

물리 계층 보안이 고려된 지능형 반사 표면 탑재 무인 항공기 기반 엣지 컴퓨팅 시스템

김도영, 정성아
경북대학교

singha5036@knu.ac.kr, seongah@knu.ac.kr

Aerial Intelligent Reflecting Surface-assisted Edge Computing Systems under Physical-layer Security

Doyoung Kim, Seongah Jeong
Kyungpook National University

요 약

본 논문에서는 지능형 반사 표면 탑재 무인 항공기 (Aerial Intelligent Reflecting Surface, AIRS)를 활용하여 내부 도청자가 존재하는 엣지 컴퓨팅 시스템 환경에서의 물리 계층 보안을 고려한 오프로딩 기술을 제안한다. 제안 기법은 지상 기기들의 총 전력소비를 최소화 하는 Access Point (AP)와 기기의 송신 전력 할당, 오프로딩 비율 및 지능형 반사 표면의 위상과 무인 항공기의 비행 궤적을 최적화하고, Successive Convex Approximation (SCA) 기법을 기반으로 개발되었다.

I. 서 론

미래 6G의 주요 예상 서비스는 eXtended reality (XR), 블록체인, Wireless brain-computer interaction (BCI), connected robotics and autonomous systems (CRAS) 등과 같이 높은 복잡도의 어플리케이션으로 구성된다. 이에 따라, 다수의 무선 통신 기기들의 원활한 서비스를 위해, 기기 근처에서 기기 어플리케이션 수행에 도움을 줄 수 있는 서버를 고려하는 엣지 컴퓨팅 기술이 등장하였다. 특히, 6G 타겟 어플리케이션은 생체 정보 및 개인 정보 등과 같이 높은 보안이 요구되는 정보를 다루는 경우가 대다수임에 따라, 기존 엣지 컴퓨팅 기술의 보안 문제가 대두되었다. 이를 해결하기 위해, 최근 지능형 반사 표면 (Intelligent Reflecting Surface, IRS)의 빔 방향과 무선 채널 환경 개선을 이용하여, 엣지 컴퓨팅 환경에서 보안을 고려한 오프로딩 기법에 관련된 연구가 진행되고 있다 [1]. 지능형 반사 표면은 기지국이나 중계기에 비해 저렴한 설치 비용으로 원하는 무선 채널을 구성할 수 있다는 점에서 최근 무선 통신 분야에서 많은 관심을 받고 있다 [2].

본 논문은 단일 Access Point (AP)와 다수 개의 지상 기기를 고려하는 상황에서, 물리 계층 보안을 고려한 엣지 컴퓨팅 기술을 제안한다. 오프로딩을 수행하는 기기를 제외한 다른 주변 기기를 잠재적인 도청자로 가정하고, 3 차원 이동성이 자유로운 무인 항공기 기반 지능형 반사 표면 (Aerial Intelligent Reflecting Surface, AIRS)을 고려한다. 제안 알고리즘은 총 기기 전력 소모량을 최소화하는 것을 목적으로, AP와 기기의 송신 전력 할당, 오프로딩 비율 및 무인 항공기에 탑재된 지능형 반사 표면의 위상과 비행 궤적을 최적화하고, Successive Convex Approximation (SCA) 기법을 기반으로 개발되었다.

