

시공간 선 부호 송수신 구현을 위한 소프트웨어 모뎀 기반 시분할 이중 통신 되먹임 채널 설계

유제안¹, 김상은¹, 정진곤², *김주엽¹

¹숙명여자대학교; ²중앙대학교 전자전기공학부

e-mail : ¹ { dbwpdls22; kse8974; jykim }@sookmyung.ac.kr

² jgjoung@cau.ac.kr

Software Modem-Based Design of Time-Division Duplexing Feedback Channel for Space-Time Line Code Transceiver

Jein Yoo¹, Sangeun Kim¹, Jingon Joung², and *Juyeop Kim¹

¹Sookmyung Women's University; ²Chung-Ang University

Abstract

This paper was initiated to lay the foundation before the implementation of space-time line coded-orthogonal frequency-division multiplexing (STLC-OFDM) system based on software modem. Therefore, in this paper, we present the frame structure of the software modem-based STLC-OFDM system and the radio frequency state handler algorithm for time-division duplexing. Finally, we present the applicability of the STLC-OFDM system in the future by experimentally showing the similarity of channel environment at the uplink and downlink using synchronization algorithms.

I. 서론

2019년부터 상용화된 5세대 (5G) 기술은 점차 많은 사람들이 5G 서비스를 이용함에 따라 대중화된 기술로써 자리잡고 있다. 이런 가운데, 학계에서는 6세대 (6G) 이동통신에서 필요로 하는 변복조 기술에 대한 연구를 시작하고 있으며, 그 후보 기술 중 한가지로 시공간 선 부호 (STLC: space-time line

code) 기술이 고려되고 있다 [1-4]. STLC는 송신단에서 채널 정보(CSI: channel state information)를 인지한 상태에서 송신 처리를 하는 기법으로, 수신단에서 채널 정보를 추정할 필요가 없어 수신기를 저복잡도로 구현할 수 있다는 장점이 존재한다. 이런 특성으로 인해 STLC 기법은 대단위 송수신 안테나 (massive MIMO: massive multiple-input multiple-output) 시스템에서 송신 안테나 수 증가에 따른 pilot overhead나 수신 계산 복잡도의 심각한 증가를 억제할 수 있는 장점을 갖는다.

한편, STLC 기법을 실시간 시스템으로 구현하기 위해, 상향링크(UL: uplink)와 하향링크(DL: downlink) 신호를 직교 시간에 송수신 하는 시분할 이중 통신 (TDD: time-division duplexing) 방식을 사용해야 한다. 즉, 송신단이 수신단에게 데이터를 보내는 채널인 DL와 수신단에서 송신단으로 채널 추정을 위한 신호를 보내는 채널인 UL를 동일 주파수 대역에서 시간에 따라 구분하는 형태로 통신해야 한다. 이는 TDD 방식 통신에 있어 UL 채널과 DL 채널이 대칭적으로 동일하다는 성질이 있기 때문이다. 이때, TDD 방식 신호 송수신을 실현하기 위해서는 두 채널 사이 간섭 방지가 필요하고, 이는 정확한 시간 동기화가 요구된다. 또한, 구현 관점에서 radio frequen-

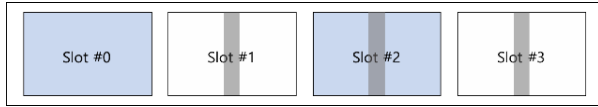


그림 1. 본 연구에서 고려한 프레임 구조.



그림 2. 본 연구에서 설계한 슬롯 (slot) 배열 구조.

cy (RF) 단에 송수신 전환이 적시에 잘 이루어지도록 하는 정밀한 제어 기법 또한 수반되어야 한다.

본 논문에서는 STLC 송수신에서 채널 추정을 위해 필요로 하는 되먹임 (feedback) 채널을 위해 TDD 방식으로 송수신단 간 신호를 주고받을 수 있는 physical channel을 설계하도록 한다. Physical signal을 송수신하기 위한 프레임 구조 및 송수신단 각각의 RF procedure를 설계하고, 양 측에서의 신호 동기화를 위한 알고리즘을 제시한다. 또한, 동기화 목적을 위해 사용하는 프리앰블 신호를 활용하여 UL/DL 채널을 추정하고, 본 연구에서 설계한 프레임 구조 및 RF procedure 통해 UL 채널과 DL 채널의 대칭성 (channel reciprocity)에 대해 관찰하고자 한다.

