**UAV-Aided Wireless Powered Communication Networks: Trajectory Optimization and Resource Allocation for Minimum Throughput Maximization**

**Available online at** [**https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8836548**](https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8836548)

|  |
| --- |
| **1. SYSTEM MODEL** |
| 여기서는 UAV가 **K개의 GT로부터 uplink를 통해 정보를 수집**하는 UAV-aided WPCN을 제안한다. 이때 **UAV와 GT는 단일 안테나**로 구성되어 있다.   * **UAV는 constant한 power source**를 가지고 있다고 가정하고, 다른 power source는 available하지 않다. * **UAV는 downlink channel을 통해 GT를 충전**시킨다. * UAV로부터 harvest된 에너지를 사용하여 **GT는 uplink를 통해 정보를 전송**한다.   + 여기서 UAV 네트워크는 **UAV가 GT의 uplink communication을 정해진 시간 T 동안 support**하며, T는 UAV의 배터리 용량과 network delay-throughput 성능에 따른 **design parameter**이다.   **<Integrated / Separated UAV WPCN>**   |  |  |  | | --- | --- | --- | |  | **Integrated** UAV WPCN | **Separated** UAV WPCN | | 그림 |  |  | | UAV 위치 |  | **ID UAV와 ET UAV**로 구분된다. | | GT 위치 |  |  | | UAV 위치의 배열 | * 여기서 **은 각 slot의 길이**를 나타낸다. * 여기서 **이산 time trajectory** 을 고려하므로 최대 speed constraint는 다음과 같다. | **(at time slot n)**  ID UAV의 위치:  ET UAV의 위치: |  * 여기서 전체 time period T를 **N개의 서로 같은 길이의 time slot**으로 나눈다. |

|  |
| --- |
| **2. PROTOCOL FOR UAV-AIDED WPCN** |
| 위 그림에서 **각 time slot을 K+1개의 subslot으로** 나누는 것을 알 수 있다.   |  |  |  | | --- | --- | --- | | 1번째 subslot | Duration: | UAV **downlink WET**에 할당 | | 나머지 subslot | Duration: | GT k의 **uplink WIT**에 할당 |   여기서 **은 최적화 대상**인 변수로, **slot n에서 k번째 subslot에서의 time duration**만큼을 차지한다. 여기서 에 대한 제약 조건은 다음과 같다.  **<WIT and WET process>**  **각 time slot의 첫 번째 subslot (** 에서 에너지 신호는 **UAV에 의하여 transmission power 로 브로드캐스팅**된다.   * 이때 downlink power 은 일반적인 UAV의 mechanical power에 비해 무시할 만큼 작고, **UAV의 실행 duration에 영향을 미치지 않는다**. * Linear EH 모델에서는 **time slot** 에서의 **GT 의 harvest된 에너지** 을 다음 수식으로 나타낼 수 있다.   여기서 **모든 GT의 energy harvesting effieicncy가 같다**고() 하면 다음과 같다.   * EH circuit의 processing delay 때문에 GT는 harvested energy 을 time slot n에서 **즉시 사용할 수 없고, future slot 에서 사용**할 수 있다.   따라서 **GT k가 time slot n에서 이용 가능한 에너지**는 다음과 같다.  여기서 은 **누적된 harvested erergy**, 는 GT k가 **과거의 time slot인 에서 사용한 energy**의 합이다. |
| **NEXT PAGE** |

|  |
| --- |
| **PREVIOUS PAGE** |
| **2. PROTOCOL FOR UAV-AIDED WPCN** |
| 따라서 GT k의 time slot n에서의 **uplink power constraint**는 다음과 같다.  여기서 **system bandwidth가 unity**로 표준화되어 있다고 하면 **GT k의 time slot n에서의 즉각적인 throughput** 은 다음과 같다. (bps/Hz)  여기서 이라고 하면 time period T에 대하여 **GT 의 평균 throughput** 는 다음과 같다.  여기서는 **각 GT k에 대한 minimum average throughput을 최대화**하고, 이를 위해 **UAV** (GTs 의 uplink power)과 **time resource allocation variable** 의 **trajectory를 joint하게 최적화**시킨다.  이를 위하여 최적화 변수 을 이용하여 GT들 간의 minimum throughput을 나타낸다. 따라서 이 성립해야 한다.  Epigraph reformulation technique를 이용하여 **minimum throughput performance를 최대화하기 위한 다음 수식을 만들 수 있다.**  여기서 **uplink transmission을 위한 에너지**는 **(9)**에 의해 제약되고 이것은 **(5)**에 의하여 유도된다. 또한 **(11)**은 **trajectory의 주기성**을 의미하며, 따라서 **UAV는 period of time T가 지난 후 starting place로 돌아와야 한다**는 것을 의미한다. |

