

ISL 기반 LEO 위성 네트워크의 에너지 최소화를 위한 캐시 인식 라우팅

서정민,곽정호
대구경북과학기술원

{jeongminseo, jeongho.kwak}@dgist.ac.kr

Cached-Aware Back-Pressure Routing for Energy Minimization in ISL-based LEO Satellite Networks

Seo Jeong Min, Kwak Jeong Ho
DGIST

요약

위성 네트워크에서 캐시된 콘텐츠는 라우팅 기술을 통해 inter-satellite link (ISL)를 거쳐 전달된다. 본 논문에서는 처음으로 ISL에 기반하여 콘텐츠 캐싱과 라우팅을 공동으로 최적화한다. 먼저, 모든 위성의 큐를 안정화하는 제약 조건을 가지면서 라우팅 에너지를 최소화하기 위한 동적 문제를 형성한다. 이를 해결하는 알고리즘을 통해 Lyapunov optimization 기법을 활용한다. 마지막으로 다른 라우팅 알고리즘에 비해 큐 길이와 에너지 측면에서 우수한 성능을 보인다.

I. 서론

저궤도 위성은 인터넷뿐만 아니라 지구 관측 데이터와 긴급 서비스 같은 콘텐츠도 전달하고 있다. 특히, 최근에 지구 관측 데이터의 트래픽이 급속도로 증가하고 있다. 이러한 상황에서 도심 지역으로 데이터를 제공하는 가장 짧은 경로에는 트래픽이 몰리는 현상이 발생할 수밖에 없다. 하지만 위성 네트워크는 mesh topology로 이루어져 있어, 쉽게 우회가 가능하다. 이러한 방법으로 트래픽을 분산시켜 병목 현상을 줄여야 한다.

또한, 저궤도 위성은 수명이 대략 5년 정도이고, 유선으로 전력을 제공해 주는 지상망과 달리 배터리의 수명에 의존하기 때문에 에너지 소모를 줄이는 것이 중요하다. 최근에는 onboard processing (OBP)와 같이 하는 일이 고도화되고 제공하는 데이터의 크기도 커지고 있어 더욱 에너지 효율적인 라우팅 기법이 필요하다.

[1]은 위성망에서 유일하게 콘텐츠 캐싱과 라우팅을 함께 고려했다. 하지만 이는 캐시 파일을 예측하여 어디서 콘텐츠를 가져올지만 결정하고 라우팅은 최적화하지 않는다. 반면에 본 논문은 캐싱과 라우팅을 함께 동적으로 최적화한다.

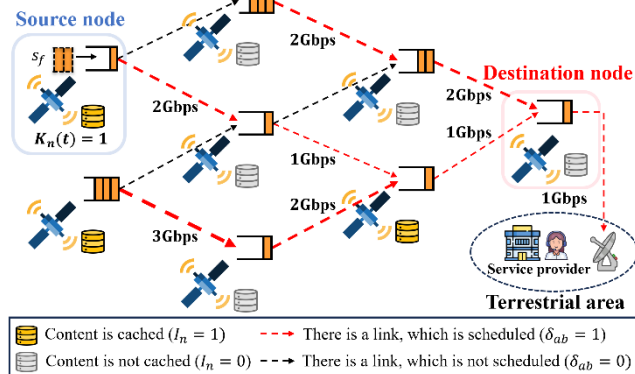


그림 1. 시스템 모델

II. 본론

그림 1과 같이 지구 관측 데이터를 콘텐츠로 설정하여 시스템을 설명한다. 우리는 요청된 콘텐츠를 제공하는 노드를 소스 노드, 콘텐츠가 최종적으로 도착하는 노드를 목적지 노드로 정의한다. 콘텐츠는 노란색으로 표시된 캐시를 가진 몇 개의 위성에만 저장되어 있다. Service Provider가 데이터를 요청하면 캐시가 되어 있는 위성 중 하나가 소스 노드로 결정되고 ($K_n(t) = 1$), 그 노드의 큐에 콘텐츠의 크기 s_f 만큼 패킷이 들어온다. 그 노드로부터 목적지까지 분산된 라우팅 방식으로 콘텐츠를 전달한다.

