**Robust Beamforming Design and Time Allocation for IRS-assisted Wireless Powered Communication Networks**

[**https://arxiv.org/pdf/2105.06226.pdf**](https://arxiv.org/pdf/2105.06226.pdf)

1. **SYSTEM MODEL**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 다음 그림과 같은 **IoT 네트워크에서의 IRS-assisted WPCN**을 도입한다.   * **IRS: intelligent reflecting surface**   이 시스템의 구성은 다음과 같다.   * **N개의 antenna**가 있는 HAP (Hybrid Access Point) * 건물에 배치된 **M개의 reflection element**가 있는 IRS * 1개의 antenna가 있는 **K명의 사용자** (또는 **K개의 IoT device**)   WPCN에서는 HAP이 downlink를 통해 에너지를 전송하고, 사용자는 HAP로부터 수신한 에너지를 이용하여 uplink를 통해 정보를 전송한다.   * HAP의 antenna와 IRS의 배열은 **uniform linear array (ULA)**에 분포되어 있다.  |  |  | | --- | --- | |  | **Downlink**에 있는 IRS의 **energy reflection coefficient matrix** | |  | **Uplink**에 있는 IRS의 **information reflection coefficient matrix** |   여기서 다음 조건을 만족시킨다.   * 매우 큰 path loss 때문에 IRS에 의해 2번 이상 반사된 신호는 ignore될 수 있으므로, 이라고 한다. * **IRS의 phase shift는 HAP에 의해 계산**되고, 피드백 채널을 통해 IRS controller에 의해 전송된다고 하자. |

1. **SYSTEM MODEL (Cont.)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Downlink WET과 Uplink WIT에서는 각각 다음과 같다.   |  |  | | --- | --- | | Downlink WET | **HAP**로부터 **IRS**로의 channel gain :  **IRS**로부터 **k번째 user**로의 channel gain :  **HAP**으로부터 **k번째 user**로의 channel gain : | | Uplink WIT | **IRS**로부터 **HAP**로의 channel gain :  **k번째 user**로부터 **IRS**로의 channel gain :  **k번째 user**로부터 **HAP**로의 channel gain : |  * Channel은 **direct channel (HAP-user channel)과 cascaded channel (HAP-IRS-user channel)**로 각각 구성되어 있다. * 모든 채널이 quasi-static flat fading하다, 즉 각각의 transmission time duration **T, , , 가 모두 constant**라고 가정한다.   HAP과 user 사이의 채널이 blocked될 수 있지만, wireless channel은 scattering이 많이 발생하므로 **HAP과 user 사이의 채널은 Rayleigh fading으로 모델링**될 수 있다. 이것은 으로 표현할 수 있다.   * 의 **각 element가 서로 독립이고 identical하게 분포**되어 있다고 가정한다. (CSCG random variable with mean=0 and unit variance) * 따라서 **HAP과 user 사이의 channel gain**은 다음과 같다.   여기서 은 reference distance 에서의 path loss이고, 는 HAP과 k번째 user 사이의 거리이다.  또한 HAP과 IRS 사이의 채널과 IRS와 user 사이의 채널은 **line-of-sight (LoS) component**를 가지며, 따라서 **Rician channel로 모델링**할 수 있고, 이것은 다음과 같이 나타낸다.  여기서 각 변수는 다음을 나타낸다.   |  |  | | --- | --- | |  | 대응되는 채널의 **Rice Factor** | | , | 대응되는 채널의 **LoS (line-of-sight) component** | | , | 대응되는 채널의 **NLoS (non-line-of-sight) component** | |

1. **SYSTEM MODEL (Cont.)**

|  |
| --- |
| LoS component는 **ULA의 array response**로 나타낼 수 있는데, 이때 ULA (uniform linear array)는 다음과 같다.  여기서 는 signal의 angle of arrival (AoA) 또는 angle of departure (AoD)를 나타낸다. 또한 d는 연속되는 antenna element 간의 spacing을 나타내며, 는 carrier wavelength를 나타낸다.  따라서 LoS component **,** 는 다음과 같이 주어진다.  여기서 는 IRS에서 AoA로부터 ULA로를, 는 HAP에서 ULA로부터의 AoD를, 는 IRS에서 ULA로부터의 AoD를 각각 나타낸다.  따라서 **HAP와 IRS 사이의 channel gain**은 다음과 같이 나타낼 수 있다.  또한 **IRS와 k번째 user 사이의 channel gain**은 다음과 같다.  여기서 은 HAP과 IRS 사이의 거리를, 는 IRS와 k번째 user 사이의 거리를 각각 나타낸다. 또한, 와 o는 각각 HAP-IRS와 IRS-k번째 user 사이의 path loss exponent를 나타낸다.    여기서는 모든 user가 traditional energy supply를 가지고 있지 않으므로, **HAP transmission signal (Downlink)로부터** 에너지를 얻어야 한다.   * **위 그림과 같은 “harvest-then-transmit” 프로토콜**을 사용한다. |

