

무인 항공기 기반 통신에서의 센싱과 통신의 결합 서비스에 대한 연구

신승현, 황상원, 이인규
고려대학교 전기전자공학과, 삼성전자

qlxkalf@korea.ac.kr, s.won.hwang@samsung.com, inkyu@korea.ac.kr

A Study on the Integrated Sensing and Communication in UAV-Enabled systems

Seunghyeon Shin, Sangwon Hwang, Inkyu Lee
School of Electrical Eng., Korea Univ., Korea

요 약

본 논문에서는 Unmanned Aerial Vehicle(UAV) 통신 시스템에서 UAV의 궤적을 최적화하여 타겟 감지를 보장한 상황에서 각 유저 단말의 처리량을 최대화하는 문제에 대해 다룬다. 해당 문제의 경우 non-convex 문제이기 때문에, 수학적 분석법인 block coordinate descent(BCD)와 successive convex approximation(SCA) 최적화 방법을 적용하여 해결하였다. 실험 결과, UAV의 궤적을 최적화한 경우 하지 않은 경우보다 성능이 더 잘 나오며, 타겟 감지 조건이 강할 경우 UAV가 타겟에 근접한 것을 볼 수 있다.

I. 서론

통신과 센싱을 동시에 수행하는 Integrated Sensing and Communication(ISAC)은 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 앞으로 미래에는 자율주행 자동차처럼 높은 해상도의 센싱을 필요로 하는 제품들이 늘어날 것이다. [1]

이 때문에 현재 ISAC에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있는 상황이다. ISAC의 성능을 더 끌어올리기 위해 ISAC과 다른 기술들을 결합하고 있는데, 그중 하나가 무인 항공기 Unmanned Aerial Vehicle(UAV)와 ISAC을 결합한 기술이다. UAV를 통신 시스템에서 사용하게 될 경우, UAV는 자유롭게 이동할 수 있기 때문에 직선 시야 경로 채널을 확보할 수 있어 ISAC의 성능을 더 올릴 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 UAV와 ISAC을 결합한 통신 시스템에서 UAV의 궤적을 최적화하여 유저 단말의 capacity를 최대화하는 문제를 해결하였다.

II. 본론

본 논문에서는 UAV가 UAV와 각 유저 단말, 타겟 사이의 채널 정보를 알고 있다고 가정한다. UAV가 이동할 수 있는 총 시간을 T 로 정의하고 이를 N 개의 time slot으로 나누었다. UAV에 uniform plane array(UPA) 안테나를 적용하고 안테나 개수는 $M = M_x \times M_y$ 로 정의한다. 이때 M_x, M_y 는 x 와 y 축 상의 안테나 개수이다. 안테나들 사이의 간격은 모두 송신 신호 파장의 절반인 $\frac{\lambda}{2}$ 로 설정한다. 각 유저 단말 k 와 타겟 j 그리고 time slot n 에서의 UAV의 위치는 $\mathbf{u}_k = [u_{k,x}, u_{k,y}]^T$, $\mathbf{v}_j = [v_{j,x}, v_{j,y}]^T$, $\mathbf{q}[n] = [q_x[n], q_y[n]]^T$ 로 정의한다. 또한 UAV는 항상 같은 높이인 H 에서 이동을 한다. 채널 모델의 경우 free-space path loss 모델을 사용하였으며, 이때 UAV가 유저 단말 k 에게만 통신을 하였을 경우 capacity는 다음과 같이 나타낼

수 있다.

$$R_k^c[n] = \log_2 \left(1 + \gamma_0 \frac{MP_{\max}}{d(\mathbf{q}[n], \mathbf{u}_k)^2} \right)$$

γ_0 는 1m를 기준으로 채널 전력인 β_0 에 잡음 전력인 σ^2 를 나눈 값이다. $d(\mathbf{q}[n], \mathbf{u}_k)^2$ 는 n 번째 time slot에서의 UAV 위치와 유저 단말 k 사이의 거리의 제곱을 나타낸다. P_{\max} 는 UAV가 송신할 수 있는 최대 전력을 의미한다.

UAV가 타겟 j 에게 센싱을 하면서 유저 단말 k 에게 통신을 하였을 경우 capacity는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{k,j}^{ISAC}[n] = \log_2 \left(1 + \gamma_0 \frac{MP_{\max} - d(\mathbf{q}[n], \mathbf{v}_j)^2 \Gamma}{d(\mathbf{q}[n], \mathbf{u}_k)^2} \right)$$

$d(\mathbf{q}[n], \mathbf{v}_j)^2$ 는 n 번째 time slot에서의 UAV 위치와 타겟 j 사이의 거리의 제곱을 나타낸다. Γ 는 타겟을 센싱하기 위한 빔 패턴 이득 최소 임계 값이다.

