

이중 시간 주파수 선 부호 송수신 시스템 구현 및 성능 분석

여유진, 이송민, 김주엽

숙명여자대학교

unyeo32@sookmyung.ac.kr, lsm0723@sookmyung.ac.kr, jykim@sookmyung.ac.kr

Implementation and Performance Analysis of Double Space-Frequency Line Code System

Yujin Yeo, Songmin Lee, Juyeop Kim

Sookmyung Women's Univ.

요약

본 논문은 기존의 1x2x2 SFLC(Space-Frequency Line Code) 시스템에서 기지국 안테나 개수를 확장하여 MIMO 형태로 구현한 4x2x2 Double SFLC에 대한 테스트베드를 구성하여 실시간 실험을 한 후 그 성능을 검증하였다. OctoClock을 활용한 테스트베드로 송수신 시스템을 구축한 다음, 상하향링크 송수신 과정을 LLS를 통해 분석하였다. LLS는 동기화 및 채널 추정 안정성, 그리고 디코딩된 SFLC 심볼 정상도를 확인할 수 있도록 설계하였다.

I. 서론

시공간 선 부호화(STLC: Space-Time Line Code) 기법[1]은 수신 측에서 채널 상태 정보가 없어도 송신 측에서 채널 상태 정보가 있다면 간단한 선형 결합만으로 정보 심볼을 복원할 수 있는 차세대 무선 접속 기술이다. 해당 기법에서는 상향링크와 하향링크 간의 채널 대칭성을 가정하고 있으나, 실제 채널 환경에서는 복잡한 요인으로 인해 채널 비대칭성이 발생한다. 그에 따라, 반송파 주파수 오프셋 및 심볼 타이밍 오프셋을 기저대역 신호 처리 관점에서 추정 및 보상하여 STLC를 기반으로 한 1x2x2 다중 안테나 SFLC 시스템 상에서의 동작을 확인하는 연구[2]가 선행되었다. SFLC 시스템의 massive MIMO(Multiple Input Multiple Output) 실현 가능성을 확인하기 위해서는 다중 사용자 및 다중 안테나 환경을 조성할 필요가 있다.

본 논문에서는 기존 1x2x2 SFLC 시스템에서 기지국 측 안테나가 확장된 형태의 Double SFLC 시스템을 구현하고, 시스템 상에서의 상하향링크의 동작을 확인하도록 한다. USRP 기반 테스트베드와 Link-Level Simulator(LLS)를 통하여 채널과 수신 심볼의 정상도를 확인한다.

II. 본론

1. Double SFLC 테스트베드

기존의 1x2x2 SFLC 시스템은 1개의 기지국이 1개의 안테나를 통해, 그리고 2개의 단말이 각각 2개의 안테나를 통해 신호를 송수신하는 구조이다. 이때, 상향링크와 하향링크는 동일한 시간 영역에서 신호를 주고 받는 시분할 시공간 이중화 기반의 프레임 구조 상에서 동작하며, 상향링크와 하향링크는 1:1 비율의 간격으로 스위칭된다. 기존 SFLC 시스템에서 확장된 형태의 Double SFLC[3]는 기지국 측에서는 4개의 안테나를 사용하여 기존의 2개의 단말과 송수신하는 구조를 채택한다. 기지국은 각 안테나별로 수신한 신호를 바탕으로 SFLC 인코딩을, 단말은 각 안테나로부터 수신한 신호를 바탕으로 SFLC 디코딩을 하여 정보 심볼을 추정한다.

