_{j=1}^K \mathbf{f}_j^H \mathbf{D}_k \mathbf{f}_j + \sigma_k^2 \right) |\lambda_k|^2 - 2 \operatorname{Re} \{ \mathbf{f}_k^H (\mathbf{h}_k^{\text{UE}})^H \lambda_k \} \right) \right. \\ & \quad \left. \left(\sigma_k^2 + \sum_{j \neq k}^K \mathbf{f}_j^H \mathbf{D}_k \mathbf{f}_j \right) \nu_k^H \nu_k - 2 \operatorname{Re} \{ \mathbf{f}_k^H (\mathbf{C}_k^{\frac{1}{2}})^H \nu_k \} \right] + \beta_k \leq 0, \quad \forall k \\ & \sum_{k=1}^K \|\mathbf{f}_k\|^2 - P \leq 0 \end{aligned}$$

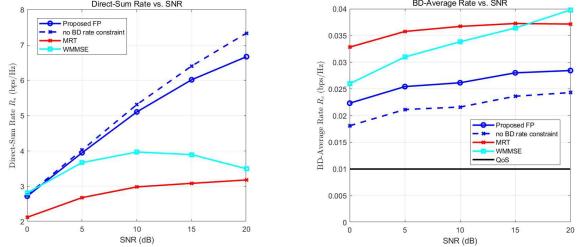
$$\text{이 때 } C_k = \sum_{\ell=1}^L |\alpha g_{\ell,k}|^2 \mathbf{h}_{\ell}^{\text{BD}} (\mathbf{h}_{\ell}^{\text{BD}})^H, \quad D_k = C_k + \mathbf{h}_{\ell}^{\text{BD}} (\mathbf{h}_{\ell}^{\text{BD}})^H,$$

$C_k = C_k^{\frac{1}{2}} (C_k^{\frac{1}{2}})^H$ 이다. 또한 변형 과정에서 보조 변수 $\gamma_k, \lambda_k, \nu_k$ 를 도입하였고 목적함수와 제약조건을 다음과 같이 보조 변수에 대해 최대가 되도록하는 optimal 값을 대입하여 **P1**의 하한과 동일한 형태가 된다.

$$\begin{aligned} \gamma_k^* &= \frac{\mathbf{f}_k^H \mathbf{h}_k^{\text{UE}} (\mathbf{h}_k^{\text{UE}})^H \mathbf{f}_k}{\sigma_k^2 + \sum_{j=1}^K \mathbf{f}_j^H \mathbf{D}_k \mathbf{f}_j - \mathbf{f}_k^H \mathbf{h}_k^{\text{UE}} (\mathbf{h}_k^{\text{UE}})^H \mathbf{f}_k}, \\ \lambda_k^* &= \frac{(\mathbf{h}_k^{\text{UE}})^H \mathbf{f}_k}{\sigma_k^2 + \sum_{j=1}^K \mathbf{f}_j^H \mathbf{D}_k \mathbf{f}_j}, \\ \nu_k^* &= \frac{\mathbf{C}_k^{\frac{1}{2}} \mathbf{f}_k}{\sigma_k^2 + \sum_{j \neq k}^K \mathbf{f}_j^H \mathbf{D}_k \mathbf{f}_j} \end{aligned}$$

P2는 최적화 변수 \mathbf{f}_k 에 대해 convex한 QCQP (quadratic constraint quadratic programming) 형태이며 CVX optimizer를 통해 풀 수 있다. 그 이후 optimal 보조 변수를 대입하고 다시 문제를 푸는 AO (alternative optimization) 방법을 통해 최적해를 도출한다.

본 논문에서는 다음과 같은 환경에서 실험을 진행하였다. \mathbf{h}_k^{UE} $\mathbf{h}_{\ell}^{\text{BD}}$, 는



<그림 2>: SNR에 따른 primary link rate와 BD link rate

공분산 행렬이 I인 rayleigh fading을 따른다고 가정하였고 $g_{\ell,k}$ 는 1이다. 반사 계수 α 는 0.7로 가정하였다.

<그림2>는 제안하는 기법을 다중 UE 환경에서 최적해를 도출하는 것으로 알려진 WMMSE기법과 AP-UE 채널의 conjugate transpose를 범포 머로 사용하는 MRT 기법과 비교하였을 때, SNR에 따른 primary link의 sum-rate를 도시한 그래프이다. 타 기법 대비 더 높은 sum-rate을 달성하는 것을 확인할 수 있으며, BD rate 제약조건이 있을 때와 없을 때를 비교하였다. <그림3>은 SNR에 따른 BD link의 average-rate을 도시한 그래프이다. 타 기법 대비 rate은 떨어지지만 QoS를 만족하는 것을 확인 할 수 있다. <그림3>을 <그림2>와 같이 비교하였을 때 average BD-rate은 타 기법 대비 낮지만 희생한 rate 대비 primary sum-rate이 더 향상 된 것을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 다중 BD 및 다중 UE 환경에서의 SR 시스템을 고려하고, 간섭을 제어하면서 전송률을 향상시키기 위한 범포링 설계 기법을 제안하였다. 제안한 방법은 BD 링크의 품질을 유지하는 동시에 primary link의 전송률을 효과적으로 최대화할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구로는 imperfect CSI 환경 및 BD 수 증가에 따른 분석으로의 확장이 가능할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단 및 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2022-NR070834)

참 고 문 현

- [1] R. Long, Y.-C. Liang, H. Guo, G. Yang, and R. Zhang, "Symbiotic Radio: A New Communication Paradigm for Passive Internet of Things," IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 2, pp. 1350-1363, Feb. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2954133.
- [2] J. Wang, Y.-C. Liang, and S. Sun, "Multi-User Multi-IoT-Device Symbiotic Radio: A Novel Massive Access Scheme for Cellular IoT," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 23, no. 9, pp. 11876-11891, Sep. 2024, doi: 10.1109/TWC.2024.3387140.
- [3] W. Wang and K. Shen, "Fractional Programming for Stochastic Precoding over Generalized Fading Channels," arXiv preprint arXiv:2507.06944, Jul. 2025.