

두 기지국에 대한 UAV 통신에서 경로 최적화를 이용한 에너지 효율 최대화

이병헌, 이주형, 고영채

고려대학교

tbio@korea.ac.kr, leejuhyung@korea.ac.kr, koyc@korea.ac.kr

Trajectory Optimization for Energy Efficiency of UAV Communication for Two Ground Base Stations

Byeong-Heon Lee, Ju-Hyung Lee, Young-Chai Ko

Korea Univ.

요약

본 논문은 두 기지국에 대한 UAV(무인기) 통신에서 경로 최적화를 이용한 에너지 효율 최대화를 다룬다. UAV 기반 통신 시스템에서 에너지 소모량과 데이터 전송률을 계산해서 에너지 효율에 대한 식을 도출한다. 에너지 효율 식의 non-convex를 local point를 이용해서 해결하고 local point를 계속 업데이트하면서 최적화를 진행한다. 각각 기지국 간의 거리마다 최적화된 경로로 얻은 최대 에너지 효율 값을 구하고, 하나의 기지국에 대해 구한 경로를 대입하여 얻은 결과와 비교한다. 결과적으로 우리는 오차 범위를 1%로 한 경우, 200m까지 두 개의 기지국을 한 개로 치환하여 진행하는 경로 최적화의 타당성을 확인할 수 있다.

I. 서론

UAV에 대한 여러 가지 연구가 진행되면서 UAV를 이용할 경우, 기존 무선통신에서 UAV를 이용하여 보완이 가능한 사실이 밝혀졌다 [1]. UAV를 이용한 여러 가지 통신 방식이 주목받고 있는 가운데, UAV는 에너지를 계속 공급할 수 없다는 한계를 가진다. 그렇기에 한정된 에너지 자원을 가지고 효과적으로 UAV를 작동시키는 것이 굉장히 중요하다. 기지국 한 개의 경우에 대한 UAV의 에너지 효율을 최적화하는 경로를 찾는 연구는 진행되었으나, 두 기지국에 대한 경로는 연구되지 않았다 [2]. 본 논문에서는 먼저 두 기지국에 대해서 UAV의 에너지 효율을 최대화하는 경로를 찾아내고, 효율적인 최적화를 위해 두 기지국의 중점에 한 개의 기지국이 존재한다고 가정하고 구한 경로로 얻은 에너지 효율 값과 기존 값을 비교한다.

II. 본론

본 논문에서는 먼저 UAV의 시스템 모델에서 구한 에너지 소모량과 RF 통신에서 얻은 채널 용량을 통해 한 개의 기지국에 대한 에너지 효율을 경로 최적화를 이용하여 최대화하는 방법을 기술한다. 기술된 방법을 토대로 두 개의 기지국에 대해 적용시켜 경로 최적화를 진행한다.

II.-1) UAV 시스템 모델

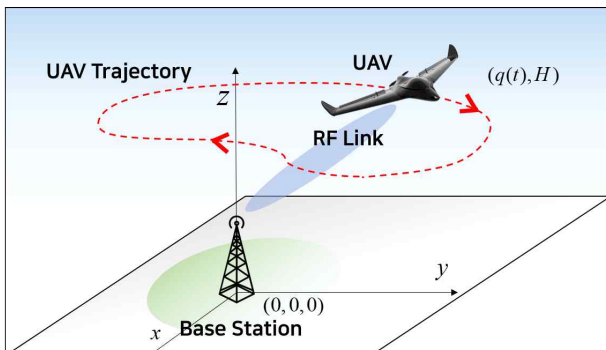


그림 1. 한 개의 기지국에 대한 UAV 통신

그림 1에서 보이듯이 기지국을 원점에 두고, 고정된 높이 H 에서 UAV의 x, y 값이 시간에 따라 변하는 위치가 $q(t)$ 일 때 UAV의 에너지 효율을 최대화하는 경로를 찾는다.

