

시변 환경에서 점대점 무선통신시스템이 공존할 때 다중 입출력 무선 전력 전달

*고영우 *문영식 *김호연 *윤종윤 *탁준우 *노종선

*서울대학교

{kyw1623, myskill, ferui, yjy998, jwt}@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr

Multuser MIMO wireless energy transfer with coexisting point-to-point system in time-varying channel

*Yeong-Woo Ko, *Young-Sik Moon, *Ho-Youn Kim, *Jong-Yoon Yoon, *Jun-Woo Tak, *Jong-Seon No

*Seoul National Univ.,

요 약

본 논문에서는 송신단이 1 개이고 수신단이 1 개인 점대점 방식 채널과 무선 전력 전달 채널이 같은 주파수 대역을 사용하는 상황에서의 전력 신호로부터 정보 수신단이 받는 간섭을 최소화 하는 기법을 고려한다. 본 논문에서는 시변 채널에서 무선 전력 전달 시스템에서 사용하는 신호의 공분산 행렬의 랭크를 낮춤에 따라 정보 수신단 에서 평균 전송 자유도의 감소를 줄일 수 있음을 보인다.

I. 서론

미래지향적인 에너지 전달 기술 중 하나로 무선 주파수 신호를 통한 무선에너지 전달기술이 주목 받고 있다. 이러한 시스템과 이전에 존재하던 무선 정보전달 시스템을 결합하여 많은 새로운 시스템 모델이 제안되고 있다. 예를 들어, 정보와 파워를 동시에 전송하는 시스템, 무선 전력을 원동력으로서 작동하는 통신 시스템 등이 있으며, 무선 기기들에 적용될 수 있다. 본 논문에서는 와 같이 무선 전력 전달과 무선 정보 전달을 완전히 결합하여 생각하는 것 대신에, 두 시스템이 같은 공간에서 서로 분리된 상태로 존재하는 경우에 대하여 생각한다. 특히, 두 시스템이 같은 주파수대역을 공유하는 상황에서 무선 전력 전달 신호가 무선 정보 전달 시스템에 간섭 신호로서 작용하는 상황을 고려한다. 정보송신신호가 전력 수신단 에게 미치는 영향은 전력 전달의 입장에서 크게 방해를 받지 않고 신호의 세기가 작다고 가정한다. 논문 [1]에서 준정적 페이딩 채널에서의 간섭신호 최적화 기법을 제안하였으며 본 논문에서는 시변 채널에 대하여 고려한다. 무선 전력 전달에는 변화를 적게 하면서 이러한 간섭을 최소화 하는 것이 본 논문의 목적이다. 본 논문에서는 채널정보의 변화가 빠르게 일어날 때 정보 수신단 에서의 간섭신호를 최소화하는 전력신호 송신방법을 제안한다.