II. 본론

Software modem 기반 STLC-OFDM 구현을 위한 software 구조는 virtual receiver (VRX), virtual transmitter (VTX), virtual RF, layer 1 protocol로 구성되어 있으며, 총 4개 thread가 동시에 작동하도록 multithreaded 프로그래밍을 적용하였다 [5]. 송신 측에서는 quadrature phase-shift keying (QPSK) 변조 방식을 가정하였으며, fast Fourier transform (FFT) 크기로 1024를 적용하였다. RF 중심 주파수는 3.3 GHz로, 대역폭은 10 MHz로, 샘플링 속도는 15.36 MHz로 가정하여 STLC-OFDM을 구현하였으며, 단일 송신 안테나와 두 수신 안테나를 쓴 1x2 시스템을 설계하였다.

2.1 프레임 구조 설계

그림 1은 single-input multiple-output (SIMO) STLC-OFDM 프레임 구조이다. VTX가 CSI를 알 수 있도록 두 슬롯 slot #1과 slot #3을 UL로 사용하고,

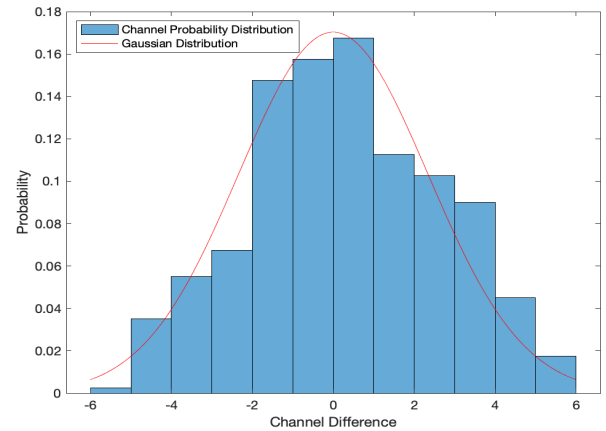


그림 3. UL 채널 각도와 DL 채널 각도 사이 오차 분포.

두 슬롯 slot #0과 slot #2는 2x1 multiple-input single-output (MISO) space-time block code(STBC)-OFDM 시스템과 동일하게 DL로 정의하였다. 이때, 프리앰블은 UL과 DL의 동기 획득을 위한 심볼을 slot #1, #2, #3에 여섯째 심볼에 두었다.

2.2 RF state handler 설계

그림 2의 A구간은 송신과 수신 사이 하드웨어 상태를 전환하는데 필요한 시간으로, 자기 간섭 (self interference)를 방지하기 위해 필수적이다. 따라서 모든 slot에서 A 구간 동안은 아무런 동작도 수행하지 않는다. 이어서 B 구간에서는 송신단이 보낸 데이터를 읽어온다. 이 때, 읽어온 데이터가 되먹임 데이터, 즉, VRX에서 VTX로 보낸 UL 데이터였다면, 수신한 파일럿에 대한 채널추정을 C 구간 동안 수행하고, 추정된 채널로 STLC 인코딩을 포함한 변조를 수행 후 DL로 전송한다. 반면, B 구간에서 읽어온 데이터가 DL 데이터였다면, 해당 슬롯에서 디코딩만 필요하므로, 시간 축 상 고려가 필요 없이 A 구간을 제외한 B, C 구간 동안 데이터를 읽어온 후 복조를 수행한다.

UL 상황에서 수신한 데이터를 기반으로 추정된 채널 값이 유효하기 위해서는 다음 slot을 전송하기까지의 시간인 C 구간이 채널 상관시간(coherence time)보다 짧아야 한다. 즉, C의 길이가 짧아질수록 통신 성능이 향상된다는 것이다. 따라서 한 슬롯을 구성할 때, C 구간이 최소가 되도록 설계하는 것이 중요하다.

2.3 프리앰블 삽입 알고리즘

본 연구에서는 UL 프리앰블을 사용하여 송수신측 간의 동기를 맞춰주므로 <그림 1>과 같이 slot #1과 #3의 여섯째 심볼에 프리앰블 시퀀스를 삽입한다. 이때, 두 RX 안테나 중 오직 한 안테나에만 프리앰블을 삽입하여 두 안테나 프리앰블 시퀀스 사이에 간섭을 방지하는 방식을 사용하였으나, 이는 STLC 구현이 안정화되면, 각 RX 안테나마다 직교 시간에 송신되도록 설계된 프리앰블을 사용할 계획이다.

