

ISAC 기반 모바일 엣지 컴퓨팅을 위한 UAV 궤도 및 리소스 할당 설계

이다솜, 정재민, 강진규
명지대학교 정보통신공학과

somdaya@mju.ac.kr, jjm91548971@mju.ac.kr, jkkang@mju.ac.kr

Design of UAV Trajectory and Resource Allocation for Integrated Sensing and Communication Assisted Mobile Edge Computing

Dasom Lee, Jaemin Jung, Jinkyu Kang
Myongji University

요약

본 논문은 사용자 단말(User Equipment)이 지상 기지국(BS)으로 데이터 오프로딩을 하는 동시에 오프로딩 신호를 기반으로 타겟에 반사된 에코 신호를 무인항공기(UAV)가 수신하는 통합 센싱 및 통신(Integrated Sensing and Communication) 시스템에서 통신 및 센싱의 전력과 UAV 궤도를 최적화하여 사용자 단말의 오프로딩 처리량을 최대화하는 문제를 제안한다. 제안된 문제는 Successive convex approximation(SCA)와 Block coordinated descent(BCD) 기법을 통해 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 제안된 시스템 모델에서 센싱과 엣지 컴퓨팅의 오프로딩간 트레이드오프 관계를 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서론

6G의 핵심 기술로 여겨지는 통합 센싱 및 통신(Integrated Sensing and Communication, ISAC)은 통신과 레이더 센싱 기술이 개별적으로 운영되던 기존의 방식과 달리, 통신과 센싱을 통합하여 동시에 수행한다. 기존의 통신을 할 때 사용되는 전파의 전송, 반사, 산란 등을 측정하여 센싱을 수행함으로써 통신망 자체를 센서로 활용한다[1]. 하지만 [1]에 따르면 ISAC에서 데이터 통신과 레이더 센싱의 성능은 트레이드오프 관계가 있는 것으로 나타난다. 또한 [2], [3]에 따르면 무인항공기(UAV)를 센싱 수신기로 사용함으로써 타겟과 고정된 레이더 센싱 수신기의 거리를 극복할 수 있고, 타겟 센싱 범위를 확장할 수 있다. 특히 단말의 전송 신호를 통해 센싱을 수행하고자 하는 경우, 상대적으로 작은 전력을 통해 전송하는 신호로도 UAV의 유연한 수신기 배치를 통해 센싱 성능을 상당히 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 데이터 통신과 레이더 센싱 성능의 트레이드 오프 관계를 고려하여 사용자 단말(User Equipment)에서 생성된 ISAC 신호를 통해 UE-지상기지국(BS) 오프로딩과 동시에 타겟에 반사된 에코 신호를 UAV가 수신하는 모델을 도입하여 UE의 오프로딩 처리량을 최대화하는 문제를 제안한다.

II. 시스템 모델 및 문제 공식화

A. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 지상에 고정된 단일 안테나의 UE k 에서 엣지 서버를 탑재한 단일 안테나의 BS로 데이터 오프로딩을 하는 동시에 타겟이 존재할 수 있는 감시(surveillance)영역에서 반사된 신호는 안테나가 N_r 개인 UAV가 수신한다. UAV는 반사된 신호를 기반으로 타겟의 위치를 추정한다. UE k 에서 전송하는 ISAC 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$x_k = x_{off} + x_{sen} \quad (1)$$

신호 x_k 는 UE에서 BS로 전송하는 오프로딩 신호 x_{off} 와 UAV로 전송하는 센싱 신호 x_{sen} 로 이루어져 있다.

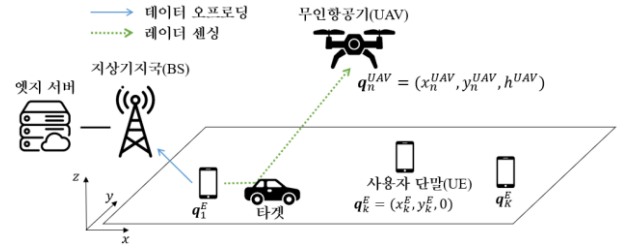


그림 1. 시스템 모델

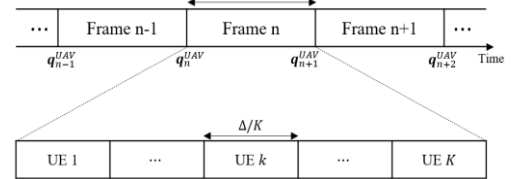


그림 2. 프레임 구조

[2]를 참고하여, 그림 2와 같이 전체 시간 T 는 Δ 초 길이의 N 개 프레임으로 나누어진다. Δ 는 다시 Δ/K 초로 나누어져 직교 다중 접근 방식(OFDM)으로 각 UE k 에 할당된다. UE k 는 n 번째 프레임에서 BS로 데이터 오프로딩을 하고, UAV는 타겟의 반사된 신호를 수신한다.