|  |
| --- |
| **3. SEPARATED UAV WPCN** |
| Seperated UAV WPCN에서는 **2개의 서로 다른 UAV**에 대해 trajectory를 디자인한다.   * **ID UAV와 ET UAV (위치: 각각 )** * **TDMA 프로토콜**을 적용한다.   이때 다음과 같이 나타낼 수 있다.  **Time slot n**에서의 **GT k**의 **uplink energy constraint**:  **GT k**의 **average throughput**:  여기서 는 각각 **ID UAV와 ET UAV의 flight altitude**를 나타낸다.  이때 **separated UAV WPCN에 대한 minimum throughput maximization problem**은 다음과 같다.  여기서 는 각각 **ID UAV와 ET UAV의 최고 속력**을 나타낸다.   * **(P2)** 역시 **(15), (16)**에 의하여 **non-convex**하다. |

|  |
| --- |
| **4. NON-LINEAR EH MODEL-BASED SYSTEM** |
| Non-linear EH 시스템에서는 **sigmoid 함수에 기반한 모델**을 사용하고, **harvested energy** 은 다음과 같이 나타난다.  여기서 M은 EH circuit이 포화되었을 때 **GT에서의 maximum harvested power**이고, 는 circuit specification에 의한 상수이다.   * 여기서는 **(P1)**과 비슷하게 **다른 optimization problem을 수식화**할 수 있다. |
| **NEXT PAGE** |

|  |
| --- |
| **PREVIOUS PAGE** |
| **4. NON-LINEAR EH MODEL-BASED SYSTEM** |
| 여기서 **(P1-NL)**은 **(20), (21)**에 의하여 역시 **non-convex**하다. |

**5. 이후에서는 (P1), (P1-NL), (P2)의 해결 방법에 대해 알아본다.**

|  |
| --- |
| **5. PROPOSED SOLUTION – INTEGRTED UAV WPCN** |
| **(P1)**을 tractable하게 만들기 위하여 **이라는 변수**를 이용한다. 이때 모든 , 에 대하여 이다. 그러면 **(P1)**은 다음과 같이 나타낼 수 있다.  여기서 역시 **(23), (24)**에 의해 일반적으로 **non-convex**하다. |
| 이것을 해결하기 위하여 **auxiliary variable** 를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.  여기서 이라고 하면 **(23)**의 좌변과 **(24)**의 우변은 각각 다음과 같이 lower-bound된다.  **(26), (27)**에 기반하여 **(22)**에 대한 equivalent problem을 구성할 수 있다. |

|  |
| --- |
| **5. PROPOSED SOLUTION – INTEGRTED UAV WPCN** |
| **Proposition 1:** **(22)**에 대한 최적의 해는 다음 optimization problem을 해결하여 얻을 수 있다.  **(증명 생략)**  여기서 **(P1.1)** 역시 **(29), (30)**에 의하여 일반적으로 non-convex하다.  따라서 **CCCP 접근 방법을 통해 문제를 해결**하려고 한다.   * 1. **(29)**에서 uplink available energy constraint를 고려한다. * 2. **(29)**의 우변은 **과 에 대한 jointly convex function**이므로, 1차 테일러 접근**()**을 이용하여 다음과 같이 **(29)**의 우변에 대한 **lower bound**를 얻을 수 있다.   여기서 는 **과 에 대한 affine function**으로, **이고 일 때 등식이 성립**한다.  비슷한 방법으로 **(30)**의 auxiliary constraint의 우변 **(과 에 대한 joint convex function)** 역시 다음과 같이 lower bound될 수 있다.  **(32), (33)**을 이용하여 **주어진 , ,** 에 대해 **(P1.1)**에 대한 **convex approximation**을 다음과 같이 만들 수 있다. |
| **NEXT PAGE** |

