

비균일 트래픽 환경에서 선형 기계학습 기반 위성 자원 할당 성능 분석

송재영¹, 김수영^{1,*}, 오대섭²

¹ 전북대학교, ² 한국전자통신연구원

jy.song@jbnu.ac.kr, sookim@jbnu.ac.kr*, trap@etri.re.kr

Performance analysis on satellite resource allocation based on linear machine learning for uneven traffic conditions

Jaeyoung Song¹, Sooyoung Kim^{1,*}, Daesub Oh²

¹Jeonbuk National University

²Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

요약

본 논문은 비균일 트래픽 환경에서 선형 기계학습 기반 위성 자원 할당 기법의 성능을 분석 제시한다. 위성시스템의 경우 각 셀별 트래픽 요구량에 대한 트래픽 비균일성이 매우 크게 발생할 수 있다. 따라서, 균일한 트래픽 발생환경에 적합한 기법을 그대로 적용할 경우 성능이 크게 저하될 수 있다. 본 논문에서는 트래픽 발생이 비균일한 환경을 가정하여, 자원할당 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 분석하고, 이를 효과적으로 해결할 수 있는 방식을 제안한다.

I. 서론

6세대(6G) 무선통신 시나리오가 ‘초공간’, ‘초연결’ 통신을 목표로 함에 따라, 지상 환경에 영향을 받지 않고 안정적인 통신 서비스를 제공할 수 있는 위성통신이 주목받고 있다. 위성시스템에서 활용할 수 있는 주파수 대역은 한정적이며, 특히, 전력은 매우 비싸고 제한된 자원이기때문에 효율적인 자원 할당이 필수적으로 요구된다. 이러한 점을 고려하여 동적 채널 환경의 저궤도 위성시스템에서 효과적으로 적용이 가능한 선형 기계학습 기반 지능형 자원할당 기법(linear operation-based intelligent resource allocation method; LOIRA) 연구가 진행된 바 있다 [1].

그러나 사전 연구에서는 서비스를 제공받는 모든 셀들이 균일한 트래픽 요구량(Traffic Demand; TD)을 가지는 시나리오를 가정하였다. 그러나, 광역의 서비스 커버리지를 제공하는 위성 시스템의 경우 TD의 비균일성이 매우 클 수 있다는 점을 고려하여야 한다. 따라서, 균일 트래픽 분포하에서 효과적으로 동작하는 기존 방식의 경우 그 성능이 매우 저하될 수 있다. 본 논문에서는 저궤도 위성이 서비스하는 셀들 중 일부 셀에서만 트래픽 요구량이 집중되어 발생하는 환경을 가정하고, 기존 연구에서 개발된 알고리즘이 어떤 문제를 가질 수 있는지를 분석하고 이를 효과적으로 해결할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

II. 균일트래픽 발생 환경을 가정한 위성 시스템을 위한 자원 할당 알고리즘

자원 할당의 목적은 위성 시스템에 최적의 전력 및 대

역폭 자원을 할당하는 것으로, 이를 해결하기 위한 최적화 문제를 다음과 같이 정의할 수 있다 [2].

$$\arg \min_{\mathbf{b}} P_{\text{total}} \quad \text{s.t.} \quad \begin{aligned} \sum_{i=1}^N b_i &\leq B, b_i \geq 0, \\ (P_t)_i^j &\geq 0, \forall i, j, \\ P_{\text{total}} &\leq P_{\text{max}}, \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $P_{\text{total}}[\text{Watt}]$ 는 시스템의 전체 전송 전력을, $(P_t)_i^j$ 는 i 번째 부대역 b_i 를 사용하는 빔 j 의 송신전력을, P_{max} 는 최대 전송 전력이며, B 는 가용한 전체 대역폭을 나타낸다.

기존 선행연구에서 제시된 LOIRA 알고리즘은 각 셀의 요구 트래픽이 시스템 용량 내에서 제공될 수 있는지, 즉, 자원 할당이 가능한지 판단하기 위한 단층 퍼셉트론과 부대역의 크기를 결정하는 선형회귀(Linear Regression; LR) 모델, 그리고 요구 트래픽을 시스템 용량에 맞게 감소시키기 위한 투영(projection) 알고리즘으로 구성되어 있다 [1].

동적 시변 채널 상태 벡터 Ψ 와 각 셀의 트래픽 요구량 벡터 \mathbf{r} 로 이루어진 시스템 입력 벡터 $\mathbf{v} = [\mathbf{1} \ \Psi \ \mathbf{r}]$ 는 미리 학습된 퍼셉트론 $\mathbf{y} = \text{sgn}(\mathbf{c}\mathbf{v}^T)$ 를 거친다. 여기서 \mathbf{c} 는 사전 훈련시킨 LR의 가중치 벡터를 나타낸다. 이때, 퍼셉트론은 주어진 \mathbf{v} 에 대해 자원 할당이 가능한지를 판별하고, 만약 할당 가능하다면 사전 훈련시킨 LR을 통해 식 (1)의 해인 최적 대역폭을 추정하여 시스템에 할당한다. 반면에 할당이 불가능한 경우, 자원 할당이 가능한 영역(+1)과 불가능한 영역(-1)을 나누는 경계공간(threshold space) $\Omega = \text{null}(\mathbf{c}\mathbf{v}^T)$ 으로 \mathbf{r} 을 투영하여 시스템에서 제공할 수 있는 최대 트래픽 요구량 $\mathbf{r}_p = \text{Proj}_{\Omega}(\mathbf{r})$ 를 유도하는 방법을 제시하였다 [1].

