

Software-Defined Radio 기반 LTE OFDM 수신기 구현

김지원¹, 이주희¹, 정서빈¹, 김주엽

숙명여자대학교

jwkim17@sookmyung.ac.kr, keelya23@sookmyung.ac.kr, jsb9607@sookmyung.ac.kr,
jykim@sookmyung.ac.kr

Implementation for LTE OFDM Receiver Based on Software-Defined Radio

Ji Won Kim, Joo Hee Lee, Seo Bin Jeong and Juyeop Kim

Sookmyung Women's University

요 약

CPU가 비약적으로 발전함에 따라, 기존에 하드웨어로 구현되었던 기저대역 신호 처리 알고리즘을 소프트웨어로 프로그래밍화 하는 Software-Defined Radio (SDR) 기술이 활발히 연구되고 있다. 본 논문에서는 기존 LTE 시스템에서 이용되는 OFDM 알고리즘을 SDR 기반으로 실현한 수신기 구조를 제시하였다. 또한, 수신된 QPSK Data Symbol의 signal constellation 및 Symbol Error Rate (SER)을 통해 수신기의 성능을 확인하였다.

I. 서 론

최근 LTE를 넘어 5G 상용화가 진행되고 있고, 6G 또한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 이에 따라 새롭게 적용될 표준 기술에 대한 업그레이드가 지속적으로 필요한 가운데, 다중 표준의 유연한 지원이 가능한 SDR에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

SDR 기술의 핵심 개념은 기존 System on Chip (SoC)와 같은 하드웨어로 구현되어오던 기저대역 신호처리를 소프트웨어로 구현하는 것이다. 이 개념을 통해 단말의 송수신 기저대역 알고리즘의 보수와 수정을 유연하게 할 수 있고, 상위 layer 프로토콜과의 연동성 향상도 기대할 수 있다. 또한, programmable 한 특성을 가지는 SDR 기저대역 처리 system은 다른 통신 매체에도 쉽게 적응하여 기술의 이식을 용이하게 할 수 있는 장점이 있다.

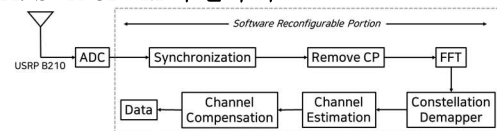
본 연구에서는 SDR 기반 OFDM 수신기의 architecture를 먼저 제시한 후, Synchronization, FFT 그리고 Channel Estimation & Compensation의 수신 알고리즘을 제시한다. 마지막으로, 수신 QPSK Data Symbol의 Constellation과 SER을 통해 구현한 SDR 기반 LTE OFDM 수신기의 성능을 확인한다.

II. 본 론

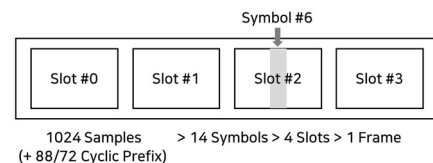
CPU의 computational performance 최적화를 위해 fixed-point representation으로 baseband symbol을 표현하였다. 또한 modulation 방식으로 QPSK를 가정하였으며, 1024-point radix 4 FFT 함수를 이용해서 OFDM symbol의 demodulation 처리를 하는 것을 가정하였다.

SDR 기반 전체 software 구조는 다음과 같다. Layer 1 protocol 역할을 하는 PHY protocol thread (PHY), 가상의 RF 역할을 하는 Virtual RF thread (VRF), 단말 역할의 Virtual RX thread (VRX) 그리고 기지국 역할의 Virtual TX thread (VTX), 총 4개의 thread를 정의하였으며, multi-thread programming을 통해 이 thread들이 지속적으로 동시에 동작하도록 구현하였다.

A. SDR OFDM 수신기 구조



<그림 1> SDR OFDM Receiver Structure



<그림 2> Frame Structure

$$\begin{aligned} \text{Time Offset} &= \text{CP0} + (\text{CP} + \text{FFTSize}) \times \text{SymbolNumber} \\ &= 88 + (72 + 1024) \times 6 \\ &= 6664 \end{aligned} \quad \text{----- (1)}$$

OFDM 수신기 구조는 LTE 표준에 맞게 <그림 1>과 같이 정의하였으며, 이 중에서 software reconfigurable portion에 대해 SDR 구현을 수행하였다.

¹ 공동 제1 저자로 동등하게 기여함

송수신에 사용된 frame 구조는 <그림 2>에 해당한다. 송신단에서 data symbol 은 IFFT 과정을 거쳐 time domain 의 OFDM symbol 형태로 전송된다. Preamble sequence 는 slot #2 의 symbol #6 에 존재한다고 가정하였으며, 이 때의 time offset 은 식 (1)에 따라 6664 이다.

B. 구현 알고리즘

VRX main thread 는 loop 마다 1 slot 에 대해서 synchronization 과 data demodulation 과정을 진행한다.

B-1. Synchronization

처음 USRP - VRF 를 통해 기저대역 신호가 수신되면, blind detection 을 통해 송신기와 수신기 간 동기를 맞춘다. 매 slot 마다 preamble sequence 와의 cross-correlation 을 실행하여 그 값이 최대가 되는 지점을 preamble 이 삽입된 symbol 로 간주하고 동기화를 진행한다. 그리고 이 때의 time offset 을 6664 로 알려주도록 time compensation 을 수행한다.

초기 동기화 후, 계산복잡도를 줄이기 위해 6664 부근의 지정 범위에서만 preamble detection 하는 cell tracking 을 수행한다. 또한 시간이 지남에 따라 흐르는 time offset 과 frequency offset 에 대해서는 그 차이만큼 보상해주는 drift compensation 을 수행한다.