II. 시스템 모델 및 제안 알고리즘

본 논문에서는 무인 항공기 기반 지능형 반사 표면 (이하 'AIRS')을 활용하여 AP와 기기 간의 통신에서 물리 계층 보안이 고려된 엣지 컴퓨팅 시스템을 개발하고자 한다. 해당 환경에서 지상에 놓여 있는 개별 기기들에 대해 $k \in \mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ 로 인덱스를 정의하였을 때, 각각의 기기들에 대해 다음과 같은 오프로딩 절차가 요구된다. 첫번째, 기기로부터 AIRS를 거쳐 AP로 이루어지는 상향링크 (Uplink) 오프로딩이 이루어진다. 두번째로 AP에 수신된 오프로딩 데이터가 AP의 엣지 클라우드 (Edge Cloud)에서 처리된다. 마지막으로, 처리된 데이터에 대한 하향링크 (Downlink) 전송이 AP에서 AIRS를 거쳐 기기까지 이루어진다. 위 논문에서는 상향링크 전송과 하향링크 전송 각각에 대하여 주파수 분할 다중화 (Frequency-division Duplexing, FDD) 방식을 취하여 각각의 주파수 대역을 B_{kA} 와 B_{Ak} 로 가정하였다.

임무 시간 T_m 를 $n \in \mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ 의 인덱스와 함께 N 개의 t_s 길이의 슬롯으로 이산화 하였다. 지상 기기들과 AP 및 AIRS의 위치를 표현하기 위해, 3 차원 데카르트 좌표계를 적용하여, $\mathbf{p}_k = (x_k, y_k, 0)$, $\mathbf{p}_A = (x_A, y_A, 0)$, $\mathbf{p}_U^n = (x_U^n, y_U^n, H_U)$ 로 각각 정의하였다. 이 때, AIRS는 고정된 높이 H_U 로 비행하는 수평비행을 가정하였다. 여기서 AIRS의 운용 능력을 고려하여, 이륙 위치 \mathbf{p}_U^l , 착륙 위치 \mathbf{p}_U^f 및 각 슬롯에서의 최대 비행거리 \mathbf{d}_{max}^U 를 가정한다. 또한, m_u [Kg] 질량을 가진 AIRS가 비행에 사용할 수 있는 최대 비행에너지를 E_{Fly}^{max} 로 고려한다. 이는 아래의 제한 조건을 형성하게 된다.

$$\|\mathbf{p}_U^{n+1} - \mathbf{p}_U^n\| \leq \mathbf{d}_{max}^U, \quad (1a)$$

$$\mathbf{p}_U^l = \mathbf{p}_U^l, \quad (1b)$$

$$\mathbf{p}_U^{N+1} = \mathbf{p}_U^f, \quad (1c)$$

$$\mathbf{v}_U^n = \|\mathbf{p}_U^{n+1} - \mathbf{p}_U^n\|/t_s, \quad (1d)$$

$$0.5m_u t_s \|\mathbf{v}_U^n\|^2 \leq E_{Fly}^{max}. \quad (1e)$$

M 개의 보조 반사 표면으로 이루어진 지능형 반사 표면을 탑재한 AIRS 를 가정하고, 지능형 반사 표면의 위상 행렬을 $\Psi^n \triangleq \text{diag}\{e^{j\phi_1^n}, e^{j\phi_2^n}, \dots, e^{j\phi_M^n}\} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 로 정의한다. 이를 기반으로, 지상 기기에서 AIRS 간 채널 이득과 AIRS 에서 지상 기기 간 채널 이득은 다음과 같이 각각 정의된다.

$$\mathbf{h}_{iU}(\mathbf{p}_U^n) = \sqrt{g_0(d_{iU}^n)^{-2}} [1 \ e^{-jk_w\theta_{iU}^n} \dots e^{-jk_w(M-1)\theta_{iU}^n}]^T, \quad (2a)$$

$$\mathbf{h}_{Ui}(\mathbf{p}_U^n) = \sqrt{g_0(d_{iU}^n)^{-2}} [1 \ e^{-jk_w\theta_{Ui}^n} \dots e^{-jk_w(M-1)\theta_{Ui}^n}]^T. \quad (2b)$$