|  |
| --- |
| **PREVIOUS PAGE** |
| **5. PROPOSED SOLUTION – INTEGRTED UAV WPCN** |
| **(P1.1)**에서 **(29)**의 우변을 **(32)**로 바꾸고 **(30)**의 좌변과 **(33)**의 우변을 이용하여  여기서 **(P1.1A)**는 **현존하는 convex solver를 이용하여 해결**할 수 있다.   * **(P1.1A)의 feasible region은 (P1.1)의 그것의 부분집합**이므로, **(P1.1A)**를 이용하여 항상 **(P1.1)**에 대한 **lower bound solution을 찾을 수 있다**. * **(P1.1)**의 해는 **convex problem (P1.1A)들을 각 iteration에서 해결**해 나가면서 얻을 수 있다.   + CCCP 알고리즘의 q번째 iteration에서 P1.1A의 해 **과** 을 다음과 같이 설정하여 구할 수 있다.     **(P1)**을 해결하는 알고리즘 중 하나는 오른쪽과 같다.   * **Algorithm 1이 한번 수렴**하면 이와 관련된 **(P1)**의 solution을 다음과 같이 얻을 수 있다.   가까이에 있는 GT의 위치에 대해 Algorithm 1은 **UAV control center에 의해 수행되는 off-line procedure**이다. |

|  |
| --- |
| **6. PROPOSED SOLUTION – SEPARATED UAV WPCN** |
| Trajectory **과 ,** uplink power , time resource allocation solution 는 **(P2)의 approximated problem을 iterative하게 해결**하여 얻을 수 있다.   * Non-convex problem **(P2)**를 해결하기 위하여, **(P1.1)**에서와 같이 **새로운 auxiliary variable 과** 를 도입한다. 이때 이것들은 에 대해 다음을 만족시킨다.   따라서 **(P2)**는 다음과 같이 재구성될 수 있다.  여기서 **,** 는 **5. PROPOSED SOLUTION – INTEGRTED UAV WPCN**에서 정의된 auxiliary variable이다.  여기서 **(P2.1)**은 **(40), (41)**에 의해 **non-convex**하지만, **2개의 convex function의 차이에 의하여 결정되는 것이므로 CCCP 알고리즘을 이용하여 해결**할 수 있다.   * 따라서, **CCCP 알고리즘의 각 iteration**에서 다음의 **approximated convex problem**을 해결한다.   여기서 **(44), (45)**의 접근은 **(32), (33)**으로부터 유도되었다. 따라서 **(P2.1A)**를 **iterative하게 해결하여 (P2.1)의 stationary point에 도달**할 수 있다. 이때 다음을 이용한다. (수렴 증명됨) |

|  |
| --- |
| **7. PROPOSED SOLUTION – FOR NON-LINEAR EH MODEL** |
| 주어진 time resource allocation 에 대하여 **(P1-NL)은 다음과 같이 recast**될 수 있다.  이때 Problem **(46)**는 **(20), (21)**에 의하여 non-convex하다.  이를 해결하기 위하여 **5. PROPOSED SOLUTION – INTEGRTED UAV WPCN**에서 정의된 auxiliary variable 을 이용한다.   * **(20)**의 좌변을 다음과 같이 lower-bound한다. * **(21)**의 우변을 다음과 같이 lower-bound한다.   여기서 등식은 일 때 성립한다.  **Proposition 2:** Problem **(46)**에 대한 최적의 해는 다음 최적화 문제를 해결하여 얻을 수 있다.  **(증명 생략)**  여기서는 **SCA approach**를 통해 **(P1.2)**의 **non-convexity를 해결**한다. 먼저 **(49)**의 **minimum throughput constraint**를 고려하고, **1차 테일러 급수를 에 적용**하여 **(49)**의 좌변에 대한 concave surrogate function을 다음과 같이 도출한다. |
| **NEXT PAGE** |