UAV의 위치, 속도, 가속도 값은 연속적인 시간의 함수로 표현할 경우, 계산하기에 매우 어렵기에 위치($q[n]$), 속도($v[n]$), 가속도($a[n]$)의 관계와 그들의 제한 조건을 Taylor 근사화를 통해 다음과 같이 이산적으로 표현한다[2]. δ_t 는 시간 단계 (time step)으로 총 시간을 이산적으로 나눈다.

$$v[n+1] = v[n] + a[n]\delta_t, n = 0, \dots, N \quad (1)$$

$$q[n+1] = q[n] + v[n]\delta_t + \frac{1}{2} \times a[n]\delta_t^2, n = 0, \dots, N \quad (2)$$

$$q[0] = q_I, q[N+1] = q_F, v[0] = v_I, v[N+1] = v_F \quad (3)$$

$$\|v[n]\| \leq V_{\max}, \|v[n]\| \geq V_{\min}, n = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$\|a[n]\| \leq A_{\max}, n = 0, \dots, N \quad (5)$$

위와 같은 제한 조건 속에서 이산적인 $v[n]$, $a[n]$ 을 통해 얻은 UAV가 움직이면서 사용되는 에너지 모델 E 는 다음과 같다 [2]. ($g = 9.8m/s^2$)

$$E = \sum_{n=1}^N c_1 \|v[n]\|^2 + \frac{c_2}{\|v[n]\|} \left(1 + \frac{\|a[n]\|^2}{g^2} \right) \quad (6)$$

II.-2) RF 통신

UAV 시스템 모델과 마찬가지로 연속적인 UAV의 위치를 이산적으로 변환하여 채널 용량을 구한다. RF 통신에서 LoS 채널로 연결되어 있다고 가정하면, 주어진 대역폭(B), 기준거리 1m에서의 SNR(γ_0)로 구한 채널 용량 R 은 다음과 같다.

$$R(q[n]) = B \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{H^2 + \|q[n]\|^2} \right) \quad (7)$$

II.-3) UAV의 에너지 효율 최대화

앞선 식들을 이용하여 에너지 효율 EE 는 채널 용량, 즉 데이터 전송률을 사용한 에너지로 나누어 나타냈다. 위치($q[n]$), 속도($v[n]$), 가속도($a[n]$)를 통해 UAV의 에너지 효율을 최대화한다.

$$\max_{q[n], v[n], a[n]} EE = \frac{R(q[n])}{E(v[n], a[n])} \quad (8)$$

구한 식(8)과 제한 조건(5)의 non-convex를 local point를 이용하여 해결한다. 먼저 분자, $R(q[n])$ 은 local point인 $q_i[n]$ 를 이용하여 low bound에 해당하는 R_{lb} 로 대체한다.

$$R_{lb} = B \sum_{n=1}^N [\alpha_j[n] - \beta_j[n] (\|q[n]\|^2 - \|q_j[n]\|^2)] \quad (9)$$

$$\alpha_j[n] = \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{H^2 + \|q_j[n]\|^2} \right) \quad (10)$$

$$\beta_j[n] = \frac{(\log_2 e) \gamma_0}{(H^2 + \gamma_0 + \|q_j[n]\|^2)(H^2 + \|q_j[n]\|^2)} \quad (11)$$

R_{lb} 는 local point와 $q[n]$ 이 동일할 때 기존의 R 과 같다 [2]. 분모의 경우, local point, $v_j[n]$ 을 통해 만든 새로운 변수 τ_n 으로 수식(6)과 제한 조건(5)의 non-convex를 해결한다.

$$E^* = \sum_{n=1}^N c_1 \|v[n]\|^3 + \frac{c_2}{\tau_n} \left(1 + \frac{\|a[n]\|^2}{g^2} \right) \quad (12)$$

$$\tau_n \geq V_{\min}, \forall n \quad (13)$$

$$\|v_j[n]\|^2 + 2v_j^T[n](v[n] - v_j[n]) \geq \tau_n^2, \forall n \quad (14)$$

대체된 분모와 분자를 이용하여 새로운 EE 을 구할 수 있고 non-convex를 해결했기 때문에 최적화가 가능하다. $\{q[n], v[n]\}$ 을 통해 최적화를 진행하고 얻은 경로 $\{q^*[n], v^*[n]\}$ 이 다시 $\{q[n], v[n]\}$ 가 되는 연속적인 과정을 수렴할 때까지 진행한다. 이로써 한 개의 기지국에 대한 에너지 효율을 경로 최적화를 이용하여 최대화하는 방법을 다루었다. 우리는 더 나아가 한 개의 기지국에 대한 경로 최적화를 이용하여 두 개의 기지국에 대한 경로 최적화를 진행하고자 다음과 같은 그림2의 상황을 가정한다.

