

디지털트윈 동기화를 위한 다중경로 채널 환경에서 기계학습 기반의 FTN 송신신호 수신 및 검출 기술 설계

백명선^{1,2}

¹ 한국전자통신연구원, ² 과학기술연합대학원대학교

sabman@etri.re.kr

Design of Machine Learning-based Signal Detection Technique for FTN Signaling-based Digital Twin Synchronization in Multipath Fading Channel

Myung-Sun Baek^{1,2}

¹ETRI, ²UST

요약

본 논문에서는 디지털트윈 플랫폼에서 현실세계와 디지털 세계와의 동기화를 위한 신호 송수신 시스템의 고속 신호처리를 위한 비직교 송신신호의 검출 기술을 제안한다. 제안된 기술은 FTN 기반의 비직교 송신신호를 고려한다. FTN 송신신호는 송신 펄스간 중첩으로 인해 심볼간 간섭이 필연적으로 발생한다. 또한 전송 초기 보유하고 있는 간섭 이외에 신호를 전송하면서 발생하는 다중경로 채널 또한 심볼간 간섭을 발생시키게 된다. 이러한 FTN 기반의 디지털 트윈 동기화 신호의 검출을 위해 본 논문에서는 기계학습 기반의 신호 검출 기법을 설계하였다. 설계된 기법은 RNN 기반의 LSTM 방식을 사용하여 신호를 수신하고 송신신호를 검출하는 것이 가능하다. 또한 다중경로 채널 환경에서 수신된 FTN 신호를 기존의 BCJR 간섭제거 기법보다 우수한 성능으로 검출할 수 있다.

I. 서론

디지털트윈 기술은 현실세계의 객체, 프로세스 등을 디지털로 복제하고, 해당 디지털 객체를 활용하여 다양한 모의실험을 수행하므로 저렴한 비용으로 현실세계의 문제를 해결하거나 현실세계 환경을 최적화할 수 있는 기술이다. 현실 세계의 변화를 디지털 세계에 빠르게 적용하기 위해서 물리객체와 디지털객체 사이의 고속/고신뢰 동기화는 매우 중요하다. 본 논문에서는 상기 디지털트윈의 고속 동기화를 위해 FTN 기반의 비직교 송수신 기술을 고려하였다. FTN 방식은 Nyquist 전송 주기보다 더 빠르게 신호를 전송하여 동일 대역폭에서 Nyquist 전송 방식 보다 더 높은 전송 효율을 가지는 전송방식이므로 고속 신호 전송에 적합한 기술이다. 그러나 Nyquist 전송 주기보다 빠른 전송률은 심볼간 중첩에 의한 간섭을 유발한다. 수신단에서 심볼간 간섭을 정밀하게 제거하지 못하는 경우, 시스템 성능의 저하로 이어지게 되어, 동기화 시스템의 신뢰도를 크게 저하하게 된다. 따라서 정확한 간섭제거는 FTN 기반의 디지털 트윈 동기화 시스템에서 반드시 필요한 요소기술이다.

이와 더불어 디지털 트윈의 전송된 동기화 신호가 다중경로 채널을 통과하여 수신되는 경우, 다중경로에 의한 앞뒤 심볼 간의 간섭이 발생하게 된다.

FTN 시그널링으로 인한 심볼간 간섭이 존재하는 환경에서 다중경로 채널을 통과하는 경우, 심볼간 간섭이 추가적으로 부가되므로 전송신호의 정확한 검출이 매우 어렵게 된다.

본 논문에서는 FTN 신호를 위한 딥러닝 기반의 신호 검출 기술을 제안한다. 제안된 기술은 RNN의 한 종류인 LSTM을 활용하여 FTN 시그널링을 통해 전송된 신호를 검출한다. FTN 시그널링을 기반으로 펄스형성된 신호가 다중경로 채널을 통과하여 수신되면, 제안된 기술은 추가적인 처리 없이 단일 LSTM 기반의 검출기만으로 다중경로채널의 영향과 FTN 시그널링의 간섭영향을 제거하고 송신 신호를 검출할 수 있다. 모의실험결과에 따라 제안된 기술은 기존 FDE(Frequency Domain Equalization)기반의 BCJR 검출기보다 우수한 성능을 제공할 수 있다.