본 논문은 위성에 콘텐츠가 저장된 캐시가 주어졌을 때, 큐를 안정화하면서 라우팅에 소모되는 에너지를 최소화하기 위해 콘텐츠를 어떤 위성에서 가져올지와 어떤 링크와 속도로 전달할지를 결정한다. 형성한 장기적 관점 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\min_{K_n(t), \delta_{nb}(t), \mu_{nb}(t)} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{n=1}^N E_n(\delta_{nb}(t), \mu_{nb}(t)),$$
$$\text{s.t. } \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} Q_n(t) < \infty, \forall n \in \mathcal{N}, \quad (1)$$

여기서 $K_n(t)$ 는 소스 노드, $\delta_{nb}(t)$ 는 전달 링크, $\mu_{nb}(t)$ 는 전송 속도를 결정하는 변수이다. 그리고 목적 함수의 $E_n(t)$ 는 ISL을 통해 라우팅하는데 소모되는 에너지이다. $Q_n(t)$ 는 노드 n 의 큐 길이이다. 이때, 큐 길이의 업데이트 식은 다음과 같다.

$$Q_n(t+1) = [Q_n(t) - X_n(t) + Y_n(t) + s_f K_n(t)]^+, \quad (2)$$

여기서 $X_n(t)$ 는 노드에서 나가는 총 패킷 양이고, $Y_n(t)$ 는 노드에 들어오는 총 패킷 양이다. 이는 다음과 같다.

$$X_n(t) = \sum_{b=1}^N \mu_{nb}(t), \quad Y_n(t) = \sum_{a=1}^N \mu_{an}(t). \quad (3)$$

최적화 문제의 제약 조건은 노드의 큐 길이가 유한하다는 것을 의미한다. 이는 들어온 모든 콘텐츠는 유한한 시간 내에 서비스된다는 것을 뜻한다. 위 문제를 Lyapunov optimization 기법을 통해 다음과 같이 slot-by-slot 문제를 도출한다. [2]

$$\begin{aligned} \min_{K_n(t), \delta_{nb}(t), \mu_{nb}(t)} \quad & V \sum_{n=1}^N p_n(\delta_{nb}(t), \mu_{nb}(t)) \\ & + \sum_{n=1}^N s_f K_n(t) Q_n(t) \\ & - \sum_{n,b=1}^N \mu_{nb}(t) [Q_n(t) - Q_b(t)], \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 V 는 에너지-지연 시간 trade-off 파라미터이다. $p_n(t)$ 는 노드가 해당 타임 슬롯에서 소모하는 전력이다. slot-by-slot 문제는 각 타임 슬롯마다 동적으로 문제를 해결하기 때문에 에너지가 아닌 전송 전력을 최소화한다. 전송 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_n(\delta_{nb}(t), \mu_{nb}(t)) = \sum_{b=1}^N \frac{\sigma_{th}^2}{h_{nb}(t)} \left(2^{\frac{\delta_{nb}(t)\mu_{nb}(t)}{B_n}} - 1 \right), \quad (5)$$

여기서 σ_{th}^2 는 열에 의한 노이즈, $h_{nb}(t)$ 는 ISL 무선 채널 이득, B_n 은 ISL 대역폭이다. ISL의 무선 채널 이득은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$h_{nb}(t) = \eta^t \eta^r G^t G^r L^t L^r \left(\frac{w}{4\pi d_{nb}(t)} \right)^2, \quad (6)$$

여기서 $\eta^{t/r}$, $G^{t/r}$, $L^{t/r}$ 은 각각 송신기/수신기의 광통신 효율, 신호 이득, 포인팅 손실 요소이다. w 는 파장, $d_{nb}(t)$ 는 노드 n 과 b 사이의 거리이다. 시간에 따라 위성 간 거리가 변하면 적응적으로 전달 링크와 전송 속도를 결정한다. 위성 간 거리가 멀어질수록 같은 전송 속도에 도달하기 위해 더 많은 에너지가 소모되므로 이를 이용하여 상황에 맞춰 큐를 안정화하며 에너지 효율적인 라우팅을 진행할 수 있다.

