

# 협대역 사물인터넷과 위성 간 통신에서 전력 제어와 연결을 이용한 최저 전송률 최대화

이병헌, 이주형\*, 고영채

고려대학교, 서던 캘리포니아대학\*

[tbio@korea.ac.kr](mailto:tbio@korea.ac.kr), [juhyung.lee@usc.edu](mailto:juhyung.lee@usc.edu), [koyc@korea.ac.kr](mailto:koyc@korea.ac.kr)

## Minimum transmission rate maximization using power control and association in NB IoT-to-satellite communication

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

Korea Univ., University of Southern California\*

### 요약

본 논문에서는 협대역 사물인터넷 위성 간 통신에서 전력 제어와 연결을 이용한 최저 전송률 최대화를 다룬다. 전시상황과 같이 데이터를 모으고 안전하게 전송하기 위해 위성과 통신하는 업링크 상황을 가정한다. 해당 네트워크 상황에서 송신전력량 최적화 (power allocation) 와 연결성 최적화 (association optimization)을 통해 통신량 최적화 문제를 해결한다. 해당 최적화 문제해결을 위해 non-convexity는 local point를 활용한 근사화 기법인 SCA 기법을 활용하고 다중 변수 최적화 문제를 다룰 수 있는 BCD 방식을 활용한다. 시뮬레이션의 결과를 통해 제안한 알고리즘을 통해 얻은 결과가 각각의 최적화 기법에 비해 더 높은 전송률을 획득함을 알 수 있다.

### I. 서론

군사 네트워크에서 사물인터넷은 정보를 모으는 중요한 해결책으로 주목 받고 있다 [1]. 특히, 협대역 사물인터넷은 적은 비용으로 5G 네트워크에서도 주목받고 있는 만큼 군사 네트워크에서 높은 활용성을 기대받고 있다. 하지만, 전시상황에서 지상망의 사용은 적의 공격에 쉽게 노출되어 네트워크가 파괴될 수 있다는 위험성을 가진다. 따라서 최근 비지상망과의 결합을 통해 안정적인 군사 네트워크를 구축하여 전시상황에서 정보를 수집하고 처리하고자 한다. 본 논문에서는 협대역 사물인터넷과 비지상망의 결합을 통해 안정적인 업링크 상황에서 송신전력량 최적화와 연결성 최적화를 통해 최저 전송률을 최대화하고 구한 결과를 기존의 방식과 비교한다.

### II. 본론

본 논문에서는 먼저 위성과 협대역 사물인터넷 간의 시스템 모델을 통해 구한 전송률을 통해 기지국에 대한 평균 전송률을 구한다. 제한 조건을 기반으로 최적화 문제를 정의하고 이를 해결하는 알고리즘을 기술한다.

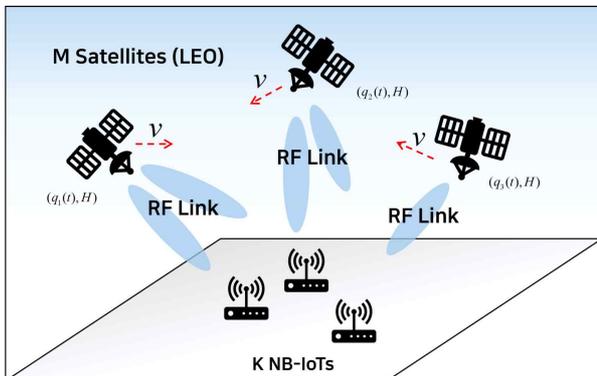


그림 1 시스템 모델

그림 1에서 보이듯이  $K$ 개의 협대역 사물인터넷이 지상에서 주변 환경에서 데이터를 수집하고  $M$ 개의 저궤도 위성과 RF 업링크 통신하여 데이터를 안전하게 송신하는 상황을 가정한다.

위성의 위치를 연속적인 시간의 함수로 표현할 경우, 전송률을 계산하기 매우 어렵기에 총 시간을 큰 슬롯으로 나누어 변환한다 [2].

$n$ 번째 time slot에서  $k$ 번째 기지국과  $m$ 번째 위성 사이의 채널 이득  $h_{km}[n]$ 은 다음과 같다.

$$h_{km}[n] = \frac{\beta_0}{\sqrt{\| \mathbf{q}_m[n] - \mathbf{q}_k \|^2}}, \quad \forall k, m \quad (1)$$

여기서  $\beta_0$ 는 기준거리 1m당 path loss를 의미하고,  $\mathbf{q}_m[n]$ 은  $m$ 번째 위성의  $n$ 번째 time slot에서의 위치 벡터,  $\mathbf{q}_k$ 은  $k$ 번째 협대역 사물 인터넷의 위치 벡터를 의미한다. 각 위성은 다른 주파수 대역을 사용하고 같은 위성에 접속하는 협대역 사물인터넷은 같은 주파수를 사용한다고 가정한다. 사물인터넷 장비간 간섭을 제어하기 위해 빔포밍 기술이 적용되어 있다고 가정한다.  $k$ 번째 협대역 사물인터넷이  $m$ 번째 위성과  $n$ 번째 time slot에서 통신할 때 전송률  $R_{km}[n]$ 은 다음과 같다.

$$R_{km}[n] = B \log_2 \left( 1 + \frac{A_{km}[n] P_k[n] G_{km} h_{km}[n]}{1 + \sum_{i=1, i \neq k}^K A_{im}[n] P_i[n] G_{im}^I h_{im}[n]} \right), \quad \forall k, m, n \quad (2)$$