n 번째 프레임에서 UE k 와 BS의 채널은 Rayleigh 채널로 가정하며 수식 (2)와 같이 표현된다.

$$h_{k,n}^{off} = \frac{g_0 \mathcal{R}}{\|q_k^E - q^{BS}\|^2} \quad (2)$$

g_0 는 1m 표준 거리에서의 채널 이득이고, q_k^E 와 q^{BS} 는 각각 UE k 의 위치와 BS의 위치이다[2]. \mathcal{R} 은 Rayleigh 분포를 따른다[5].

n 번째 프레임에서 UE k 와 UAV의 채널은 수식 (3)과 같이 표현된다.

$$h_{k,n}^{sen} = g_{k,n}^{E,U}(q_n^{UAV}) + c \quad (3)$$

c 는 가우시안 분포를 따르는 여러 개의 확률변수인 클러스터 요소로 중심 극한 정리를 적용할 수 있다[4]. q_n^{UAV} 는 n 번째 프레임에서 UAV의 위치이고 $g_{k,n}^{E,U}(q_n^{UAV})$ 은 UE k 와 UAV의 채널 이득으로 수식 (4)와 같이 표현된다.

$$g_{k,n}^{E,U}(q_n^{UAV}) = \frac{\alpha_k \mathbf{a}(\theta)}{\|q_n^{UAV} - \mathbf{q}^T\|^2} \quad (4)$$

$\alpha_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_\alpha^2)$ 는 UE k 부터 타겟까지의 경로 손실과 Swerling-I 타겟 유형 모델을 따르는 Radar Cross Section (RCS)을 고려한 채널 이득이다[4]. $\mathbf{a}(\theta)$ 는 θ 에 따른 안테나 배열 응답 벡터이고, θ 는 UAV 가 수신한 타겟에 반사된 신호의 각도이다[6]. \mathbf{q}^T 는 고정된 타겟의 위치이다[3].

n 번째 프레임에서 UE k 가 BS 에게 데이터 오프로딩을 할 때 처리량은 수식 (5)와 같이 표현된다[3].

$$R_{k,n}^{off} = B \log_2 \left(1 + \frac{h_{k,n}^{off} p_{k,n}^{off}}{\sigma_{noise}^2 + \gamma h_{k,n}^{off} p_{k,n}^{sen}} \right) \quad (5)$$

B 는 대역폭이고 σ_{noise}^2 는 잡음 세기이다. $p_{k,n}^{off}$ 과 $p_{k,n}^{sen}$ 은 각각 n 번째 프레임에서 UE k 가 BS 로 전송하는 데이터 오프로딩 신호의 전력과 레이더 센싱 신호의 전력이다. $\gamma \in [0,1]$ 은 연속간섭제거(SIC)의 여부이다. $\gamma = 0$ 이면 SIC가 적용된 상태이고, $\gamma = 1$ 이면 적용되지 않은 상태이다.

레이더 센싱의 성능을 측정하기 위한 지표로 레이더추정정보율(Radar Estimation Information Rate)[7]을 사용한다. 본 논문에서 사용하는 레이더추정정보율은 수식 (6)과 같이 표현된다[3].

$$R_{k,n}^{rad} = \frac{\delta}{2\mu} \log_2 \left(1 + \frac{2\sigma_{pre}^2 \hat{\gamma}^2 B^3 \mu h_{k,n}^{sen} p_{k,n}^{sen}}{\sigma_{noise}^2} \right) \quad (6)$$

δ 는 레이더 충격계수(duty factor), μ 는 레이더 펄스 주기, $\hat{\gamma}$ 는 레이더 파형의 모양에 관한 상수이고, σ_{pre}^2 는 예측된 레이더 에코의 분산이다.

이때, UAV 의 비행에너지 소모량은 수식 (7)과 같이 표현된다[2].

$$E_n^{Fly}(v_n^{UAV}) = \kappa \|v_n^{UAV}\|^2 \quad (7)$$

$\kappa = 0.5M\Delta$ 이고, M 은 UAV 의 질량이다. v_n^{UAV} 은 UAV 의 속도이고, 고도는 변하지 않는다고 가정한다.

B. 문제 공식화

본 논문은 n 번째 프레임에서 q_n^{UAV} , $p_{k,n}^{off}$, $p_{k,n}^{sen}$ 을 최적화하여 UE k 가 BS 로 데이터 오프로딩을 할 때의 처리량을 최대화한다. 이를 공식화하면 수식 (8a)와 같다.

