

AI-RAN 을 위한 뉴로모픽 기반 통신-센싱 융합(ISAC) 기술

박주희, 강진규
명지대학교 반도체 ICT 융합대학

rabitangl20@mju.ac.kr, jkkang@mju.ac.kr

Neuromorphic Integrated sensing and communication for AI-RAN

Juhee Park, Jinkyu Kang
Myoungji University

요 약

본 논문은 6G AI-RAN 환경에서 자율주행, UAM 등 초실감 서비스를 실현하기 위한 핵심 기술로 SNN-on-CU Neuromorphic 아키텍처를 제안한다. 기존의 프레임 기반 딥러닝 방식은 유의미한 이벤트가 없는 구간에서도 불필요한 연산을 반복 수행하며, 센싱 데이터 폭증에 따른 백홀 지연 및 과도한 전력 소모하는 구조적 한계에 직면해 있다. 이런 난제를 해결하기 위해 Spiking Neural Network (SNN)와 IR 과형을 결합하여 센싱, 통신, 컴퓨팅을 단일 파이프라인으로 통합하는 기술적 대안을 제시한다.

I. 서론

차세대 6G 이동통신 시대의 도래와 함께 자율주행, 스마트 팩토리, 로보틱스, 도심 항공 모빌리티 등 초실감·초지능 서비스의 실현이 핵심 과제로 부상하고 있다. 이러한 서비스들은 엣지에서 즉각적으로 인지, 판단, 제어 프로세스를 수행해야 하며, 이를 지원하기 위해 AI 기술을 무선 접속망에 직접 내재화 해 네트워크 성능을 극대화하는 AI-RAN 및 엣지 인텔리전스 기술 확보가 다뤄지고 있다.

그러나 기존의 중앙 집중형 클라우드 처리 방식은 폭증하는 센싱 데이터를 처리하는 과정에서 심각한 백홀 지연, 프라이버시 침해, 과도한 운영 비용 발생이라는 한계를 보이고 있다. 특히 프레임 기반 딥러닝 처리 방식과 센싱·통신·컴퓨팅이 물리적으로 분리된 파이프라인 구조는 다음과 같은 한계를 초래한다.

고빈도 센싱 데이터를 프레임 단위로 처리함에 따라 유의미한 이벤트가 발생하지 않는 정적 구간에서도 불필요한 연산과 전력 소모가 지속적으로 발생한다. 개별적으로 최적화된 파이프라인에서는 대규모 원시 데이터나 특정 정보를 전송해야 하므로 무선 대역폭 사용량이 폭증하고 전송 지연 시간이 길어지는 문제가 발생한다. 결과적으로 정확도, 지연시간, 에너지 효율을 동시에 만족시키지 못 한다.

이러한 한계를 해결하기 위한 대안으로 생물학적 뇌의 동작 원리를 모방한 뉴로모픽 컴퓨팅 및 SNN 기술이 주목받고 있다. SNN은 데이터의 변화가 감지될 때만 이전 스파이크를 발생시키는 이벤트 기반 구동 방식을 통해 시간적 희소성(Temporal Sparsity)을 극대화 하며, 이를 통해 엣지 디바이스의 전력 소모를 획기적으로 절감할 수 있다. 특히 SNN은 정보의 발화 타이밍과 누적 전위를 통해 시계열 센싱 데이터와 무선 채널의 동적 특성을 효율적으로 처리하는 데 좋은 성능을 보인다.

본 논문에서는 이러한 뉴로모픽 아키텍처를 기반으로 센싱·통신·컴퓨팅을 단일 파이프라인으로 통합하는 Neuromorphic Integrated Sensing, Communication and Computing(N-ISAC)기술을 소개한다. 특히 AI-RAN 환경에서 클라우드(CU)가 다중 엣지 노드(RRH)로부터 수집된 신호를 통합적으로 처리하는 SNN-on-CU 프레임 워크를 중심적으로 고찰하고, 6G 지능형 물리 계층 설계의 새로운 방향성을 제시하고자 한다.