위 slot-by-slot 문제 (4)를 최소화하도록 알고리즘을 도출한다. 네트워크에 들어오는 패킷 양이 capacity region 안에 있을 때, 단기적으로 매 타임 슬롯마다 해당 문제를 최소화하도록 동작하면 장기적으로 최적값에 달성한다. 이는 다음과 같이 에너지와 큐 길이의 upper bound를 구하여 수학적으로 증명할 수 있다.

$$\begin{aligned} \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E \left[\sum_{n=1}^N Q_n(t) \right] &\leq \frac{B + V\bar{E}(\lambda + \epsilon)}{\epsilon}, \\ \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E \left[\sum_{n=1}^N E_n(t) \right] &\leq \bar{E}(\lambda + \epsilon) + \frac{B}{V}, \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\bar{E}(\lambda + \epsilon)$ 는 $\lambda + \epsilon$ 의 속도로 네트워크에 패킷이 들어올 때 이를 서비스하도록 제어하여 달성할 수 있는 평균 최소 라우팅 소모 에너지이다. B , ϵ 은 양의 상수이다.

그림 2는 V 값에 따라 에너지-지연 시간의 trade-off 결과를 나타낸다. Cached-Aware Back-Pressure (CABP)가 본 논문에서 제안한 알고리즘이고, SR이 전송 경로가 정해진 정적 라우팅 기법, OP가 큐 길이를 고려하지 않고 에너지를 아끼도록 라우팅, OQ는 에너지를 고려하지 않고 큐 길이를 줄이도록 동작한다. BP는 기존의 Back-Pressure 기법이다. [3]

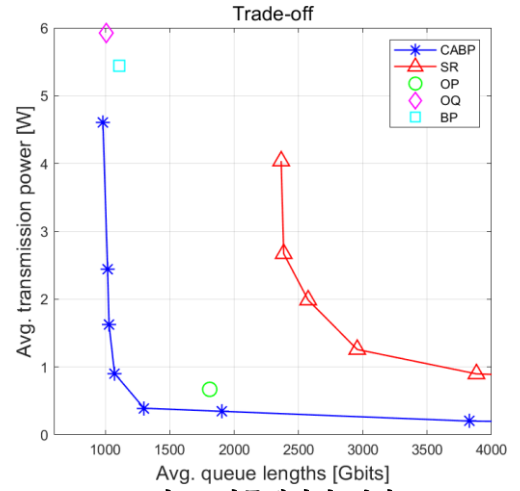


그림 2. 시뮬레이션 결과

제안한 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 큐 길이와 에너지 소모 측면에서 모두 우수한 성능을 보이는 것을 확인한다. 특히, OQ와 BP 같이 큐 길이를 줄이는 알고리즘보다 더 낮은 큐 길이를 달성하고 OP와 같이 큐 길이를 고려하지 않고 에너지를 줄이는 알고리즘보다 같은 큐 길이 대비 더 낮은 에너지를 달성하는 것을 알 수 있다. 또한 라우팅 경로가 정해져 있는 SR 제안된 알고리즘이 대략 58% 큐 길이 감소를 보인다. 이는 로드를 밸런싱하는 본 알고리즘이 더 적은 지연으로 빠르게 콘텐츠를 제공할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 위성망에서 콘텐츠가 저장된 캐시가 주어졌을 때, 이를 사용자에게 전달하는 라우팅 기법을 소개한다. 또한 이는 처음으로 위성망에서 콘텐츠 캐싱과 라우팅을 함께 동적으로 최적화한다. 위성이 ISL을 통해 라우팅 소모 에너지를 최소화함과 동시에 큐를 안정화하는 분산적인 CABP 알고리즘을 제안한다. 이는 위성 간 거리에 따라 변하는 채널 환경에 적응적으로 콘텐츠를 가져올 노드, 전달 링크, 전송 속도를 제어한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 다른 라우팅 알고리즘에 비해 큐 길이, 에너지 소모 측면에서 우수한 성능을 나타내는 것을 확인한다.

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] J. Tang, J. Li, L. Zhang, K. Xue, Q. Sun, J. Lu, Content-aware routing based on cached content prediction in satellite networks, in: GLOBECOM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference, IEEE, 2022, pp. 6541-6546.
- [2] M. Neely, Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems, Springer Nature, 2022.
- [3] Z. Jiao, B. Zhang, C. Li, and H. T. Mouftah, "Backpressure-based routing and scheduling protocols for wireless multihop networks: A survey," IEEE Wireless Commun., vol. 23, no. 1, pp. 102-110, Feb. 2016.