

# 지능반사표면 협력 무선충전통신 네트워크

최지현, 김윤희  
경희대학교 전자공학과  
{solbangwool\_, yheekim}@khu.ac.kr

## Intelligent Reflecting Surface Empowered Wireless Powered Communication

Jihyun Choi, Yun Hee Kim  
Dept. of Electronic Engineering, Kyung Hee University

### 요약

본 논문은 지능반사표면 협력 비직교다중접속기반 무선충전통신 네트워크를 고려한다. 해당 시스템에서 전력송신기와 정보수집기가 분리되어 있을 때, 전력 전송과 정보 전송 시의 IRS 반사계수 및 시간 할당 등의 자원 최적화를 통해서 최대 합 전송률 성능을 제공한다.

### I. 서론

무선충전통신 네트워크 (wireless powered communication network: WPCN)는 배터리 용량이 작은 IoT 기기의 배터리 수명을 개선하는 방법으로 스마트 시티, 스마트 농업 등에서 고려되고 있다. 한편 지능반사표면 (intelligent reflecting surface: IRS)은 다수의 반사 요소들을 제어하여 채널 환경을 성능 목적에 맞게 바꾸는 기술로, 특히 WPCN에 적용하여 무선 충전 효율과 통신 성능을 향상하는 연구가 이루어지고 있다 [1]–[2]. 본 논문에서는 전력 송신기와 정보수집기가 별개로 존재하는 WPCN에서 전력 송신과 정보 수집을 위해 합 전송률을 최대화 하는 IRS 반사계수 및 자원할당 최적화 기법을 도출한다.

### II. 시스템 모델 및 문제 정의

그림 1과 같이  $K$ 개 IoT 기기가 전력송신기(PS)로부터 에너지를 수확하여 정보수집기(DC) 정보를 전송하는 WPCN 시스템을 고려한다. 송신 안테나 수가  $M$ 인 전력송신기, 단일 안테나의 IoT 기기, 그리고 단일 안테나의 정보수집기 사이의 직접 채널은 막혀있고,  $N$ 개의 반사 요소를 갖는 IRS에 의한 릴레이 채널만이 존재한다. 전력송신기와 IRS 사이의 채널은  $\mathbf{G}_0 \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 로, IRS와 정보수집기 사이의 채널은  $\mathbf{g}_1 \in \mathbb{C}^N$ 로, IRS와 기기  $k$  사이의 채널은  $\mathbf{f}_k \in \mathbb{C}^N$ 로 나타낸다. 무선전력전송 (wireless power transfer: WPT) 단계와 무선정보전송 (wireless information transfer: WIT) 단계에서의 IRS 반사 벡터는 각각  $\boldsymbol{\theta}_0 \in \mathbb{C}^N$ ,  $\boldsymbol{\theta}_1 \in \mathbb{C}^N$ 이다.

WPT 단계에서 전력송신기가 전력 신호  $s_0 \in \mathbb{C}$ 를 송신벡터포밍 벡터  $\mathbf{v} \in \mathbb{C}^M$ 로 전송할 때, 기기  $k$ 가 수신한 신호는 잡음을 제외하면 다음과 같다.

$$y_k = \sqrt{P_0} \mathbf{f}_k^T \text{diag}(\boldsymbol{\theta}_0) \mathbf{G}_0^T \mathbf{v} s_0 = \sqrt{P_0} \boldsymbol{\theta}_0^T \mathbf{H}_{0,k}^T \mathbf{v} s_0. \quad (1)$$

여기서  $P_0$ 는 전력송신기의 송신 전력,  $\mathbf{H}_{0,k} = \mathbf{G}_0 \text{diag}(\mathbf{f}_k)$ 는 전력송신기로부터 기기  $k$  사이의 통합 채널이다. 이때 에너지 수확 효율이  $\eta_k$ 인 기기  $k$ 가 WPT 시간  $\tau_0$  동안 수확한 에너지는 아래와 같다.

$$E_k = \eta_k \tau_0 |\boldsymbol{\theta}_0^T \mathbf{H}_{0,k}^T \mathbf{v}|^2. \quad (2)$$

각 기기는 수확한 에너지를 이용해 WIT 시간  $\tau_1$  동안 정보를 전송한다. 이때 정보수집기에서 수신한 신호는 다음과 같이 나타난다.

$$y_D = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \mathbf{g}_1^T \text{diag}(\boldsymbol{\theta}_1) \mathbf{f}_k s_k + n = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \mathbf{h}_{1,k} \boldsymbol{\theta}_1 s_k + n. \quad (3)$$

여기서 기기  $k$  송신 전력은  $P_k = E_k / \tau_1 = \eta_k \tau_0 |\boldsymbol{\theta}_0^T \mathbf{H}_{0,k}^T \mathbf{v}|^2 / \tau_1$ 이고,  $n$ 은