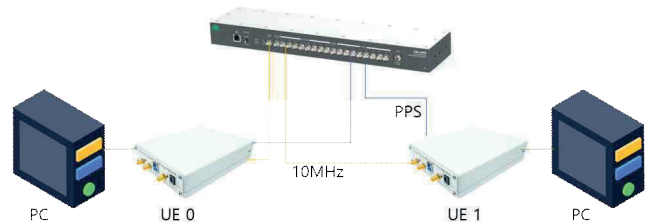


그림 1 OctoClock을 활용한 Double SFLC 테스트베드 구성
실제 시스템 상에서 기지국과 단말이 통신을 하는 상황을 구현하기 위해 그림 1과 같이 두 대의 USRP B210을 OctoClock에 연결하여 테스트베드를 마련하였다. 확장된 기지국 안테나 구성 시 USRP 간 타이밍 드리프트를 방지하기 위해 OctoClock을 사용하여 클락을 동기화하였고, PPS 단자를 이용하여 동일 타이밍에 펄스를 수신할 수 있도록 구성하였다. 두 대의 단말에 대해 기지국에서는 접속하고 동기화된 단말 순서대로 신호를 처리한다. 이때, 먼저 접속하여 동기를 잡은 단말에 대해서는 RF 하드웨어 보상을, 나머지 단말에 대해서는 소프트웨어 내 동기화 보상을 실행한다.

2. Double SFLC Link-Level Simulator

Double SFLC Link-Level Simulator는 다음과 같은 단계를 바탕으로 매트랩 프로그램 상에서 기저대역 신호를 처리하도록 작성하였다. 먼저 기지국에서는 4개의 송신 안테나를 이용하여 하향링크 프리앰블을 전송한다. 단말은 다운링크 신호를 수신한 후, 프리앰블을 검출한다. 그 후, 반송파 주파수 오프셋, 심볼 타이밍 오프셋 및 샘플링 클럭 오프셋에 대한 추정 및 보상을 진행한다. 보상을 마친 단말 측에서 sounding을 위한 상향링크 프리앰블과 DMRS(Demodulation Reference Signal)를 송신하면 기지국 측에서 프리앰블 검출을 통해 단말을 인식한다. 4x2x2 Double SFLC 시스템에서는 기지국이 4개의 안테나를 사용하기 때문에 각 안테

나에 대해 반송파 주파수 오프셋, 심볼 타이밍 오프셋, 샘플링 클락 오프셋을 처리하는 과정이 필요하다. 해당 보상과정을 통해 채널 대칭성을 회복하고 상향링크 DMRS를 바탕으로 채널 상태 정보를 획득한다. 기지국은 해당 채널 상태 정보를 바탕으로 Double SFLC 인코딩을 수행하고 단말은 수신한 신호로부터 Double SFLC 디코더를 통해 데이터 심볼을 얻을 수 있게 된다.

3. Double SFLC 성능 분석

앞서 기술한 USRP 테스트베드를 통해 얻은 기저대역 상하향링크 신호는 Double SFLC Link-Level Simulator를 이용해 분석하였다. 기지국 안테나 확장을 성공적으로 반영하여 시스템이 정상 동작하는지, 그리고 데이터 심볼을 성공적으로 디코딩하였는지 관찰하였다.

그림 2는 상하향링크 각각에서 수신한 프리앰블에 대한 채널 주파수 응답 위상에 대한 그래프이다. 위쪽의 그림은 하향링크 프리앰블, 아래쪽의 그림은 상향링크 프리앰블에 대해 구한 채널 주파수 응답 위상이다. 각 안테나에서의 채널 주파수 응답 위상의 변동성이 전반적으로 낮음을 통해 수신 안테나가 성공적으로 프리앰블을 탐지함을 알 수 있다. 또한, 상하향링크 간의 채널의 위상이 비교적 일정하게 유지되는 것을 통해 상하향링크에서 기지국과 단말 모두 동기화가 안정적으로 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 상향링크에서 DMRS를 바탕으로 구한 채널 주파수 응답 위상에 대한 그래프이다. 단말에서 채널 추정을 위해 송신한 DMRS를 기지국 안테나로 수신한 후 안테나별 적절한 보상 과정을 거쳐 추정한 채널로, 모든 기지국 안테나에서 채널의 위상이 0에 가까이 일정하게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이를 통해 기지국 안테나에서 수신한 신호에 대해 성공적으로 채널을 추정함을 확인하였다.