II. 본론

II.1 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1 과 같이 점대점 무선 통신 시스템

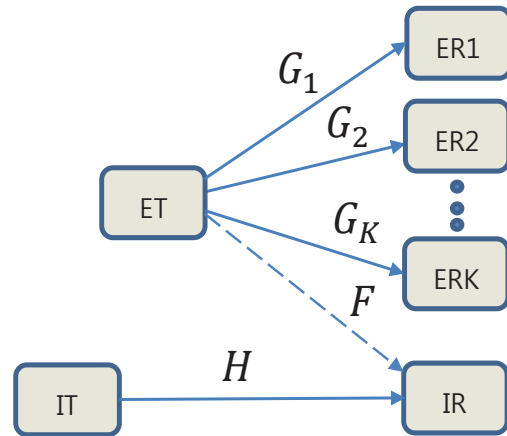


그림 1 무선 전력 전달 및 무선 통신 시스템 채널

템과 K -유저 다중 입력 다중 출력 시스템을 고려한다. 전력 송신단을 ET, 수신단을 ER, 정보 송신단을 IT, 정보 수신단을 IR 이라 하고, 전력 송신단과 수신단 에서의 안테나 수를 M_E, N_E 정보 송신단과 수신단 에서의 안테나 수를 M_I, N_I 라 한다. ET 에서 i 번째 ER 로 가는 채널을 G_i , IT 에서 IR 로 가는 채널을 H , ET 에서 IR 로 가는 간섭채널을 F 라고 한다. ET 에서 ER 로 전송하는 신호는 $\mathbf{x}_E \in \mathbb{C}^{M_E \times 1}$, IT 에서 IR 로 전송하는 신호를 $\mathbf{x}_I \in \mathbb{C}^{M_I \times 1}$ 이고 각각에 해당하는 공분산 행렬은 $\mathbf{S}_E = \mathbf{E}(\mathbf{x}_E \mathbf{x}_E^H)$, $\mathbf{S}_I = \mathbf{E}(\mathbf{x}_I \mathbf{x}_I^H)$ 이다. ($\mathbf{E}()$ 는 평균이며 \mathbf{H} 는 복합공역전치이다.) 이때, $d_E = \text{rank}(\mathbf{S}_E)$ 를 전력 송신단 에서 발사하는 빔의 개수로 볼 수 있다. 각 송신단 에서 보낼 수 있는 최대 전력 합을 $\mathbf{P}_E > \mathbf{0}, \mathbf{P}_I > \mathbf{0}$ 으로 한다. 일반적인 상황에서 정보 송신단으로 부터 전력 송신단 까지의 거리는 상대적으로 더 멀고 신호의 세기도 약하므로 생략할 수 있고,

따라서 k 번째 전력 수신단 에서 받는 전력은 다음과 같다.

$$Q_k(S_E) = \eta \text{Tr}(G_k^H G_k S_E)$$

$0 < \eta < 1$ 는 수신단 에서의 RF 신호를 전기에너지로 변환할 때의 효율이며 1로 가정한다.

다음으로, 정보 수신단 에서의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = Hx_I + Fy_E + n$$

여기서 Hx_I 은 받기를 원하는 신호이고 $Fy_E + n$ 는 간섭신호로서 작용한다. 부가적인 백색 가우시안 잡음이라고 가정하고 세기를 σ^2 라고 했을 때 간섭-잡음 합 신호의 공분산 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$E((Fx_E + n)(Fx_E + n)^H) = FS_E F^H + \sigma^2 I$$

이때, 정보 수신단 에서 받는 신호의 수신률은 다음과 같다.

$$R(S_E, S_I) = \log_2 \det(I + (FS_E F^H + \sigma^2)^{-1} H S_I H^H)$$

II.2 다중 전력 전달 신호 최적화

우선 점대점 방식 채널을 제외하고 전력 전달 채널만을 고려해보면 다음과 같은 convex 문제를 통해 전력 전송 신호를 최적화 할 수 있다.

$$(P1) : \begin{aligned} & \max_{S_E, \theta} \theta \\ & \text{s. t. } \text{Tr}(G_k^H G_k S_E) \geq \alpha_k \theta, \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \\ & S_E \geq 0, \text{tr}(S_E) \leq P_E \end{aligned}$$

위 문제를 통해 구한 최적화 값을 S_E^*, θ^* 라고 했을 때, 공분산 행렬 S_E^* 의 랭크를 d_E^* 로 놓는다. 이때, 이 신호가 정보 수신단에 들어간다고 했을 경우, 수신단 에서의 전송률은 다음과 같다

$$R(S_E^*, S_I) = \log_2 \det(I + (FS_E^* F^H + \sigma^2)^{-1} S_I H^H)$$

이 때, 위 식을 최대로 하는 S_I 의 값을 S_I^* 로 정한다.