$$\max_{\{q_n^{UAV}\}, \{p_{k,n}^{off}\}, \{p_{k,n}^{sen}\}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N-1} R_{k,n}^{off} \quad (8a)$$

$$s. t. \quad p_{k,n}^{off} + p_{k,n}^{sen} \leq p_k^E \quad \forall k \in K, \forall n \in N \quad (8b)$$

$$\sum_{n=1}^N \bar{L}_k^{off} \leq \sum_{n=1}^N \Delta R_{k,n}^{off} \quad \forall k \in K \quad (8c)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N R_{k,n}^{rad} \geq \eta \quad (8d)$$

$$\sum_{n=1}^N E_n^{Fly}(v_n^{UAV}) \leq \varepsilon \quad (8e)$$

$$q_1^{UAV} = q_I^{UAV}, q_{N+1}^{UAV} = q_F^{UAV} \quad (8f)$$

$$\|v_n^{UAV}\| \leq v_{max} \quad \forall n \in N \quad (8g)$$

$$v_n^{UAV} = \frac{q_{n+1}^{UAV} - q_n^{UAV}}{\Delta} \quad \forall n \in N \quad (8h)$$

(8b)는 $p_{k,n}^{sen}$ 와 $p_{k,n}^{off}$ 의 합이 UE k 가 송신하는 신호의 최대 전력 p_k^E 를 넘을 수 없음을 나타낸다. (8c)는 전체 프레임 동안 BS 가 UE k 로부터 실제로 받은 데이터 총량 $\Delta R_{k,n}^{off}$ 이 UE k 가 BS 로 오프로드한 데이터 \bar{L}_k^{off} 의 총량보다 크거나 같아야 함을 나타낸다. 이때 \bar{L}_k^{off} 는 고정되어 있다.

(8d)는 전체 프레임에서 $R_{k,n}^{rad}$ 가 레이더추정정보율의 임계점 η 보다 크거나 같아야 함을 나타낸다. (8e)는 UAV 의 에너지 제한 조건으로 ε 는 UAV 의 에너지 제한 총량을 나타낸다. (8f)~(8g)는 UAV 의 초기 위치와 최종 위치, UAV 의 속도 제한을 나타낸다. 이때 목적함수와 제한 조건 (8c), (8d)는 non-convex 하므로 최적화 문제를 바로 해결할 수 없다. Block coordinated descent(BCD) 기법을 사용하여 복잡한 최적화 문제를 여러 개의 단순한 하위 문제로 분리하고, 하위 문제 중 볼록하지 않은 일부 문제들에 대해 Successive convex approximation(SCA) 기법을 활용하여 볼록 완화를 사용한다. 마지막으로 볼록 최적화 방법을 기반으로 하위 문제를 차례로 반복하여 풀면 수렴 해를 구할 수 있을 것으로 기대된다.

III. 결론

본 논문에서는 사용자 단말(UE)이 BS 로 데이터 오프로딩을 하는 동시에 타겟에 반사된 에코 신호를 UAV 가 수신하는 ISAC 모델을 도입한다. 이때 모든 UE 에서 BS 로의 데이터 오프로딩 처리량을 최대화하면서도 레이더추정정보율을 활용하여 센싱의 성능을 유지하여 통신과 센싱 성능의 트레이드 오프 관계를 고려하는 문제를 제안한다. 이는 통신 및 센싱 전력의 크기, 레이더추정정보율, UAV 의 비행 에너지, UAV 운영 제한 하에 데이터 오프로딩 및 레이더 센싱 전력, UAV 궤도를 최적화하여 해결할 수 있다. 제안한 최적화 문제는 non-convex 문제이므로 문제를 convex 화 시킨 후 BCD 와 SCA 기법으로 해결할 수 있을 것으로 기대되며 제안된 시스템 모델에서 센싱과 엣지 컴퓨팅의 오프로딩 간 트레이드오프 관계를 파악할 수 있을 것으로 기대된다. 시뮬레이션 결과를 통해, UAV 의 유연한 배치가 ISAC 기반 모바일 엣지 컴퓨팅에서 상당한 성능 향상을 가져올 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2021R1F1A1050734).

참고 문헌

- [1] Bayesteh, Alireza, et al. "Integrated sensing and communication (ISAC)—From concept to practice." *Communications of Huawei Research* (2022): 4-25.
- [2] Jeong, Seongah, Osvaldo Simeone, and Joonhyuk Kang. "Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: Optimization of bit allocation and path planning." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67.3 (2017): 2049-2063.
- [3] Huang, Ning, et al. "Unmanned Aerial Vehicle aided Integrated Sensing and Computation with Mobile Edge Computing." *IEEE Internet of Things Journal* (2023).
- [4] Jeong, Seongah, et al. "Multistatic cloud radar systems: Joint sensing and communication design." *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* 27.5 (2016): 716-730.
- [5] Lee, William CY. "Estimate of channel capacity in Rayleigh fading environment." *IEEE transactions on Vehicular Technology* 39.3 (1990): 187-189.
- [6] Behdad, Zinat, et al. "Power allocation for joint communication and sensing in cell-free massive MIMO." *GLOBECOM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, 2022.
- [7] Chiriyath, Alex R., et al. "Inner bounds on performance of radar and communications co-existence." *IEEE Transactions on Signal Processing* 64.2 (2015): 464-474.