다중경로 채널 환경에서 디지털트윈 고속 동기화를 위한 Bi-LSTM 기반의 FTN 신호 검출 기술 설계

백명선 [1, 2], 박영수 [1], 정의석 [1], 이용태 [1, 2]

[1] 한국전자통신연구원, [2] 과학기술연합대학원대학교

{sabman, yspark, esjung, ytlee}@etri.re.kr

Design of Bi-LSTM-based FTN Signal Detection Technique for High-Speed Digital Twin Synchronization in Multipath Fading Channel

Myung-Sun Baek[1, 2], Young-Soo Park [1], Eui-Suk Jung[1], Yong-Tae Lee[1, 2]
[1]ETRI, [2]UST

요 약

디지털 트윈 플랫폼에서 현실세계와 가상세계를 연결하고, 현실세계의 변화된 정보를 가상세계에 전달하는 동기화 시스템의 고속화는 실시간 데이터 송수신을 위해 매우중요하다. 본 논문에서는 디지털트윈 플랫폼의 고속 동기화 시스템 구현을 위해 비직교 신호전송 기법인 FTN 시그널링을 고려한다. FTN 시그널링은 신호의 직교성을 보장하는 Nyquist 율보다 빠른 속도로 신호를 전송하여, 고속의 신호전송율을 달성할 수 있는 기술이다. 그러나 Nyquist 율보다 빠른 전송율로 인해, 신호간인 ISI 가 필연적으로 발생하게 된다. 이러한 간섭이 존재하는 FTN 기반의 동기화 신호가 다중경로를 통과하여 수신된다면, FTN 기반의 간섭과 함께 다중경로 채널의 간섭이 추가되어 신호를 검출하기 위해 복잡한 연산이 요구된다. 본 논문에서는 다중경로 채널 환경에서 수신된 FTN 기반의 디지털트윈 동기화 신호를 검출하기 위해 Bi-LSTM 기반의 신호 검출기를 설계하였다. 제안된 기술은 기존 주파수동기화 기반의 BCJR 기법보다 우수한 성능을 달성할 수 있다.

Ⅰ. 서 론

디지털트윈은 현실세계의 객체를 디지털도메인으로 모사하여, 디지털 도메인에서 다양한 모의실험을 통해 현실세계의 문제점을 해결하거나, 현실세계의 시스템을 저비용으로 최적화 할 수 있는 디지털 플랫폼이다. 현실세계의 객체들에 대한 변화를 실시간으로 변영하여, 모의실험을 진행하기 위해서는 현실객체와 디지털 객체 사이의 고속 동기화 기술이 필요하다.

본 논문에서는 디지털트윈 플랫폼의 동기화 시스템에서 고속의 동기화 신호 송수신을 위해 FTN (Faster-Than Nyquist) 시그널링을 고려한다. 기존의 신호 송수신 시스템은 Nyquist 율을 적용하여 신호를 성형하고 전송한다. Nyquist 율은 주어진 대역폭 내에서 최대한 많은 정보량을 보낼수 있는 신호 송신율이다. FTN 시그널링은 상기 Nyquist 율보다 빠른 신호 전송율을 전송신호에 적용한다. 따라서 FTN 시그널링을 사용하게 되면 효과적으로 신호의 전송율을 높이는 것이 가능하다. 그러나 Nyquist 율보다 빠른 전송율은 심볼간의 중첩을 발생시킨다. 심볼간 중첩은 최종적으로 심볼간 간섭인 ISI (Inter-Symbol-Interference)를 발생시켜, 최종적으로 시스템의 성능이 저하된다. 따라서 FTN 시그널링이 적용된 통신시스템의 수신기에서는 간섭제거 및 신호검출 절차가 반드시 필요하다. 또한 상기 FTN 시그널링이 적용된 신호가 다중경로 채널을 통과하여 수신되는 경우, FTN 시그널링에 의한 ISI 와 다중경로 채널에 의한 간섭이 더해진다. 수신기에서는 상기 다중경로 채널에 의한 간섭제거 (채널등화) 및 FTN 시그널링에 의한 간섭제거를 수행해야 하므로 수신기의 복잡도가 크게 증가하게 된다 [1].