각 time slot n 마다 UAV가 유저 단말 k 에게만 통신을 할 것인지 동시에 타겟 j 도 센싱할 것인지를 나타내기 위하여 이진 변수 $\{\alpha_k[n]\}$ 과 $\{c_j[n]\}$ 을 정의한다. 두 이진 변수 $\{\alpha_k[n]\}$, $\{c_j[n]\}$ 모두 0 또는 1의 값을 갖고, $\alpha_k[n] = 1$ 인 경우 time slot n 에서 유저 단말 k 에게 통신을 하는 것을 의미하고 $c_j[n] = 1$ 인 경우 time slot n 에서 타겟 j 에게 센싱을 하는 것을 의미한다. 이제 time slot n 에서 유저 단말 k 의 일반화된 capacity를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_k[n] = \alpha_k[n] R_k^c[n] + \sum_{j=1}^J \alpha_k[n] c_j[n] (R_{k,j}^{ISAC}[n] - R_k^c[n])$$

일반화된 capacity를 최대화하기 위해 UAV의 궤적을 최적화하게 되는데, 여기서 UAV의 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{q}[1] &= \mathbf{q}_I \\ \mathbf{q}[N] &= \mathbf{q}_F \\ \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}[n-1]\| &\leq \mathbf{V}_{\max} \end{aligned}$$

이 조건들은 UAV의 시작 위치와 끝 위치를 지정하는 것이고, UAV의 이동속도를 제한하는 것이다. 따라서 문제를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{P1: maximize}_{\{\mathbf{q}[n]\}_{n=1}^N} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K R_k[n]$$

$$\text{subject to } \mathbf{q}[1] = \mathbf{q}_1,$$

$$\mathbf{q}[N] = \mathbf{q}_F,$$

$$\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}[n-1]\| = V_{\max}.$$

하지만 해당 문제 P1은 UAV의 궤적 $\mathbf{q}[n]$ 에 대해서 non-convex 문제이기 때문에 해결하기가 어렵다. 이를 해결하기 위해서 새로운 변수 $z_{c,k}[n], z_{r,j}[n]$ 을 도입한다. $z_{c,k}[n]$ 의 경우 n 번째 time slot에서의 UAV 위치와 유저 단말 k 사이의 거리의 제곱을 나타내고, $z_{r,j}[n]$ 의 경우 n 번째 time slot에서의 UAV 위치와 유저 단말 j 사이의 거리의 제곱을 나타낸다. 이 경우 capacity는 다음과 같이 재 표현될 수 있다.

$$\tilde{R}_k^c[n] = \log_2 \left(1 + \gamma_0 \frac{MP_{\max}}{z_{c,k}[n]} \right)$$

$$\tilde{R}_{k,j}^{ISAC}[n] = \log_2 \left(1 + \gamma_0 \frac{MP_{\max} - z_{r,j}[n]\Gamma}{z_{c,k}[n]} \right)$$

$$\tilde{R}_k[n] = \alpha_k[n] \tilde{R}_k^c[n] + \sum_{j=1}^J \alpha_k[n] c_j[n] (\tilde{R}_{k,j}^{ISAC}[n] - \tilde{R}_k^c[n])$$

$$\text{P2: maximize}_{\{\mathbf{q}[n], z_{c,k}[n], z_{r,j}[n]\}_{n=1}^N} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \tilde{R}_k[n]$$

$$\text{subject to } \mathbf{q}[1] = \mathbf{q}_1,$$

$$\mathbf{q}[N] = \mathbf{q}_F,$$

$$\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}[n-1]\| = V_{\max},$$

$$z_{c,k}[n] \geq \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{u}_k\|^2,$$

$$z_{r,j}[n] \geq \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{v}_j\|^2.$$

$\tilde{R}_k^c[n]$ 의 경우 $z_{c,k}[n]$ 에 대해서 convex하고, $\tilde{R}_{k,j}^{ISAC}[n]$ 의 경우 $\{z_{c,k}[n], z_{r,j}[n]\}$ 에 대해 non-convex하기 때문에 block coordinate descent(BCD) 알고리즘을 사용한다.