II. FTN 기반의 긴급신호 모델링

디지털트윈의 물리객체와 디지털객체간 동기화를 위한 신호 전달을 위해 아래와 같은 FTN 시그널링을 사용한 동기화 신호가 고려된다.

$$s(t) = \sum_k a_k g(t - kT) \quad (1)$$

이때 $\{a_n\}$ 는 데이터 심볼열, $g(t)$ 는 대역폭 $W = \frac{1}{2T}$ 을 가지는 송신펄스이다. 또한 τ 는 FTN 변수로 0 과 1 사이의 값을 갖는다 ($0 \leq \tau \leq 1$). 수식 (1)과 같이 생성된 신호는 송신펄스의 나이퀴스트율인 $1/T$ 보다 $1/\tau$ 배 빠른 $1/\tau T$ 의 전송률로 심볼을 전송하여 주파수 효율이 높아지지만, 이 과정에서 심볼간 중첩에 의해 송신 신호에서부터 ISI가 발생한다. 상기 전송된 긴급신호의 수신신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n\tau T) = \sum_k a_k x((n-k)\tau T) + w(n\tau T) \quad (2)$$

위의 식에서 $x(t) = g(t) * g(-t)$ 이다.

다중경로 채널을 통과한 경우의 수신신호는 채널 변화가 추가되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n\tau T) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_n h_l \cdot a_k \cdot x((n-k)\tau T) + w(n\tau T) \quad (3)$$

위의 식에서 h_l 은 l 번째 채널 계수를 나타내며 L 은 채널의 길이를 의미한다. 따라서 L 개의 경로를 갖는 채널변수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{h} = [h_0 h_1 \dots h_{L-1}] \quad (4)$$

III. 기계학습 기반의 FTN 신호 검출 기술

제안된 기술은 다중경로채널을 고려한 FTN 신호를 검출하기 위해 RNN 기반의 LSTM 구조를 고려하였다. FTN 펄스성형을 통해 변조된 신호가 다중경로 채널을 통과하여 수학적 3 과 같은 형태로 수신된다. 이후 수신단에서는 1 개의 심볼을 검출하기 위해 타겟심볼의 앞뒤 심볼 M 개와 타겟심볼을 동시에 추출한다. 이 경우 추출된 심볼은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_{TAR} = [y_{TAR-M}, y_{TAR-M-1}, \dots, y_{TAR}, \dots, y_{TAR+M}] \quad (5)$$

위의 식에서 y_{TAR} 은 검출하고자 하는 타겟심볼이다. 하나의 심볼을 검출하기 위해 간섭이 되는 심볼들을 한꺼번에 고려하여 LSTM 기반의 검출기에 입력한다. LSTM 검출기에서는 상기 입력된 각 심볼은 PSK 또는 QAM 심볼이므로 $a + bi$ 와 같은 복소수로 구성되어 있다. 검출기에서는 상기 복소수를 실수부와 허수부로 나누어 모두 실수 처리하여 LSTM에 입력한다. LSTM 검출기에서는 수학적 5 와 같은 $2M+1$ 개의 입력신호를 처리하여 1 개의 타겟심볼을 검출할 수 있다. 그림 1은 제안된 LSTM 기반 FTN 신호 검출기 개념도를 나타낸다. 그림에서와 같이 입력된 $2M+1$ 개의 신호는 실수부와 허수부가 나누어진 후에 모두 실수 처리되어 LSTM 기에 입력된다 LSTM 연산을 거친 후 Fully Connected Layer를 통과하여 최종적으로 신호를 특정할 수 있는 Softmax Layer를 거쳐 신호를 검출하게 된다. 제안된 구조를 활용하여 FTN 신호를 검출하게 되면, 다중경로환경에서 채널 등화등의 추가적인 절차없이 FTN 신호를 검출하는 것이 가능하다.