본 논문에서는 다중경로 채널환경에서 수신된 FTN 신호의 검출을 위해 Bi-LSTM 을 활용한 수신기를 설계하고 성능을 검증하였다. Bi-LSTM 기반의 간섭제거기는 은 정방향/역방향 LSTM 모델로 구성되어 있어, 양방향의 간섭을 효과적으로 제거하는 것이 가능하다.

Ⅱ. FTN 기반의 디지털 트윈 동기화 신호

디지털트윈 플랫폼의 동기화 시스템운영을 위한 FTN 기반의 동기화 신호는 다음 수학식과 같다.

$$k(t) = \sum_{I} s_i y(t - i\tau T) \quad (1)$$

상기 수학식에서 $y(t)$ 는 송신 펄스이며, 해당 펄스의 대역폭은 $W = \frac{1}{2T}$ 이다. 또한 s_i 는 M-ary 변조방식을 사용하는 전송신호이고, τ 는 FTN 변수를 나타낸다 ($0 \leq$

$\tau \leq 1$). 수식 (1)과 같이 생성된 신호는 송신펄스의 나이퀴스트 율인 $1/T$ 보다 $1/\tau$ 배 빠른 $1/\tau T$ 의 전송률로 심볼을 전송하여 주파수 효율이 높아지지만, 이 과정에서 심볼간 중첩에 의해 송신 신호에서부터 ISI 가 발생한다. 도 1 은 FTN 시그널링 적용에 기반한 간섭 발생 신호를 보여준다. 그림에서와 같이 검출하고자 하는 신호의 전후 신호들이 양방향 간섭으로 작용하는 것을 볼 수 있다. 상기 수학식 1 의 전송 신호는 다중경로 채널을 통과하여 아래 수학식과 같이 수신된다.

$$r(n\tau T) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{i} h_l \cdot s_i f((n-i)\tau T) + w(n\tau T) \quad (2)$$

위의 식에서 $f(t) = y(t) * y(-t)^*$ 이다. h_l 은 다중경로 채널의 l 번째 채널 계수이고 채널의 전체 길이는 L 이다.

Ⅲ. FTN 을 활용한 동기화 신호 검출을 위한 Bi-LSTM 신호 검출기

본 절에서는 상기 수학식 (2)를 통해 수신된 신호의 다중경로채널 및 FTN 간섭을 제거하고 전송 심볼을 검출하는 기술이 설명된다. FTN 시그널링에 의한 타겟 심볼 전후에 해당하는 양방향 간섭 및 다중경로 채널에 의한 간섭을 효과적으로 처리하기 위하여, 제안된 기술은 하나의 타겟심볼 검출을 위해 다수개의 타겟심볼 전후 신호를 입력으로 고려한다. 본 논문에서는 하나의 타겟심볼 검출을 위해 아래의 수학식과 같이 $2N+1$ 개의 수신신호가 입력값으로 고려된다.

$$\mathbf{r}_i = [r_{i-N}, r_{i-N-1}, \cdots r_i, \cdots r_{i+N}] \quad (3)$$

상기 식에서 $\mathbf{r}_i$는 i 번째 전송신호인 s_i를 검출하기 위해 입력되는 $2N+1$ 길이의 심볼벡터 이다. 상기 수학식 (3)과 같이 검출하고자 하는 i 번째 수신신호의 전후 신호를 각각 N 개씩 고려하여 신호를 검출한다. 제안된 방식은 그림 2 와 같이 Bi-LSTM 구조를 기반으로 구축되며 상기심볼벡터 $\mathbf{r}_i$ 입력받아 s_i를 검출하게 된다. 그림에서와 같이 제안된 검출기는 Forward LSTM 모델과 Backward LSTM 모델로 구성된다. 그림 2 의 하단부인 정방향의 Forward LSTM 모델은 타겟 신호의 정방향 간섭을 고려하여 신호를 검출하는 것이 가능하다. 또한 그림 2 의 상단부인 역방향의 Backward LSTM 모델은 타겟신호의 역방향 간섭으로 고려하여 신호를 검출하는 것이 가능하다. 그림 2 의 첫번째 블록인 'Data Transform and Arrangement'는 실수처리에 적합한 Bi-LSTM 의 입력값 성형을 위해 복소수 형태의 수신 심볼을 실수부와 허수부로 나누고 입력벡터 형태로 정렬한다. 그림에서 $\Re(r_i)$ 과 $\Im(r_i)$ 는 수신신호 r_i 의 실수부와 허수부를 추출하는 함수를 나타낸다. Backward LSTM 모델와 Forward LSTM 모델의 출력값은 통합되어 최종적으로 신호를 검출하는 레이어로 입력된다. 그림 마지막 단의 FC Layer 는 활성함수가 없는 Fully Connected 레이어 이며, Softmax 레이어를 통해 최종적으로 전송된 심볼을 추론하게 된다.