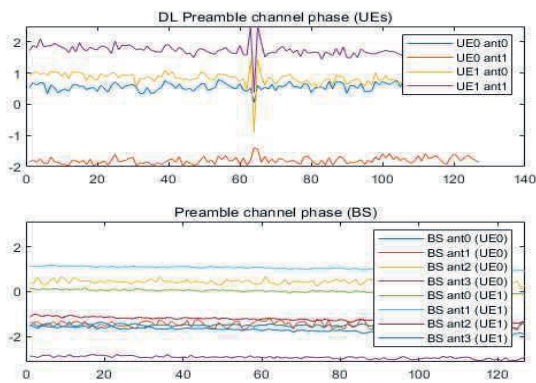


그림 2 상하향링크 프리앰블에 대한 채널 주파수 응답 위상

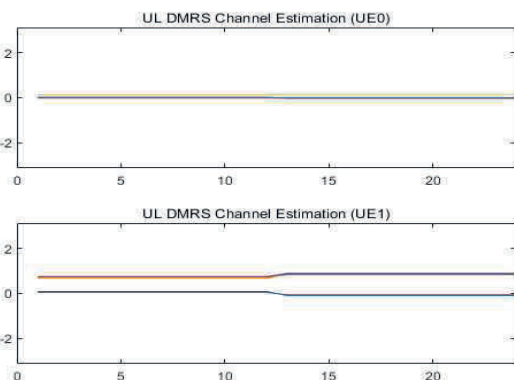


그림 3 상향링크 DMRS에 대한 채널 주파수 응답 위상

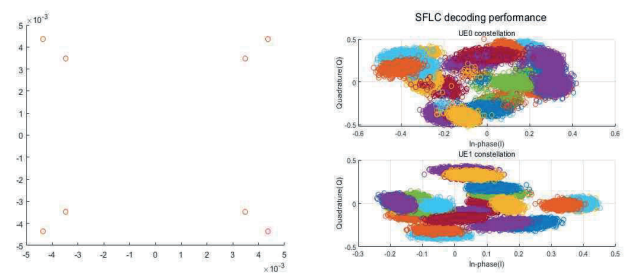


그림 4 하향링크 수신 SFLC 심볼 성상도

그림 4는 두 단말에서 4개의 기지국 안테나로부터 수신한 심볼을 디코딩한 결과를 성상도로 그린 그래프이다. 왼쪽은 시뮬레이션 상에서 상향링크 DMRS 채널을 사용하여 제작한 Double SFLC 신호를 바탕으로 하였고 오른쪽은 테스트베드 상에서 실제로 단말이 수신한 신호를 바탕으로 SFLC 디코딩을 하여 심볼을 도출하였다. 우선, 왼쪽 그림을 통해 디코더가 정상적으로 동작함을 확인할 수 있다. 따라서, 오른쪽 그림의 디코딩 심볼은 4개의 기지국 안테나 신호를 성공적으로 디코딩한 결과라고 볼 수 있으며, 성상도가 완벽하게 QPSK 모양대로 배치되지 않은 것은 다중 안테나에 의해 발생한 위상 오프셋에서 기인한 것으로 보인다. 이에 대해 적절한 보상 기법을 적용할 경우 디코딩 성능을 개선시킬 수 있을 것으로 보인다.

III. 결론

본 논문에서는 Double SFLC 송수신 시스템에 대한 테스트베드를 구축하여 실제 송수신 모델을 구현하고 Link-Level Simulator를 통해 성능을 살펴보았다. 상하향링크 송수신 과정에서 신호 간에 동기가 제대로 맞추어졌는지 그리고 안정적으로 채널이 추정되었는지 확인하였다. 그리고 Double SFLC 디코더에서 도출해낸 최종 디코딩 심볼을 성상도에서 분석하여 성공적으로 SFLC 디코딩을 완료함을 확인하였다. 향후 연구에서는 다중 안테나 환경에서 발생하는 위상 오프셋 보상을 통해 SFLC 디코딩 성능을 더욱 향상시키는 방안을 모색할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No.2021-0-00874, 시공간 선 부호 기반 차세대 무선 접속 기술 개발)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] J. Joung, "Space-time line code," IEEE Access, vol. 6, pp. 1023-1041, Feb. 2018.
- [2] Subin Kim, Han-Gyeol Lee, Song-Min Lee, Jaehong Kim, Juyeop Kim, and Jingon Joung, "CFO-STO-SCO Estimation and Compensation for Channel Reciprocity of Software Defined Modem-Based Space-Time Line Code Systems," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 47, no. 9, pp. 1381-1397, 2022.
- [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.