1. **COMPUTATION OF HARVESTED ENERGY**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **k번째 user가 얻을 수 있는 에너지**는 다음과 같이 나타낼 수 있다.  여기서 각각은 다음을 의미한다.   |  |  | | --- | --- | |  | DL phase에서의 time duration | |  | k번째 user의 **Downlink에서의 received power**   * : k번째 user가 수신하는 energy signal * : * : * : 번째 energy beam, | |  | k번째 user의 **harvested power**   * : k번째 user가 harvest할 수 있는 최대 power * : 특정한 circuit specification과 관련된 파라미터 |   여기서 k번째 user의 **DL channel covariance matrix**를 라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.  또한 Uplink에서 k번째 user는 **DL phase에서 energy harvesting을 한 다음 HAP으로 information을 전송**한다. 이때의 transmission signal은 다음과 같다.  여기서 는 k번째 user에 의해 전송된 information signal을 나타낸다. 이때 이다. 또한 는 k번째 user의 transmit power를 나타낸다.  여기서 **k번째 user의 energy harvesting constraint**에 따라 다음과 같다. |

1. **COMPUTATION OF HARVESTED ENERGY (Cont.)**

|  |
| --- |
| 또한 **k번째 user가 얻을 수 있는 에너지** 와, **HAP에 의해 decode된 k번째 user의 information signal의 SINR** 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.   * : 대응되는 HAP-user 채널과 HAP-IRS-user 채널의 total channel estimation error matrix **()** * : k번째 user의 **transmit power** * : information signal 을 디코딩하기 위한 **beamforming vector** * : k번째 user의 **UL channel covariance matrix** |

1. **PROBLEM 1: MINIMIZE THE TRANSMISSION ENERGY OF THE HAP**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **HAP의 transmission energy를 minimize**하는 최적화 문제는 다음과 같이 정의된다.  여기서 각각이 의미하는 바는 다음과 같다.   |  |  | | --- | --- | | (28b) | **Time** allocation constraint | | (28c) | DL phase의 HAP에서의 maximum **transmit power** constraint | | (28d) | Error matrix가 를 만족시킬 때, **k번째 user의 UL에서의 energy constraint가 hold**된다. | | (28e) | Error matrix가 를 만족시킬 때, **k번째 user의 SINR constraint가 만족되어야 한다.** | | (28f), (28g) | 각각 DL과 UL에 있는 IRS의 **reflection coefficient**에 대한 constraint | |

1. **ROBUST BEAMFORMING DESIGN AND TIME ALLOCATION FOR IRS-ASSISTED WPCN**

|  |  |
| --- | --- |
| **(P1)은 non-convex 최적화 문제**이고 직접 해결할 수 없다. 따라서 (28d)와 (28e)를 다음의 Lemma 1에 따라 변환시킨다.   |  | | --- | | **Lemma 1:** 모든 **Hermitian matrix A, B**에 대해서 이면 다음이 성립한다. |   에 의해, **일 때 의 spectral norm을 사용**할 수 있다. 이때 Lemma 1에 따라 다음이 성립한다.  최악의 경우에 다음과 같이 표현될 수 있다.  이와 비슷하게 이므로 다음과 같다.  최악의 경우에 다음과 같이 표현될 수 있다.  따라서 (P1)은 다음과 같이 **(P2)로 변환**될 수 있다. |