II.3 간섭 신호 최소화 조건

수신단 에서 받게 되는 간섭신호의 공분산 행렬이 S_E^* 이고, 정보 송신신호의 공분산 행렬이 S_I^* 일 때, 평균 전송 자유도는 논문[1]에서 제시한 바와 같이 다음과 같다.

$$\frac{R(S_E^*, S_I^*)}{\log_2(P_I)} = \min(M_I, \max(N_I - d_E^*, 0))$$

따라서, 전력 신호의 공분산 행렬의 랭크가 작을수록 정보 수신단 에서의 평균 전송 자유도의 감쇠가 줄어든다는 것을 알 수 있다.

II.3 단일 랭크 신호 기법

논문[1]에서 제시한 것처럼 준 정적 채널의 경우, 하나의 전송 구간 동안 채널이 일정하기 때문에 시간 축을 분할 함으로서 전력신호의 랭크를 1로 낮추고 d_E^* 만큼의 신호를 전송하는 방법을 통해 간섭신호로서 영향을 최소화 할 수 있다. 그런데 채널의 상황이 빠르게 변화하는 시변 환경의 경우, 하나의 전송구간을 나누는 것이 불가능해진다. 이 경우에 위의 방법처럼 한 구간에서 랭크 1을 가지는 d_E^* 개의 신호를 보낼 수는 없지만, d_E^* 개의 신호 중 하나를 선택하여 그 신호를 보내는 방법을 생각해

볼 수 있다. 이 경우 전력 수신단이 요구한 비율만큼 전력이 전달되지는 않지만 전력 송신 신호의 랭크가 1이므로 간섭신호로서의 영향은 최소화 된다. 또한 다음 전송 구간에서, 이전 구간에서 전력을 상대적으로 덜 받은 수신단 에게 전력전달을 원활하게 하는 랭크가 1인 S_E 를 선택함으로써 전력 수신단 에서의 수신 받는 전력의 균형을 조절할 수 있다.

II.4 모의실험 결과

본 절에서 제안한 기법을 사용한 시스템의 성능을 자유도 관점에서 모의실험을 통하여 비교한다. 전력 송신단 에서의 전달하는 신호의 빔의 랭크를 1로 낮출 때, 즉 단일 빔일 때와 랭크를 낮추지 않고 (P1)에서 구한 공분산 행렬을 적용하여 다중 빔으로 전송할 때 각각의 경우에서 정보 수신단의 안테나 개수에 따라 평균 전송 자유도를 비교해본다.

N_I	평균 전송 자유도 (다중 빔 전송기법)	평균 전송 자유도 (단일 빔 전송기법)
2	0.12	0.3
4	0.56	0.8

II.5 추가 연구 내용

모의실험 결과를 보았을 때, 기존 기법들에 비해 제시된 기법이 실제로 자유도 측면에서 향상이 있음을 확인할 수 있으며 전력 전달에서 조금은 손해를 보는 것을 감안하더라도 정보 수신단이 전력 전달 시스템 상에 단시간 머무르는 상황에서 정보전달이 중요한 상황일 경우 의미를 가지는 것을 알 수 있다.

추가적인 연구로써 랭크가 1인 d_E^* 개의 S_E 중 하나를 선택할 때, 정보 수신단으로 부터 점대점 채널정보를 받아 어떤 빔을 선택했을 때 정보 전달 신호에 영향을 덜 주는지 계산하여 선택하는 기법에 대해 생각 해볼 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 점대점 정보 전달 시스템과 무선 전력 전달 시스템이 공존하는 경우, 시변 환경일 때, 정보 수신단 에서 무선 전력 전달신호로부터 받는 간섭을 최소화 하는 기법을 제시하였다. 모의실험을 통해 제안한 방법을 통해 자유도 감쇠를 줄일 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] OZie Xu, Suzhi Bi, and Rui Zhang, "Multiuser MIMO Wireless Energy Transfer With Coexisting Opportunistic Communication" in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 273-276, June. 2015
- [2] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "interference alignment and the degrees of freedom of the K user interference channel," *Information Theory, IEEE Transaction on*, vol. 54, no. 8, pp. 3425-3441, Aug. 2008.