여기서  $B$ 는 채널 대역폭이고  $G_{km}$ 은  $k$ 번째 사물인터넷 장비와  $m$ 번째 위성 간의 빔포밍 이득,  $G_{im}^I$ 은  $i$ 번째 사물인터넷 장비와  $m$ 번째 위성 간의 간섭 신호 빔포밍 이득,  $A_{km}[n]$ 은  $k$ 번째 사물인터넷 장비와  $m$ 번째 위성 간의  $n$ 번째 time slot에서의 연결,  $P_k[n]$ 은  $k$ 번째 사물인터넷 장

비의  $n$  번째 time slot에서의 송신 전력을 의미한다. 주어진 전송률을 이용하여  $k$  번째 기지국의 평균 전송률  $\bar{R}_k$ 는 다음과 같다.

$$\bar{R}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M R_{km}[n], \forall k \quad (3)$$

II.-2) 최저 전송률 최대화

앞선 식들을 이용하여 제한 조건과 최적화 문제를 정리하면 다음과 같다.

$$P1) \max_{A, P} \min_{0 \leq k \leq K} \bar{R}_k \quad (4)$$

s.t. (1)–(3)

$$0 \leq P_k[n] \leq P_{\max}, \forall k, n \quad (4-1)$$

$$A_{km}[n] \in [0, 1], \forall k, m, n \quad (4-2)$$

$$\sum_{m=1}^M A_{km}[n] = 1, \forall k, n \quad (4-3)$$

$$\sum_{k=1}^K A_{km}[n] \leq L, \forall m, n \quad (4-4)$$

여기서  $L$ 은 한 위성에 접속 가능한 최대 사물인터넷 장비의 수를 의미한다. (4-1,2,3)은 최대 전력 소모량의 제한과 연결에 대한 제한 조건을 의미한다. BCD(Block Coordinate Descent) 방식을 활용하여 해당 최적화 문제를 전력을 제어하는 P2와 연결을 최적화하는 P3 두문제로 나눈다. BCD를 통해 P1을 P2와 P3로 단순화했지만, P2와 P3의 non-convexity는 여전히 존재한다. 이를 local point를 이용한 SCA (Successive Convex Approximation) 기법을 활용하여 해결한다. P2의 경우, non-convexity 한  $R_{km}[n]$ 의 lower bound  $\check{R}_{km}[n]$ 를 local point  $\check{P}_k[n]$ 와 테일러 1차 근사화를 이용하여 구한다. 구하는 과정과 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{km}[n] &= B \log_2 \log_2 \left( 1 + \frac{A_{km}[n] P_k[n] G_{km} h_{km}[n]}{1 + \sum_{i=1, i \neq k}^K A_{im}[n] P_i[n] G_{im}^I h_{im}[n]} \right) \\ &= B \log_2 \left( 1 + \sum_{i=1}^K A_{im}[n] P_i[n] G_{im}^I h_{im}[n] \right) \\ &\quad - B \log_2 \left( 1 + \sum_{i=1, i \neq k}^K A_{im}[n] P_i[n] G_{im}^I h_{im}[n] \right) \\ &\geq B \log_2 \left( 1 + \sum_{i=1}^K A_{im}[n] P_i[n] G_{im}^I h_{im}[n] \right) - B \log_2 (1 + \check{x}) - \frac{x - \check{x}}{(1 + \check{x}) \log_2 2} \\ &= \check{R}_{km}[n] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $G_i = G(i=k), G^I(i \neq k)$ .  $\check{x} = \sum_{i=1, i \neq k}^K A_{im}[n] P_i[n] G_{im}^I h_{im}[n]$ ,

$x = \sum_{i=1, i \neq k}^K A_{im}[n] P_i[n] G_{im}^I h_{im}[n]$ 를 의미한다.

$$P2-1) \max_P \min_{0 \leq k \leq K} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \check{R}_{km}[n] \quad (6)$$

$$0 \leq P_k[n] \leq P_{\max}, \forall k, n \quad (6-1)$$

동일한 원리로 P3 문제도 local point를 활용하여 해결한다. 연결은 0과 1의 binary한 값이 아닌 0과 1사이의 값을 가지는 linear relaxation을 통해 해결한다. 최적화를 진행하여 얻어낸 최적의 값을 다시 local point로 활용하여 수렴한 경우 다른 문제를 해결하는 BCD 방식을 통해 문제를 해결한다.

### III. 결론

본 논문에서는 앞선 본론에서 언급한 방법을 이용하여 다음의 조건을 가정하고 시뮬레이션을 통해 최적화된 최저 전송률을 계산한다.

$H=500[km], v=7.8[km/s], M=3, B=180[kHz]$   
 $\beta_0=-50[dB], L=10, P_{\max}=32[dBm], \delta_t=1[s], K=50$

결과는 다음과 같다.

	송신전력량 최적화	연결성 최적화	최적화 동시에 진행
최저 전송률[kbps]	10.12	12.528	13.086

최적화를 진행한 결과 송신전력량 최적화와 연결성 최적화를 동시에 진행하여 각각 진행한 결과보다 더 우수한 결과를 얻음을 보여준다. 해당 결과를 통해 동시에 두 가지 최적화를 진행하면서 더 나은 결과를 얻었다는 것을 확인할 수 있다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2022-0-00704, 초고속 이동체 지원을 위한 3D-NET 핵심 기술 개발)

### 참고 문헌

- [1] F. T. Johnsen et al., "Application of IoT in military operations in a smart city," *2018 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, Warsaw, Poland, 2018, pp. 1-8
- [2] Zeng, Y. and Zhang, R. (2017). Energy-Efficient UAV Communication With Trajectory Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(6), pp.3747-3760.