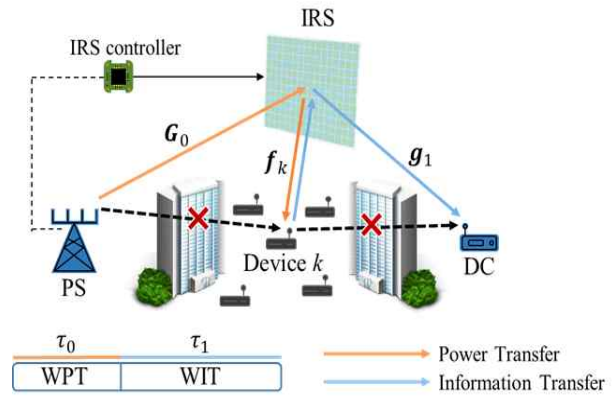


그림. 1 지능반사표면 협력 무선충전통신 네트워크 시스템 모델

정보수집기에서의 가우시안 복소잡음,  $\mathbf{h}_{1,k} = \mathbf{g}_1^T \text{diag}(\mathbf{f}_k)$ 는 기기  $k$ 로부터 정보수집기 사이의 통합 채널이다. 따라서 시스템의 합 전송률은 다음과 같다.

$$R_{sum} = \tau_1 \log_2 \left( 1 + \frac{P_0 \tau_0}{\sigma^2 \tau_1} \sum_{k=1}^K \eta_k |\boldsymbol{\theta}_0^T \mathbf{H}_{0,k}^T \mathbf{v}|^2 |\mathbf{h}_{1,k} \boldsymbol{\theta}_1|^2 \right). \quad (4)$$

이로부터 WPT, WIT 시간 할당  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_0, \tau_1]^T$ , 송신벡터포밍  $\mathbf{v} \in \mathbb{C}^M$ , IRS 반사 벡터  $\boldsymbol{\theta}_i \in \mathbb{C}^N$ 를 최적화하여 합 전송률을 최대화하는 문제를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{\tau}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\theta}_0, \boldsymbol{\theta}_1} \quad & R_{sum}(\boldsymbol{\tau}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\theta}_0, \boldsymbol{\theta}_1) \\ \text{s.t.} \quad & |\boldsymbol{\theta}_{0n}| = 1, |\boldsymbol{\theta}_{1n}| = 1, \quad n = 1, 2, \dots, N, \\ & \|\mathbf{v}\|^2 \leq 1, \\ & \tau_0 + \tau_1 = 1. \end{aligned} \quad (5)$$

### III. 최적화 방법 및 성능 결과

상기 문제는 먼저 시간 할당  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_0, \tau_1]^T$ 과 나머지 변수의 교대 최적화 방법으로 풀 수 있다. 이때 시간 할당을 고정하면 최적화 문제 (5)는 다음의 등가 문제로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{v}, \boldsymbol{\theta}_0, \boldsymbol{\theta}_1} \quad & \sum_{k=1}^K \eta_k |\boldsymbol{\theta}_0^T \mathbf{H}_{0,k}^T \mathbf{v}|^2 |\mathbf{h}_{1,k} \boldsymbol{\theta}_1|^2 \\ \text{s.t.} \quad & |\boldsymbol{\theta}_{0n}| = 1, |\boldsymbol{\theta}_{1n}| = 1, \quad n = 1, 2, \dots, N, \\ & \|\mathbf{v}\|^2 \leq 1. \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)의 목적함수를  $\Gamma$ 로 나타내면 각 변수에 대해 아래처럼 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
\Gamma &= \sum_{k=1}^K \eta_k |\theta_0^T \mathbf{H}_{0,k}^T \mathbf{v}|^2 |h_{1,k} \theta_1|^2 \\
&= \mathbf{v}^H \mathbf{Q}_v \mathbf{v} = \mathbf{v}^H \sum_{k=1}^K |h_{1,k} \theta_1|^2 \mathbf{H}_{0,k}^* \theta_0^* \theta_0^T \mathbf{H}_{0,k}^T \mathbf{v} \\
&= \theta_0^T \mathbf{Q}_{\theta_0} \theta_0^* = \theta_0^T \sum_{k=1}^K \eta_k |h_{1,k} \theta_1|^2 \mathbf{H}_{0,k}^T \mathbf{v} \mathbf{v}^H \mathbf{H}_{0,k}^* \theta_0^* \\
&= \theta_1^H \mathbf{Q}_{\theta_1} \theta_1 = \theta_1^H \sum_{k=1}^K \eta_k |\theta_0^T \mathbf{H}_{0,k}^T \mathbf{v}|^2 h_{1,k} h_{1,k}^H \theta_1.
\end{aligned} \tag{7}$$