II. 기존 Neuromorphic ISAC (N-ISAC)

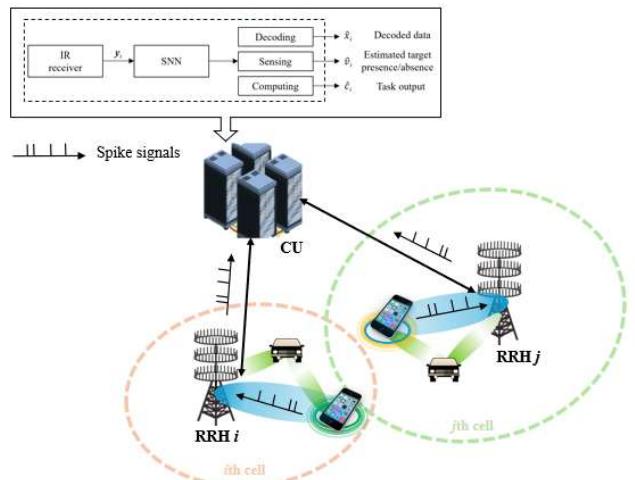


그림 1. 시스템 모델

N-ISAC 시스템은 그림 1 과 같이 6G 의 핵심 기술인 ISAC 을 구현하기 위해 Impulse Radio(IR) 과형을 공유 자원으로 활용한다.

IR 신호는 나노초 단위의 매우 짧은 폭을 가진 펄스를 사용해 정보를 전달하며, 펄스의 시간적 위치에 정보를 인코딩하는 펄스 위치 변조(PPM) 방식을 채택한다. 각 슬롯 l 내에서 비트 x_l 에 따른 변조 신호 $s(t)$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$s(t) = \sum_{l=1}^L \phi(t - (l-1)T - x_l L_b T_c) \quad (1)$$

여기서 $\phi(t)$ 는 펠스 파형이며, T_c 는 칩 시간을 나타낸다. 이러한 펠스 기반의 신호 체계는 통신을 위한 정보 전달 뿐만 아니라, 타깃에 반사되어 돌아오는 신호를 통해 타깃의 유무를 판단하는 레이더 센싱의 목적으로도 동시에 사용될 수 있는 구조적 이점을 지닌다.

수신단에서는 기존의 복잡한 디지털 블록 대신 뉴로모픽 컴퓨팅의 핵심인 SNN을 배치해 수신 신호를 처리한다. SNN은 시간 영역에서 발생하는 펠스 신호를 스파이크 형태로 처리하기에 최적화된 아키텍처를 제공한다. SNN 내 개별 뉴런의 내부 상태인 Membrane Potential $o_{k,l}$ 은 입력 스파이크와 뉴런 자체의 과거 출력에 의해 동적으로 변화한다. Membrane Potential 가 특정 임계값 θ 를 통과하면 해당 뉴런은 이진 스파이크를 발생시킨다. 뉴런 k 가 시간 l 에서 내보내는 출력 스파이크 식은 다음과 같다.

$$b_{k,l} = \Theta(o_{k,l} - \theta) \quad (2)$$

$\Theta(\cdot)$ 는 Heaviside step function이다. 괄호 안의 값이 0보다 크면 1을 출력하고 그렇지 않으면 0을 출력해서 스파이크 발생 여부를 결정한다.

N-ISAC 수신기는 두 개의 출력 뉴런을 통해 통신 데이터의 복구와 타깃의 존재 여부를 추정을 동시에 수행하는 다중 작업 학습 구조를 가진다. 시스템의 성능 극대화를 위해 통신 디코딩 손실 L^c 과 센싱 탐지 손실 L^s 를 가중치 β 로 조절하는 통합 손실함수 L^{ISAC} 를 사용해 네트워크를 학습시킨다.

$$L^{ISAC}(\theta) = \beta L^c(\theta) + (1 - \beta)L^s(\theta) \quad (3)$$

이런 학습 방식은 제한된 뉴런 자원 환경에서 통신 처리량과 센싱 정확도 사이의 최적의 trade-off 지점을 찾아낸다. 특히, SNN의 이벤트 기반 구동 방식은 전송 신호가 없는 휴지기에 뉴런의 활동을 최소화하므로 모든 데이터를 상시 처리하는 기존 딥러닝 기반 시스템 대비 높은 에너지 효율성을 제공함을 입증했다.