IV. 모의 실험 및 결론

모의실험을 위해 3 개의 패스를 갖는 Equal power Rayleigh 채널환경이 고려되었다. 다음은 모의실험 파라미터를 보여준다.

- $\tau = 0.7, M = 7, L = 3$

- 훈련용 신호의 SNR = 9dB: SNR = 9dB의 FTN 수신신호를 활용하여 학습

성능 비교를 위해 $M=7$ 과 동일한 입력신호를 고려하는 7 탭의 BCJR 간섭제거기가 고려되었으며 다중경로 채널 등화를 위해 FDE가 사용되었다. 따라서 주파수축에서 채널 등화를 수행하고 BCJR로 간섭을 제거하는 기존의 기술을 성능 비교를 위해 고려하였다. FDE의 경우 완벽한 채널정보를 이용하여 등화하는 방식과 MMSE (Minimum Mean Square Error) 채널추정을 통해 추정된 채널정보를 이용하여 등화하는 방식 모두를 고려하였다. 그림 2는 제안된 기술과 기존의 FDE-BCJR 기술과의 성능 비교를 보여준다. 그림에서와 같이 제안된 기술의 성능이 기존의 성능보다 우수한 것을 확인할 수 있다. 특히 실제 통신시스템을 고려한 MMSE 채널추정 FDE-BCJR보다 전구간에서 2dB 이상 우수한 성능을 도출하는 것을 확인할 수 있다. 제안된 기술은 추가적인 채널 추정 및 등화기 없이 채널등화와 간섭제거를 동시에 수행하는 것이 가능하므로 매우 간단한 구조로 다중경로 채널환경에서의 FTN 신호를 수신/검출할 수 있다.

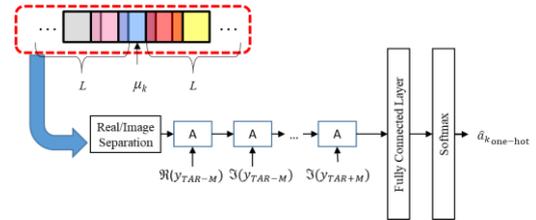


그림 1. LSTM 기반의 신호 검출기 구조도

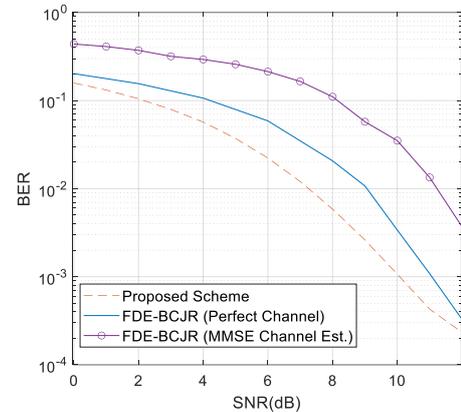


Fig. 2. 제안된 RNN 기반의 간섭제거 기법과 기존의 FDE-BCJR 기법과의 성능 비교

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 100% 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022-0-00545, (2 세부) 지능형 디지털 트윈 연합 객체 구성 및 데이터 프로세싱 기술 개발)

참고 문헌

[1] M. -S. Baek, W. Park and Y. -T. Lee, "Deep Learning-based Signal Detection Technique for FTN Signaling-based Emergency Alert Communication System," 2021 IEEE BMSB, 2021, pp. 1-3, Aug. 2021.

[2] 백명선 외, "RNN/CNN을 활용한 FTN 기반의 긴급신호 간섭제거 및 복조 기술 설계 및 성능 분석," 한국통신학회 동계학술대회, 2022. 01.