2.4 프리앰블 검출 알고리즘

VRX에서 동기화 이후, VTX 동기 시점 역시 정확하게 일치하는지 확인하기 위해 VTX 프리앰블 검출 알고리즘을 추가 구현하였다. 알고리즘은 VRX에서 프리앰블 검출과 동일하게, 수신한 데이터와 프리앰블 시퀀스를 시간 영역에서 상관도(correlation)가 최대인 시간으로 검출하고, VRX에서 삽입한 프리앰블의 위치와 일치하는가를 확인하여 검증하였다. 프리앰블 검출 연산은 높은 복잡도를 요구하기 때문에, 넓은 시간 구간에 상관도를 모두 계산하려고 할 경우, <그림 2>의 C 구간에 할당된 시간을 초과할 수 있다. 따라서 VTX 프리앰블 검출을 최소한의 범위로 국한하여 window 기반 검출을 구현하였으며, 이를 위해서는 VRX단에서의 정확한 동기화가 반드시 선행되어야만 한다.

III. 실험 결과 및 결론

UL와 DL의 CSI가 일치한다는 사실을 보이기 위해 VRX 수신 데이터와 VTX 수신 데이터를 인접한 시간 내에서 추출 후, 추정 채널과의 차이를 계산하여, <그림 3>과 같이 그 차이의 확률 분포를 확인하였다. 단말기에서 수신한 데이터는 slot #2를, 기지국에서 수신한 데이터는 slot #3을 사용하였으며 총 400개 데이터를 사용하였다. 이때, 채널은 프리앰블 시퀀스를 사용하여 추정하였다.

<그림 3> 결과를 분석해보면, UL와 DL 채널 각도가 매우 높은 확률로 일치함을 확인할 수 있었다. 이는 DL와 UL의 채널이 대부분 일치함을 의미한다. 즉, 인접한 시간 내 UL에서 추정한 CSI를 사용한다면, VTX에서 인코딩 과정을 수행하는 STLC에서도 우수한 성능을 보장할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

한편, 실험을 통해 얻은 확률 분포 결과와 이론적인

정규분포의 확률밀도함수(빨간 실선)를 비교해보면, 둘의 분포가 완벽히 일치하지는 않는다는 사실을 확인할 수 있다. 이에 대한 두가지 원인은 다음과 같다.

첫째는 데이터를 추출하는 방식이다. 통신 환경에서의 채널은 시간에 따라 변화하므로, 채널이 균일한 특성을 지니는 상관시간을 벗어나 DL와 UL 데이터를 추출한다면 분명한 채널의 차이가 존재하게 된다. 즉, DL와 UL의 데이터 추출이 상관시간 이내에 안정적으로 이루어질 수 있도록 추가적인 구현이 필요하다는 것이다.

둘째 원인은 안정적이지 못한 무선 통신 채널 때문이다. 무선 통신 채널은 매우 작은 내부 하드웨어 및 외부 환경 변화로부터 큰 영향을 받는다. 뿐만 아니라, 그 불안정성의 원인 역시 다양하여 문제의 원인을 완벽하게 제거하기는 불가능하다. 따라서 이러한 실험적 오류에 의한 확률을 최소화하기 위해서는 데이터 표본을 증가시켜야만 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021-0-00874, 시공간 선 부호 기반 차세대 무선 접속 기술 개발)

참고문헌

- [1] J. Joung, "Space-time line code", *IEEE Access*, vol.6, pp. 1023-1041, Nov. 2017.
- [2] J. Joung and B. C. Jung, "Machine learning based blind decoding for space-time line code (STLC) systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 5, pp. 5154-5158, May 2019.
- [3] J. Joung, J. Choi, and B. C. Jung "Double space-time line codes," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 2, pp. 2316-2321, Feb. 2020.
- [4] S.-C. Lim and J. Joung, "Transmit antenna selection for space-time line code systems," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 69, no.2, pp. 786-798, Feb. 2021.
- [5] 김지원, 이주희, 정서빈, 김주엽*, "Software defined radio 기반 MISO STBC OFDM 통신시스템 구현," *한국통신학회 하계 종합 학술 발표회*, 용평, 2020년 8월, pp. 516-517.