

# SDR 플랫폼을 통한 블라인드 등화기 구현

김형윤\*, 강인성\*  
안준일\*\*, 남해운\*

## Implementation of Blind Equalization Using SDR Platform

Hyeongyun Kim\*, Insung Kang\*  
Junil Ahn\*\*, Haewoon Nam\*

### 요 약

통신 채널을 효율적으로 활용하기 위한 방안으로 훈련신호 없이 채널을 추정하는 블라인드 등화기가 연구되어 왔다. 다양한 연구에서 높은 등화성능을 보이기 위한 알고리즘들과 계산량을 줄이기 위한 알고리즘들을 제시하며 이에 따른 이론적, 수치적 성능 분석은 보여주었으나, 실제적인 시스템에서 구현된 등화기를 거치는데 걸리는 시간 및 표본 개수에 따른 성능 비교를 보여주는 사례는 찾아보기가 어렵다. Software Defined Radio(SDR) 플랫폼을 통한 실제 시스템에서 등화기 성능을 분석하는 것은 블라인드 등화기를 사용하는 통신시스템 구현 시 큰 도움을 가져올 것이다. 따라서 본 논문에서는 GNU Radio와 Universal Software defined Radio Peripheral(USRP)를 이용해 등화기를 포함한 송수신기를 소프트웨어적으로 구현하여 등화기의 성능을 보여주하고자 한다.

**Key Words** : Software defined radio, GNU Radio, USRP, Blind equalization, CMA equalization, Fractionally spaced equalization

### ABSTRACT

Blind equalizers that estimate a channel without a

training signal have been studied as a way to efficiently utilize a communication channel. In various research, theoretical and numerical performance analysis of blind equalizers has been presented. However, It is difficult to find a comparison of the performance of the equalizers implemented in the practical communication system in terms of the time taken by the equalizer and the number of received samples. Analyzing the performance of the equalizer using the SDR platform will be able to present effective standards for implementing the communication system including the blind equalizer. Therefore, in this letter, we show the performance comparison of the equalizers by software implementation of blind equalizers utilizing GNU Radio and USRP

### I. 서 론

일반적으로 통신시스템에서 사용되는 채널 등화기는 다중경로를 통해 들어오는 신호 특성으로 인한 심볼간 간섭을 제거하기 위해서 사용된다. 이를 위해 송수신기 간에 약속된 훈련신호를 일정시간 간격으로 주고받아서 채널을 추정하고 심볼간 간섭 제거하는데 사용하게 된다. 이러한 주기적인 훈련신호 송수신은 실질적 데이터 전송률을 감소시키거나 추가적인 대역폭을 요구하게 된다. 이러한 이유로 통신채널을 효율적으로 활용하기 위해 훈련 신호를 사용하지 않고 채널을 추정하는 방식으로 블라인드 등화기가 연구되어 왔다. 블라인드 등화기는 현재 많은 연구를 통해 여러 가지 있으나, 대표적으로 Constant Modulus Algorithm(CMA) 등화기가 많이 사용되어 왔다<sup>[1]</sup>. 하지만, CMA 등화기는 PSK신호에 한정된 단점을 가지고 있어서, QAM신호 및 다양한 복조방식에 적용이 가능한 등화기로 Alphabet Matched Algorithm(AMA) 등화기, T-spaced Equalizer(TSE)<sup>[2]</sup>, Fractionally Spaced Equalizer(FSE)<sup>[3]</sup> 등이 고안되었다. 또한 이러한 등화기의 성능 및 계산 속도를 높이기 위한 알고리즘과 최적화 연구도 진행되어왔다. 하지만, 실제적인 시스템에 등화기를 구현하여 계산속

\* 본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음

• First Author : (ORCID:0000-0002-4473-5004) Dept. of Elec. and Comm. Eng., Hanyang University, nagne11@gmail.com, 학생회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-9847-7023) Dept. of Elec. and Comm. Eng., Hanyang University, hnam@hanyang.ac.kr, 정회원

\* (ORCID:0000-0003-0043-0599) Dept. of Elec. and Comm. Eng., Hanyang University, kangis@hanyang.ac.kr, 학생회원

\*\* (ORCID:0000-0003-3192-1315) Agency for Defense Development, jun@add.re.kr

논문번호 : 201904-039-LU-D, Received April 3, 2019; Revised August 21, 2019; Accepted August 21, 2019