|  |
| --- |
| **PREVIOUS PAGE** |
| **7. PROPOSED SOLUTION – FOR NON-LINEAR EH MODEL** |
| 여기서 는 **과 에 대한 jointly concave function**으로, 부등식 **(51)**은 **일 때 등식이 성립**한다.  **Proposition 3:** 주어진 에 대해 **(50)**의 우변의 concave surrogate function은 다음과 같이 변형될 수 있다.  **(증명 생략)**  **(51), (52)**를 이용하여 **(P1.2)**를 다음과 같이 **에 대한 convex problem**으로 접근할 수 있다.  **(P1.2)**의 최적해는 **(P1.2A)**를 **SCA procedure에 따라 iterative하게 해결**하여 얻을 수 있다. SCA 알고리즘의 i번째 iteration에서 **(P1.2A)**는 으로 계산된다.    **<Time Resource Allocation>**  Time resource allocation **을 주어진 과 에 대하여 찾는 문제**는 다음과 같이 나타낼 수 있다.  이것은 **convex LP이므로 다음과 같은 standard LP 최적화 알고리즘으로 해결**할 수 있다.   * **(P1-NL)** 문제의 해는 대안적인 최적화 framework로 찾을 수 있고, **전체적인 과정은 Algorithm 2**에 있다. * Algorithm 2에서 **(P1.2), (P1.3)**이 **과** 를 바꿔 나감으로써 **iterative하게 해결**된다. |

|  |
| --- |
| **8. SIMULATION RESULTS** |
| 여기서는 **제안된 알고리즘들의 성능을 측정**한다. 이때 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.   * Snapshots of **uniformly and randomly** distributed GTs (**K=7**) * **Area** of **120m x 120m** * **Value of T** for integrated UAV and separated UAV: **50 sec and 110 sec** respectively   **<Trajectories of UAVs optimized by Algorithm 1>**   |  |  | | --- | --- | |  |  | | **T = 50 sec** | **T = 110 sec** | | * 원, 삼각형, + 모양의 각 기호는 **10초 간격으로 측정한 UAV의 위치**이다. * **T = 50 sec**에서는 **integrated UAV WPCN의 UAV는 모든 GT를 커버**하려고 하지만, **Separated system에서는 2개의 UAV가 2개의 서로 다른 영역을 커버**하여 ID UAV가 오른쪽 위에 위치한다. * **T = 50 sec**에서의 **separated UAV WPCN**의 minimum throughput performance가 **integrated UAV WPCN**의 그것보다 28% 크다. | |   **<Histogram of time resources allocation optimized by Algorithm 1>**   |  |  | | --- | --- | |  | **T = 50 sec**은 위 그림의 **(a)**에, **T = 110 sec**은 위 그림의 **(b)**에 해당한다.   * **Optimized solution**이 **동시에 몇 개의 GT만 support**한다는 것을 알 수 있다. | |

|  |
| --- |
| **8. SIMULATION RESULTS** |
| **<Minimum throughput with respect to time interval T for various systems>**   |  |  | | --- | --- | | 이 그림은 제안된 알고리즘에 대한 minimum throughput performance를 나타낸다.   * Time slot의 길이는 **1 sec** | | | Static AP | **고정된 HAP**가 **H=8m**의 고도에 있음 | | Circular trajectory | UAV trajectory가 **circular path**로 지정되고, **Uplink power와 time resource**에 대한 **joint 최적화**가 에 대해 수행됨 | | Fixed time resources | Circular scheme에서 얻어진 **Fixed time resource** 에 대해 **uplink power와 UAV trajectory**가 **Algorithm 1**에 의해 계산됨 | | Naïve power control | 제안된 알고리즘에 기반한 **trajectory와 time resource 할당 최적화**에 대해, 각 GT는 harvest된 에너지를 **이전 time slot (for WIT) 에서 모두 사용**   * GT에 저장된 에너지가 **uplink power constraint를 초과**하면 GT는 **information signal을 n번째 time slot에서** 전송 |  |  |  | | --- | --- | |  |  | | **Algorithm 1의 convergence** | **Non-linear와 linear EH model의, input RF power에 따른 harvested power** | |

|  |
| --- |
| **8. SIMULATION RESULTS** |
| |  |  | | --- | --- | |  |  | | **linear와 non-linear EH model system 간의 optimized trajectory의 비교** | **Linear와 non-linear EH 모델 최적화 시의 throughput 차이 (Algorithm 2)** | |