다시 각각의 변수에 대해서 교대 최적화를 적용하면 송신빔포밍 벡터 최적화를 위한 문제는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
\max_{\mathbf{v}} \quad & \mathbf{v}^H \mathbf{Q}_v \mathbf{v} \\
\text{s.t.} \quad & \|\mathbf{v}\|^2 \leq 1.
\end{aligned} \tag{8}$$

해당 문제의 최적 해는 행렬  $\mathbf{Q}_v$ 의 최대 고유값을 제공하는 고유벡터로 얻을 수 있다. 다음으로 WPT, WIT 단계의 IRS 반사 벡터 최적화 문제는 낮은 연산 복잡도를 갖는 순차적 블록 근사 방법을 적용한다. 각각의 변수에 대해 1차 테일러 확장 기반 근사식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_0^T \mathbf{Q}_{\theta_0} \theta_0^* \approx \hat{\theta}_0^T \mathbf{Q}_{\theta_0} \hat{\theta}_0^* + 2\text{Re}\left\{\hat{\theta}_0^T \mathbf{Q}_{\theta_0} (\theta_0 - \hat{\theta}_0)^*\right\} \tag{9}$$

$$\theta_1^H \mathbf{Q}_{\theta_1} \theta_1 \approx \hat{\theta}_1^H \mathbf{Q}_{\theta_1} \hat{\theta}_1 + 2\text{Re}\left\{\hat{\theta}_1^H \mathbf{Q}_{\theta_1} (\theta_1 - \hat{\theta}_1)\right\} \tag{10}$$

여기서  $\hat{\theta}_0, \hat{\theta}_1$ 는 각 IRS 반사 벡터의 이전 추정값으로 다음 해를 구하기 위한 국소 지점이다. 해당 근사식을 최대화하는 최적해는 [2]의 방법을 확장하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_0^\dagger = \exp\left(-j \arg\left\{\hat{\theta}_0^T \mathbf{Q}_{\theta_0}\right\}^H\right) \tag{11}$$

$$\theta_1^\dagger = \exp\left(j \arg\left\{\hat{\theta}_1^H \mathbf{Q}_{\theta_1}\right\}^H\right) \tag{12}$$

위의 방법들을 교대로 이용하여 반복적으로 합 전송률을 최대화하는 해를 구한 후 [1]의 자원할당 최적화 방법을 이용하여 최적의 WPT 시간을 구한다.

#### IV. 성능 결과 및 결론

본 논문에서는 WPT, WIT 단계의 IRS 반사 벡터 최적화 문제에 대해 기존의 반정부호 완화 기반 방법과 (SDR-Based) 방 [1] 1차 테일러 확장 바탕의 순차적 블록 근사 기반 방법 (SCA-Based) 사용하여 시스템을 최적화했을 때 합 전송률과 복잡도를 그림 2에 보였다. 여기서  $M=2$ 이고  $K=4$ 로 설정하였으며 성능 도출 조건은 [1]이다. 그 결과 그림 2(a)에서 IRS 반사 원소 수  $N$ 이 클 때 두 방법의 성능 차이가 보이기 시작하나, 순차적 블록 근사 기반 방법의 성능 저하가 적으면서 복잡도가 매우 작은 점에서 유리하다.

#### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 재원 한국연구재단의 개인기초연구 (NRF-2021R1A2C1005869)와 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업의 (IITP-2021-0-02046) 연구결과로 수행되었음.

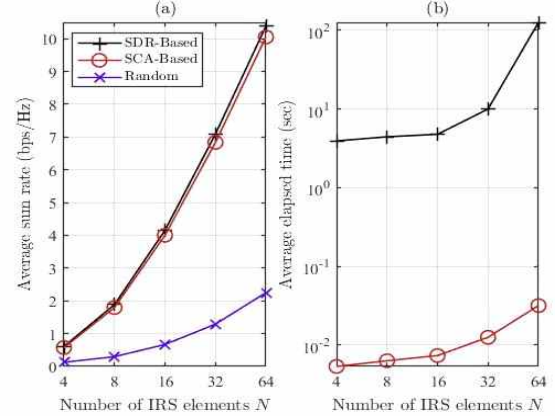


그림. 2 IRS 성분 수의 증가에 따른 성능 차이. (a) 합 전송률 성능, (b) 연산시간

#### 참 고 문 헌

- [1] D. Song, W. Shin and J. Lee, "A Maximum Throughput Design for Wireless Powered Communication Networks With IRS-NOMA," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 4, pp. 849-853, April 2021, doi: 10.1109/LWC.2020.3046722.
- [2] Q. Wu, X. Zhou and R. Schober, "IRS-Assisted Wireless Powered NOMA: Do We Really Need Different Phase Shifts in DL and UL?," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 7, pp. 1493-1497, July 2021, doi: 10.1109/LWC.2021.3072502.