B-2. FFT

수신된 OFDM symbol 을 FFT 한 결과는 각 subcarrier 에 곱해진 수신 data symbol 값에 해당된다. VRF 로부터 받은 1 slot 내 15360 개의 time sample 을 OFDM symbol 단위로 FFT 처리를 하여 data 복호를 한다. FFT 에 넣을 1024 개 input time sample 로부터 OFDM symbol 별로 구분되는 data symbol 을 얻기 위해, sample_offset 을 먼저 아래와 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \text{sample_offset} &= \text{CP0} + \text{CP}/2 + (\text{CP} + \text{FFTSize}) \times \\ &\quad \text{Symbol_Number} = 88 + 36 + (72 + 1024) \\ &\quad \times \text{Symbol_Number} \end{aligned} \quad (2)$$

(2)는 ISI 방지를 위해 (CP + IFFT 수신 결과인 1024 개의 time sample)의 중간 부분을 추출하여 FFT 에 input 으로 넣기 위한 sample_offset 을 계산하는 식이다.

각 sample_offset 에서 시작해, 1024 time sample 을 뽑아, FFT 에 넣어 1 slot 당 OFDM symbol 14 개에 해당하는 FFT 결과를 얻는다. FFT output 은 resource element 별로 구분해 buffer 에 저장한다.

B-3. Channel Estimation & Compensation

VRX, VTX 의 최초 configuration 시 각각 thread 에 Dmrs 수열을 생성하여 buffer 에 저장한다. Dmrs 의 resource allocation 은 각 slot 내 OFDM symbol 3, 10 에 연속적인 유효한 600 개의 subcarrier 에 gold sequence 를 할당하는 것으로 구현했다.

$$\begin{aligned} P_{rx,k} &= P_0 \cdot H_k \\ H_k &= P_0 \cdot P_{rx,k} / \|P_0\|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

- P_0 : VRX 와 VTX 간 약속된 dmrs Sequence
- $P_{rx,k}$: P_0 가 채널을 거쳐 수신된 OFDM symbol 3,10 의 subcarrier k 위치에 있는 sequence

(3)을 통해 data 의 channel H_k 을 estimation 할 수 있으며, OFDM 에서의 one tap equalization 을 subcarrier 별로 진행할 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_k &= X_k \cdot H_k \\ X_k &= Y_k \cdot H_k^* / \|H_k\|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

- X_k 는 한 subcarrier 에 대한 송신 QPSK data symbol
- Y_k 는 수신 QPSK data symbol

- H_k 는 data 가 거처온 channel

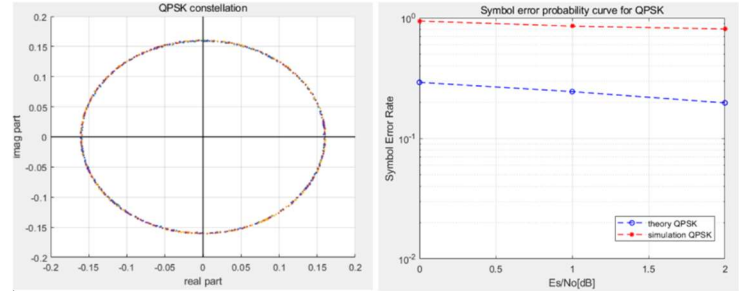
따라서 수신기에서 수신 Y_k 를 추정된 channel H_k 에 대해 (4)처럼 처리하여 X_k 를 얻어, 최종적으로 송신한 QPSK data symbol 을 복호할 수 있다.

(3)과 (4)의 complex conjugation 곱은 fixed point 로 구현 시엔, overflow 가 생기지 않도록 적절한 scaling factor (shift)를 포함해 구현했다.

III. 성능 분석 및 결론

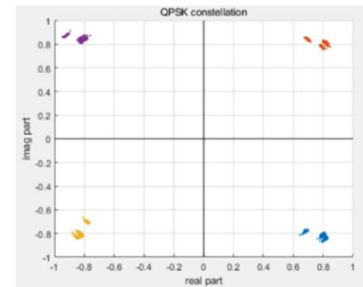
A. 수신 QPSK Data SER 및 Signal Constellation

본 실험에서는 송수신측 각각 USRP B210 을 이용하여 RF conduction 환경에서 측정하였으며, data symbol 1000 개 sample 로 성능을 확인하였다.



<그림 3> Channel Compensation 이전 Constellation(왼쪽), SER(오른쪽)

처음 수신한 data symbol 은 <그림 3>과 같이 Phase 가 틀어져서 수신되었고, channel compensation 과정을 수행하여 아래의 <그림 4>과 같이 송신한 원래의 data symbol 을 얻었다.



<그림 4> Channel Compensation 이후 Constellation

B. 결론

SDR 기반으로 programmable 하게 구현한 LTE OFDM 수신기를 이용해 QPSK data symbol 이 높은 정확도로 송수신되는 것을 확인하였다. 더 나아가 이 구현 성과를 이용해서 5G 표준 기반 Multiple Input Multiple Output(MIMO) System 에 대해서도 SDR 알고리즘을 적용하여 능동적인 기술 구현과 전체적인 성능 향상을 도모할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며 (2018R1C1B5045506) 2020 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2018-0-0072)

참 고 문 헌

- [1] H. Yeh and P. Ingerson, "Software-defined radio for OFDM transceivers," 2010 IEEE International Systems Conference, San Diego, CA, 2010, pp. 261-266