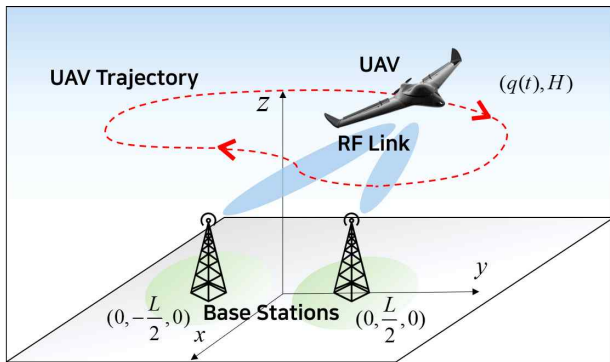


그림 2. 두 개의 기지국에 대한 UAV 통신

둘의 중점이 원점이고 y축을 기준으로 거리가 L 인 상황에서 분자의 데이터 전송률을 둘로 나누어 같은 대역폭을 가정하고 계산한다.

$$R(q[n]) = \frac{R(q_1[n]) + R(q_2[n])}{2} \quad (15)$$

(15)로 바뀐 채널용량을 적용하고 동일 과정을 반복하여 에너지 효율을 최대화하는 경로를 찾아낸다. 이 경로를 통해 얻어낸 에너지 효율 값과 기지국이 한 개일 때 최적화를 통해 얻어낸 경로로 얻은 값을 거리마다 비교한다. 이를 통해 우리는 두 기지국을 한 개로 치환할 때 적합한 거리에 대해 파악하는 것을 목표로 한다.

III. 결론

본 논문에서는 앞선 본문에서 언급한 방법을 이용하여 다음의 조건을 가정하고 시뮬레이션을 통해 최적경로와 에너지 효율성을 계산한다.

$$H = 100[m], c_1 = 9.26 \times 10^{-4}, c_2 = 2250, B = 1[\text{MHz}],$$

$$q_l = [0, 1000]^T, q_f = [1000, 0]^T, V_{\min} = 3[m/s], \gamma_0 = 10^7$$

$$V_{\max} = 100[m/s], A_{\max} = 5[m/s^2], \delta_t = 0.2[s]$$

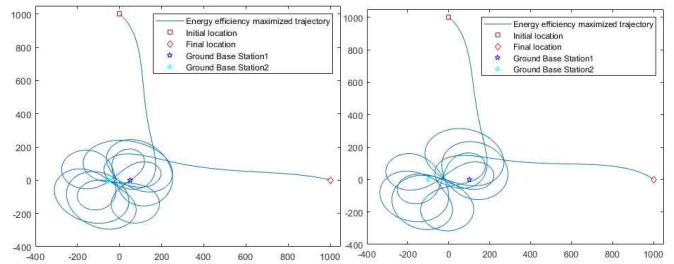


그림 3, 4. 두 기지국 간 거리 100,200m일 때 경로

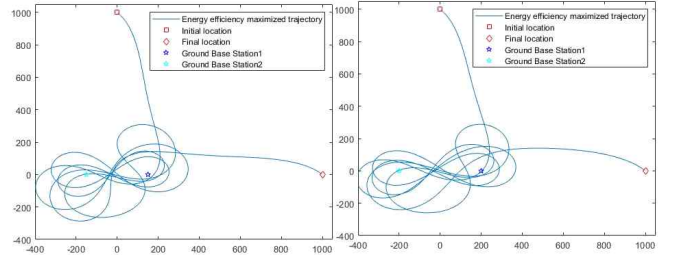


그림 5, 6. 두 기지국 간 거리 300,400m일 때 경로

두 기지국 간의 간격을 100,200,300,400m로 늘려가면서 시뮬레이션을 진행하면 결과는 위의 그림 3, 4, 5, 6과 같다. 얻어낸 결과와 한 개의 기지국에서 얻어낸 경로를 대입한 결과를 비교하면 다음과 같은 표를 얻을 수 있다.

기지국 간 거리	100m	200m	300m	400m
에너지 효율				
두 기지국 (kbits/Joule)	64.11	63.26	62.23	61.02
한 기지국으로 치환 (kbits/Joule)	63.96	62.77	60.99	58.83
차이(%)	0.234	0.775	1.993	3.589

이를 통해서 우리는 1% 미만의 오차를 허용한다고 했을 때, 100m 혹은 200m 떨어진 두 개의 기지국을 한 개로 여기고 경로 최적화를 진행하는 것이 타당하다는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 복잡도를 줄이고자 두 개의 기지국을 한 개로 치환하여 경로 최적화를 이용한 에너지 효율 최대화를 진행할 때 사용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워킹기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD190033ED)

참고 문헌

- [1] Zeng, Y., Zhang, R. and Lim, T. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), pp.36-42.
- [2] Zeng, Y. and Zhang, R. (2017). Energy-Efficient UAV Communication With Trajectory Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(6), pp.3747-3760.