$$\text{P2-1: maximize}_{\{\mathbf{q}[n], z_{c,k}[n]\}_{n=1}^N} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \hat{R}_k[n]$$

$$\text{subject to } \mathbf{q}[1] = \mathbf{q}_1,$$

$$\mathbf{q}[N] = \mathbf{q}_F,$$

$$\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}[n-1]\| = V_{\max},$$

$$z_{c,k}[n] \geq \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{u}_k\|^2.$$

$z_{r,j}[n]$ 을 고정시킨 상태에서 $z_{c,k}[n]$ 에 대해 $\hat{R}_{k,j}^{ISAC}[n]$ 가 convex하므로 $\hat{R}_k[n]$ 는 convex-plus-concave 꼴이 나오게 된다. 이를 해결하기 위해 첫번째 $\hat{R}_k^c[n]$ 와 $\hat{R}_{k,j}^{ISAC}[n]$ 을 $z_{c,k}[n]$ 에 대하여 1차 테일러 함수로 변형하여 선형 함수로 근사화한다. 이를 $\hat{R}_k^c[n], \hat{R}_{k,j}^{ISAC}[n], \hat{R}_k[n]$ 라 하고 successive convex approximation(SCA) 최적화 방식을 이용하여 최적 해를 구한다.

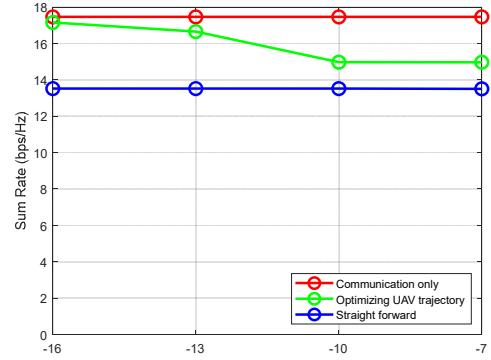
$$\text{P2-2: maximize}_{\{z_{r,j}[n]\}_{n=1}^N} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \tilde{R}_k[n]$$

$$\text{subject to } z_{r,j}[n] \geq \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{v}_j\|^2.$$

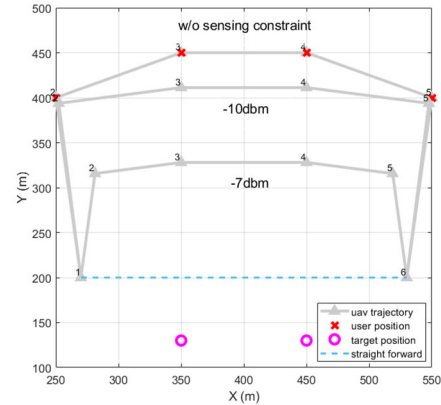
$z_{c,k}[n]$ 을 고정시킨 상태에서 $z_{r,j}[n]$ 에 대해 $\tilde{R}_k[n]$ 이 concave하므로 해당 문제는 Lagrange 함수로 변형한 후, Karush-Kuhn-Tucker(KKT) 조건을 이용하여 최적 해를 구할 수 있다.

III. 모의실험 및 결론

본 논문에서는 안테나 개수 $M = 16 (M_x = M_y = 4)$, 4개의 유저 단말, 2개의 타겟, UAV 높이 $H = 40m$, $P_{\max} = 0.5w$, $V_{\max} = 100m/s$ 로 설정하였다. [3]



UAV의 궤적을 최적화하지 않고 시작점과 끝점을 일직선으로 이은 straight forward가 하한점을 갖으며, 상한점으로는 타겟 센싱을 하지 않은 경우이다. 그 결과, UAV의 궤적을 최적화하여 성능을 더욱 끌어올릴 수 있었다.



타겟 센싱의 최소 임계 값에 따른 UAV의 궤적이 다음과 같다. 센싱 임계 값이 커질수록 UAV가 타겟에 더 가까이 가고 타겟 센싱을 하지 않은 경우 UAV가 유저 단말에 붙은 것을 볼 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음. (No. 2022R1A5A1027646.)

참고 문헌

- [1] A. Zhang et al., "Enabling Joint Communication and Radar Sensing in Mobile Networks—A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 1, pp. 306–345, Firstquarter 2022.
- [2] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, and M. Debbah, "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 21, no. 3, pp. 2334–2360, 3rd Quart., 2019.
- [3] K. Meng, Q. Wu, S. Ma, W. Chen, K. Wang and J. Li, "Throughput Maximization for UAV-Enabled Integrated Periodic Sensing and Communication," in IEEE TWC, vol. 22, no. 1, pp. 671–687, Jan. 2023