III. SNN-on-Cloud N-ISAC

본 논문에서는 6G AI-RAN 환경에서 초저전력·초저지연 지능형 인지를 실현하기 위한 SNN on CU Neuromorphic ISAC 시스템 모델을 제안한다. 제안하는 시스템은 공간적으로 분산된 다수의 엣지 노드(RRH)와 중앙 클라우드 서버(CU)가 제한된 프론트홀 대역폭 하에서 협력하는 중앙 집중형 뉴로모픽 ISAC 프레임워크를 기반으로 한다. 엣지 노드는 사용자단말(UE)로부터 수신된 아날로그 IR-PPM(Impulse Radio-Pulse Position Modulation) 신호를 수집하여 클라우드로 전달하며, 클라우드 서버는 집약된 데이터를 바탕으로 SNN 연산을 수행한다.

신뢰성과 효율적인 운용을 보장하기 위한 핵심 기술은 무선 신호의 수집부터 클라우드에서의 지능형 추론에 이르는 전 과정을 유기적으로 통합한다. 우선, 프론트홀 대역폭의 물리적 제약 상황에서도 데이터의 무결성을 유지

하기 위해, 엣지 노드에서 수집된 아날로그 IR 신호에 대해 정보손실을 최소화하는 최적화된 양자화 및 샘플링 기법을 적용하여 전송 효율을 극대화한다. 클라우드 서버의 입력단에서는 전송된 신호를 SNN이 실시간으로 처리할 수 있는 형태인 희소 스파이크 열로 변환하는 인코딩 최적화 공정을 가진다.

이렇게 처리된 다중 엣지 노드의 신호들은 CU 내 SNN의 다중 입력 융합형 은닉층 구조를 통해 공간적 특징이 통합적으로 추출되며, 이를 바탕으로 단일 네트워크 아키텍처 내에서 통신 데이터 복원과 타깃 유무 판별을 동시에 수행하는 Joint ISAC 알고리즘이 가동된다. 최종적으로 시스템은 통신과 센싱이라는 두 가지 상충하는 성능 지표 사이의 trade-off를 정밀하게 조율하기 위해 설계된 가중치 기반 통합 손실 함수를 활용하여, 비 정형적인 무선 환경에서도 최적의 지능형 인지 성능을 유지할 수 있도록 설계되었다.

IV. 결론

본 논문에서는 6G AI-RAN 환경에 최적화된 초저전력·초저지연 인지 서비스 제공을 위해 SNN-on-CU Neuromorphic ISAC 아키텍처를 제안하고 그 타당성을 고찰하였다. 제안된 시스템은 물리 계층의 IR-PPM 파형과 상위 계층의 SNN 연산을 유기적으로 통합함으로써, 기존 프레임 기반 처리 방식의 고질적인 문제인 불필요한 연선 소모와 백홀 병목현상을 해결할 수 있는 학술적 돌파구를 마련하였다.

SNN의 이벤트 기반 구동(Event-driven) 방식을 통해 엣지 인프라의 운영 효율성을 극대화하여 전력 소모를 획기적으로 절감하고 통신 사업자의 운영 비용(OPEX)을 50% 이상 줄일 수 있는 가능성을 확인하였으며 향후 6G 지능형 물리 계층 설계의 새로운 패러다임을 제시하며, 지속 가능한 디지털 사회 및 지능형 안전망 구축을 위한 핵심 기술로 활용될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 결과물은 교육부와 경기도의 재원으로 지원을 받아 수행된 경기 지역혁신중심 대학지원사업 (경기 RISE 사업)의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] Chen, Jiechen, Nicolas Skatchkovsky, and Osvaldo Simeone. "Neuromorphic integrated sensing and communications." *IEEE Wireless Communications Letters* 12.3 (2022): 476-480.