Ⅳ. 성능 검증 및 결론

제안된 기술의 성능을 검증하기 위해 3 개의 패스를 갖는 Equal power Rayleigh 채널환경이 고려되었다. 다음은 모의실험 파라미터를 보여준다.

- $\tau = 0.7,\ N = 7,\ L = 3$
- 훈련용 신호의 SNR = 9dB: SNR = 9dB 의 FTN 수신신호를 활용하여 학습

성능 비교를 위해 N=7 과 동일한 입력신호를 고려하는 FDE (Frequency Domain Equalizer)를 활용하는 7 탭의 BCJR 간섭제거기가 고려되었다. FDE 의 경우 완벽한 채널정보를 이용하여 등화하는 방식과 MMSE (Minimum Mean Square Error)채널추정을 통해 추정된 채널정보를 이용하여 등화하는 방식 모두를 고려하였다. 또한 단방향 LSTM 만을 활용한 검출기술도 성능 비교를 위해 고려되었다 [1]. 그림 3 은 제안된 기술과 기존 기술과의 성능 비교를 보여준다. 그림에서와 같이 제안된 Bi-LSTM 기반의 신호 검출기의 성능이 기존의 BCJR 및 단방향 LSTM 검출기의 성능보다 우수한 것을 확인할 수 있다. 제안된 채널추정/등화/간섭제거 등의 추가적인 신호처리 없이 Bi-LSTM 구조만으로 다중경로 채널을 통해 수신된 FTN 신호의 간섭제거 및 신호 검출을 수행할 수 있다.

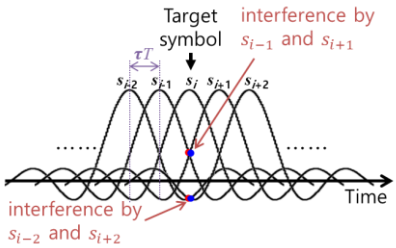

Fig. 1.FTN 시그널링에 의해 ISI 가 발생한 동기화 신호 모델링

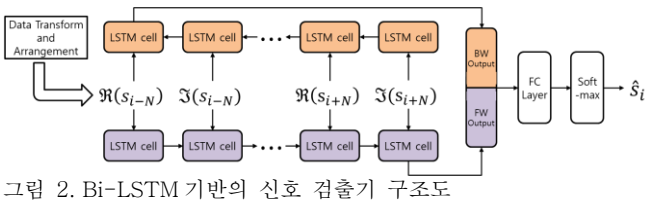

그림 2. Bi-LSTM 기반의 신호 검출기 구조도

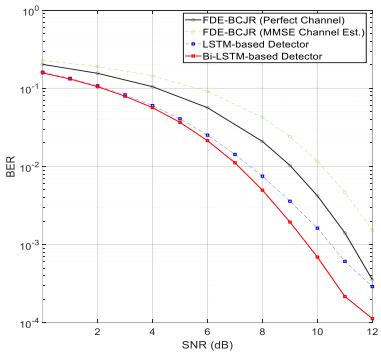

Fig. 2. 제안된 RNN 기반의 간섭제거 기법과 기존의 FDE-BCJR 기법과의 성능 비교

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023 년도 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)

참 고 문 헌

[1] 백명선, "디지털트윈 동기화를 위한 다중경로 채널 환경에서 기계학습 기반의 FTN 송신신호 수신 및 검출 기술 설계," 한국인공지능학술대회, 2022. 09.