여기서, $i \in \{\mathcal{K} \cup \mathcal{A}\}$ 를 만족하고, g_0 는 1m 사이에서 정의되는 채널 이득을 나타내며, $k_w = 2\pi d/\lambda$ 는 안테나 간 거리 d 와 파장 λ 로 정의된다. d_{iU}^n 는 n 번째 슬롯에서 AIRS 에서 i 번째 지상 기기 간 거리를 표현하고, $\theta_{iU}^n = (x_U^n - x_i)/d_{iU}^n$, $\theta_{Ui}^n = (x_i - x_U^n)/d_{iU}^n$ 는 n 번째 슬롯에서 i 번째 지상기기에서 AIRS, 혹은 AIRS 에서 i 번째 지상 기기 간 도래각을 표현한다. 위의 정의를 토대로, 상향링크 통신에서의 지상 기기와 AP 간 유효 채널과 하향링크 통신에서 AP 와 지상 기기 간 유효 채널은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$g_{kA}(\mathbf{p}_U^n, \Psi^n) \triangleq \mathbf{h}_{UA}^H(\mathbf{p}_U^n) \Psi^n \mathbf{h}_{kU}(\mathbf{p}_U^n), \quad (3a)$$

$$g_{Ak}(\mathbf{p}_U^n, \Psi^n) \triangleq \mathbf{h}_{Uk}^H(\mathbf{p}_U^n) \Psi^n \mathbf{h}_{AU}(\mathbf{p}_U^n) = g_{kA}^*(\mathbf{p}_U^n, \Psi^n). \quad (3b)$$

또한, 기기의 송신 전력을 ρ_k^n , AP 의 송신 전력을 ρ_A^n 로 정의하고, 기기와 AP 의 평균 송신 전력과 최대 송신 전력 제한 요건을 아래와 같이 고려한다.

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \rho_k^n \leq P_{\text{avg}}^T, \quad (4a)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \rho_A^n \leq P_{\text{avg}}^{T,A}, \quad (4b)$$

$$0 \leq \rho_k^n \leq P_{\text{max}}^T, \quad (4c)$$

$$0 \leq \rho_A^n \leq P_{\text{max}}^{T,A}. \quad (4d)$$

이 때, 해당 기기를 제외한 다른 기기를 잠재적 내부 도청자로 가정하였을 때, 상향링크와 하향링크에서의 보안량 (Secrecy Rate) [bps/Hz]은 아래와 같이 정의된다.

$$R_{\text{Up}}(\rho_k^n, \mathbf{p}_U^n, \Psi^n) = \left[\log_2 \left(1 + \frac{\rho_k^n \|g_{kA}(\mathbf{p}_U^n, \Psi^n)\|^2}{\sigma^2} \right) \right] - \max_{j \in \mathcal{K}, j \neq k} \log_2 \left(1 + \frac{\rho_k^n \|g_{kj}(\mathbf{p}_U^n, \Psi^n)\|^2}{\sigma^2} \right), \quad (5a)$$

$$R_{\text{Down}}(\rho_k^n, \mathbf{p}_U^n, \Psi^n) = \left[\log_2 \left(1 + \frac{\rho_A^n \|g_{Ak}(\mathbf{p}_U^n, \Psi^n)\|^2}{\sigma^2} \right) \right] - \max_{j \in \mathcal{K}, j \neq k} \log_2 \left(1 + \frac{\rho_A^n \|g_{Aj}(\mathbf{p}_U^n, \Psi^n)\|^2}{\sigma^2} \right). \quad (5b)$$

수식 (5)에서 기기 간 채널 이득은 (3)과 비슷한 방식으로 $g_{kj}(\mathbf{p}_U^n, \Psi^n) \triangleq \mathbf{h}_{Uj}^H(\mathbf{p}_U^n) \Psi^n \mathbf{h}_{kU}(\mathbf{p}_U^n)$ 로 정의되고, $[x]^+ \triangleq \max(x, 0)$ 이다. 또한, 지상 기기의 송신 전력 소비와 지상 기기에서의 데이터 처리를 위한 전력 소비는 아래와 같이 모델링하였다.