1. **ROBUST BEAMFORMING DESIGN AND TIME ALLOCATION FOR IRS-ASSISTED WPCN – PROBLEM SOLUTION : (1) Robust Beamforming Design of HAP and user transmit power allocation**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| (P2)는 다음과 같이 **(P3)으로 변환**될 수 있다.  이것도 **여전히 non-convex optimization problem**이므로, 다음과 같이 **3개의 부분으로 나누어서 해결**한다.   |  |  | | --- | --- | | (P3.1)  With fixed and P |  | | (P3.2)  With given S and P |  | | (P3.2.1)  **(P3.2)의 변형** |  | | (P3.3)  With fixed S and |  |   여기서 **(P3.3)은 linear programming (LP) problem**이므로 CVX toolbox를 이용하여 해결할 수 있다. 따라서 **HAP의 robust beamforming design 및 user transmit power 할당 알고리즘**은 다음과 같이 표현할 수 있다. |

1. **ROBUST BEAMFORMING DESIGN AND TIME ALLOCATION FOR IRS-ASSISTED WPCN – PROBLEM SOLUTION : (2) Robust beamforming design of IRS**

|  |
| --- |
| Time allocation 와 HAP beamforming design 가 주어졌을 때, **(P2)는 다음과 같은 feasibility check problem으로 변형**된다.  여기서 **IRS phase의 (45c)와 (45e)**에 의해서 **(P4)는 convex optimization problem이 아니다.** 따라서 이 문제를 두 부분으로 나누어 해결할 것이다.   * **q를 fix하고, (P4)를 다음과 같이 (P4.1)로 변환**하여 해결한다.   (46b)의 왼쪽 부분은 다음과 같이 표현할 수 있다.  따라서 다음과 같다.  따라서 (P4.1)은 **다음과 같이 (P4.1.1)로 변환**된다.  (P4.1.1)을 해결하기 위해 보통 **SDR을 이용**하여 **non-convex한 rank-1 constraint(49d)를 relax**한다. |

**5. ROBUST BEAMFORMING DESIGN AND TIME ALLOCATION FOR IRS-ASSISTED WPCN – PROBLEM SOLUTION : (2) Robust beamforming design of IRS (Cont.)**

|  |
| --- |
| (P4)는 다음과 같이 **(P4.2)로 변환**될 수 있다.  여기서 이고 일 때 (P4.2)는 다음과 같이 **(P4.2.1)로 변환**될 수 있다.  (P4.1.1)과 같이 (P4.2.1) 역시 **(P4.2.2)로 변환**될 수 있으며, 다음과 같이 표현된다.  **Stopping criterion** 가 만족될 때까지 (P4.2.2)의 solution 도출을 시도한다. 따라서 IRS의 robust beamforming design 알고리즘은 다음과 같다. |

1. **ROBUST BEAMFORMING DESIGN AND TIME ALLOCATION FOR IRS-ASSISTED WPCN – PROBLEM SOLUTION : (3) Time Allocation**

|  |
| --- |
| **HAP beamforming design 와 IRS beamforming design e, q를 fix**한다. 이때 (P2)를 다음과 같이 **(P5)로 변환**할 수 있다.  이것은 **standard LP problem**이므로 CVX toolbox를 이용하여 해결할 수 있다. |

1. **THE OVERALL ROBUST OPTIMIZATION ALGORITHM IN IRS-ASSISTED WPCN**

|  |
| --- |
| **전반적인 Robust beamforming design and time allocation 알고리즘**은 다음과 같이 요약할 수 있다.   * **Algorithm 1**에서 **HAP beamforming design과 user power control**을 결정하였다. * **Algorithm 2**에서 **IRS beamforming design**을 결정하였다. |

1. **NUMERICAL RESULTS**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Simulation setting은 다음과 같다.   |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | HAP Position | (0,0,15m) |  | -70dBm | | IRS Position | (10m,10m,15m) |  | 10dB | | K (users) | 4 | path loss |  | | Radius | 50 (origin: (0,0,0)) |  | -30dB | | N for HAP | 6 | Reference distance | 1m | | M for IRS | 20 | Rician factor | 3dB | |  | 24mW | Convergence threshold of proposed algorithm |  | |  | 150 | |  | 0.024 | |

**8. NUMERICAL RESULTS (Cont.)**

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 제안된 **robust beamforming 설계** 및 **time allocation 알고리즘**의 convergence | **HAP 안테나의 개수**에 따른 HAP transmit energy |
|  |  |
| **Reflection element의 개수**에 따른 HAP transmit energy | **사용자의 수**에 따른 HAP transmit energy |
|  |  |
| **사용자의 SINR target**에 따른 HAP transmit energy | **Error matrix의 spectral norm**에 따른 HAP transmit energy |