III. 비균일 트래픽 환경에서의 선형 기계학습 기반 위성 자원할당 알고리즘

그림 1 은 본 논문에서 제안하는 방법을 개념적으로 나타낸 것이다. 비균일한 TD 분포는 LOIRA 에 입력되는 데이터의 비선형성을 증가시킨다. 이는 선형 경계공간을 판별의 기준으로 삼는 퍼셉트론에서 거짓 양성(False Positive; FP)오류 또는 거짓 음성(False Negative)오류가 일어나게 한다. 두 종류의 오류 중 LOIRA 에서 문제가 되는 오류는 FP 오류이다. FP 오류는 실제로는 할당불가(-1)로 판별된 TD 가 할당가능(+1) 영역으로 잘못 분류되는 경우로, 그림 1 의 (a)와 같이 투영 이후 TD 의 증가를 일으킨다. 이는 정사영을 통해 -1 영역에 위치한 \mathbf{r} 을 +1 영역에 최대한 근접 시켜 요구 트래픽을 시스템 용량에 맞게 감소시키는 투영의 목적을 달성하지 못함을 의미한다. 따라서 FP 오류 때문에 투영 이후 TD 가 증가하는 현상을 방지하기 위해 그림 1 의 Ω' 와 같이 경계공간을 \mathbf{r} 의 위치로 이동시켜야 한다. 기존 LOIRA 방식에서는 경계공간을 낮추는 과정이 여러 번 반복되어야 Ω 를 Ω' 에 도달시킬 수 있었다. 제안 방식에서는 Ω 와 Ω' 사이의 거리를 구해 해당 값만큼 한 번만 경계공간을 낮추어 불필요한 반복 과정을 줄인다. 이때 Ω 와 Ω' 사이의 거리는 \mathbf{r} 과 \mathbf{r}_p 의 차이의 norm(norm)인 $d = \|\mathbf{r} - \mathbf{r}_p\|$ 로 정의된다.

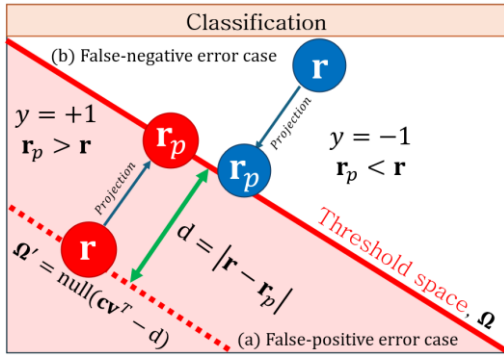


그림 1. 단층 퍼셉트론의 FP 오류에 대해 제안된 경계공간 이동 알고리즘

IV. 시뮬레이션 결과

그림 2 는 비균일 트래픽 환경에서 FP 오류가 발생했을 경우, 트래픽 요구량을 조절하기 위하여 자원 할당 과정을 반복하는 횟수를 조사한 결과이다. 시뮬레이션 과정에서 주파수 재사용 인자 $F=6$, 같은 주파수 대역을 사용하는 지상 구성요소의 개수 $M=3$, 전체 셀 중에서 트래픽이 발생하는 비율은 50%로 가정하였다.

평균 트래픽 요구량이 시스템 용량 내에 있을 경우, 즉 본 예제에서 550 Mbps 미만일 때에는 FP 오류율이 0 에 수렴하여 추가 반복 과정 없이 성공적인 자원할당이 가능하다. 반면 평균 트래픽 요구량이 시스템 허용 한계를 넘으면, 기존 LOIRA 방식은 자원 할당이 가능해질 때까지 퍼셉트론의 경계공간을 점진적으로 낮추며 투영을 진행하기 때문에 평균 10 회 이상의 투영 과정을 반복하는 반면, 제안 방식은 LOIRA 에 비해 반복 횟수가 최대 약 50% 감소된다는 것을 알 수 있다. 이는 알고리즘의 계산 복잡도를 감소시킬 수 있고, 궁극적으로 최대 반복 횟수가 제한되어 있을 경우 자원할당 성공율을 증가시킬 수 있다.

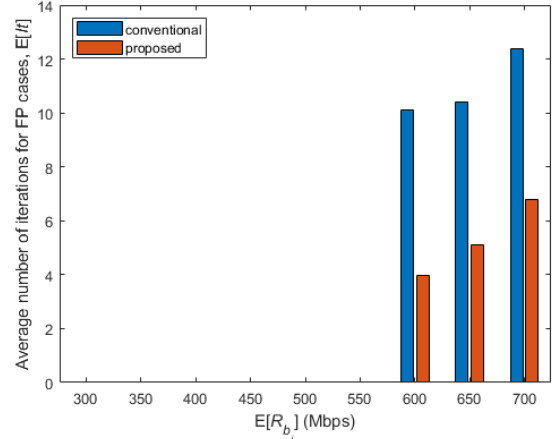


그림 2. 비균일 트래픽 환경에서 FP 오류가 발생한 경우에 대한 자원 할당 알고리즘의 반복 횟수 비교

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2021-0-00719, 비정지제도 위성망 주파수 간섭 평가/공유 기술 개발 과제)

참고 문헌

- [1] S. Chan, G. Jo, S. Kim, D. Oh and B. Ku, "Dynamic power and bandwidth allocation for DVB-based LEO satellite systems," *ETRI Journal*, 2022.
- [2] S. Chan, H. Lee, S. Kim, and D. Oh, "Intelligent low complexity resource allocation method for integrated satellite-terrestrial systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no, 5, pp. 1087-1091, May 2022.