$$E_{\text{comm}}^k(\rho_k^n) = \rho_k^n t_s / K \quad (6a)$$

$$E_{\text{comp}}^k(Q_k L_k) \triangleq \gamma_k C_k^3 (Q_k L_k)^3 / T_m^2 \quad (6b)$$

이때, 오프로딩 비율을 나타내는 변수 Q_k 를 정의하여, 지상 기기에서 T_m 시간내에 수행해야할 데이터양을 $Q_k L_k$ 로 표현하였고, 한 비트의 데이터를 처리하는데 요구되는 CPU cycles 을 C_k 로 정의하였다. 또한 O_k 는 데이터 처리 후, 입력 비트 대비 출력 비트의 비율을 나타낸다.

본 논문은 물리 계층 보안을 고려한 엣지 컴퓨팅 환경에서, 지상 기기들의 전력 소비량 최소화를 목표로 한다. 이를 위해, 위에서 언급한 기기 별 제한 조건들과 함께 다음과 같이 최적화 문제를 구성할 수 있다.

$$\min_{\rho_k, \rho_A, \mathbf{p}_U, \mathbf{v}_U, \Psi, \mathbf{Q}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N E_{\text{comm}}^k(\rho_k^n) + \sum_{k=1}^K E_{\text{comp}}^k(Q_k L_k), \quad (7a)$$

$$s. t. \sum_{n=1}^N B_{kA} R_{\text{Up}}(\rho_k^n, \mathbf{p}_U^n, \Psi^n) \geq L_k (1 - Q_k), \forall k \in \mathcal{K}, \quad (7b)$$

$$\sum_{n=1}^N B_{Ak} R_{\text{Down}}(\rho_k^n, \mathbf{p}_U^n, \Psi^n) \geq O_k L_k (1 - Q_k), \forall k \in \mathcal{K}, \quad (7c)$$

$$\rho_k^n, \rho_A^n \geq 0, \forall k \in \mathcal{K}, \forall n \in \mathcal{N}, \quad (7d)$$

$$0 \leq Q_k \leq 1, \forall k \in \mathcal{K}, \forall n \in \mathcal{N}, \quad (7e)$$

$$(1) \text{ and } (4) \quad (7f)$$

구성된 최적화 문제 (7)은 최적화 변수 간 coupling 이 존재하고, 수식 (7b)와 (7c)의 상향링크 및 하향링크 보안량이 Difference of Convex function (DC)의 형태를 띄고 있어 nonconvex 문제이다. 이를 해결하기 위해, 제안 방법은 Successive Convex Approximation (SCA) 기법 [3]을 기반으로, 변수 $\rho_k, \rho_A, \mathbf{Q}$ 에 대해 최적화시킨 후, 그 값에 따른 최적의 $\mathbf{p}_U, \mathbf{v}_U, \Psi$ 를 찾는 과정을 반복하는 Alternating Algorithm 방식으로 개발되었다.

III. 결론

본 연구는 물리 계층 보안을 고려한 지능형 반사 표면 탑재 무인 항공기 기반 엣지 컴퓨팅 환경에서의 최적의 AP 및 지상 기기들의 송신 전력 할당, AIRS 의 위상과 비행 궤적 및 오프로딩 비율 설계를 제안하였다. 제안된 알고리즘은 SCA 기법을 기반으로 Alternating algorithm 형태로 개발되었다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1G1A100626011).

참고 문헌

- [1] Mao, S., Liu, L., Zhang, N., Dong, M., Zhao, J., Wu, J., & Leung, V. C. (2022). Reconfigurable intelligent surface-assisted secure mobile edge computing networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- [2] Wu, Q., Zhang, S., Zheng, B., You, C., & Zhang, R. (2021). Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial. IEEE Transactions on Communications, 69(5), 3313-3351.
- [3] G. Scutari, F. Facchinei and L. Lampariello, "Parallel and Distributed Methods for Constrained Nonconvex Optimization—Part I: Theory," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 65, no. 8, pp. 1929-1944, 15 April 2017.