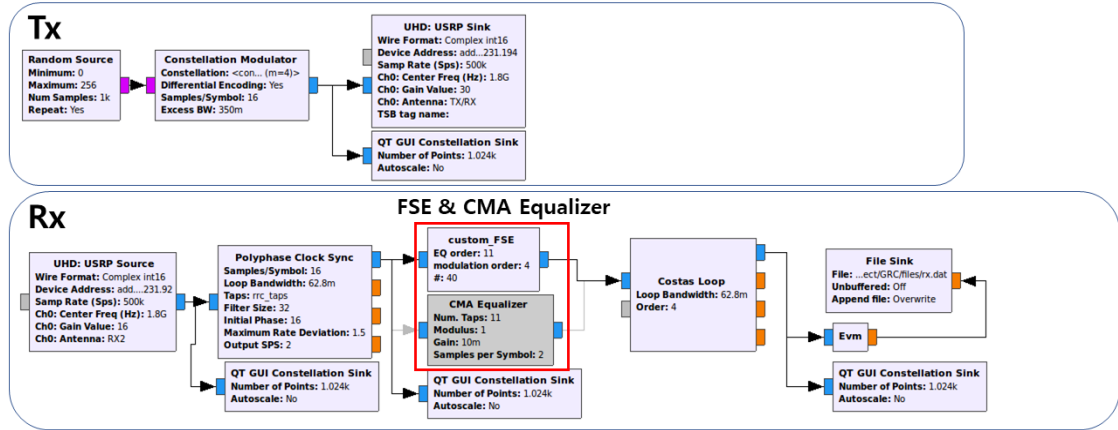


그림 1. GNU Radio를 이용해 구현한 블라인드 등화기를 블록을 포함한 송수신기의 플로우차트  
Fig. 1. Flow Chart of Transmitter and Receiver including blind equalizer in GNU Radio

도와 등화가 잘 이루어지기까지 표본의 개수를 비교한 연구는 찾아보기 어렵다. 시스템구현을 통한 성능 분석은 블라인드 등화기가 포함된 통신시스템 구현 시 등화기 선택에 있어 실제적인 도움을 제공할 수 있다. 이에 본 논문에서는 SDR 플랫폼을 활용하여 블라인드 등화기를 구현한 송수신기를 통한 등화기의 성능을 분석하고자 한다.

전송된 P개의 신호는 PSK의  $|d_m|=1$  인 특성을 이용해 식 (1)의 등화기를 통과한 신호  $y_k$ 가 크기가 1인 원 둘레에 가깝게 존재하도록 배치하게 한다.

$$y_k = \sum_{m=0}^N x_{k-m} \theta_m \quad (2)$$

이는  $J(\theta) = E[(|y_k|^2 - 1)^2]$  를 최소화하는  $\theta$ 를 찾는 문제로 귀결된다. 최적의  $\theta$ 는 stochastic gradient descent 방식으로 구하는 것이 가능하다. 하지만 최적의  $\theta$ 를 구하는데 있어 다른 블라인드 등화기에 비해 상대적으로 많은 샘플이 요구되어 짧은 시간에 버스트하게 신호를 등화하는데 어려움이 있다.

## II. 등화기 알고리즘 및 시스템 구현

### 2.1 CMA 등화기

PSK변조 신호의 정상도가 원 둘레에 심볼이 위치한다는 성질을 이용한 등화방식이다. 송신된 신호가 채널을 통과하여 수신된 신호는 다음과 같다.

$$x(t) = \sum_{m=0}^P d_m h(t-mT) + n(t) \quad (1)$$

### 2.2 TSE, FSE

QAM 변조방식의 경우 심볼 크기가 일정치 않아 PSK에 활용 가능한 블라인드를 동일하게 적용시키는 것이 적절치 않다. TSE는 등화기를 거친 심볼들의 정상도 한 번의 길이인  $Re\{y_k\}$ 를 최적화하는 방식으로 접근하게 되고 이는  $J(\theta) = E[(|y_k|^2 - 1)^2]$  를 최소화하는  $\theta$ 를 구하는 선형계획법 문제로 귀결된다. TSE에서는 신호를 T시간 간격으로 표본화하지만, FSE는 T 주기보다 작은 T/L간격으로 L배로 과표본화하게 된다[2]. 채널 통과된 수신 신호는 아래의 식(3)과 같으며, 이때  $T_L$ 은  $kT - (l-1)T/L$ 이다.

$$x(kT_L) = \sum_{m=1}^P d_m h((k-m)T_L) + n(kT_L) \quad (3)$$

표 1. 시스템 구성 및 실험환경  
Table 1. System Configuration and Environment

Host PC	CPU: Intel i5-3336U CPU 1.8GHz RAM: 8.00GB
USRP	NI-2920 Daughter Board: WBX v3
Linux Version	16. 04
GNU Radio Version	GNU Radio 3.7.12
Gurobi Version	Gurobi 7.5.2
FSE L값	4
Filter taps	11

TSE와 마찬가지로  $J(\theta) = E[(|y_k|^2 - 1)^2]$  를 최소화하는  $\theta$ 를 구하는 선형계획법 문제를 푸는 것으로 등화된 신호 샘플을 구하게 된다. FSE는 L배 과표본하는 것을 L개의 수신 안테나를 사용하는 다중 안테나 채널에 적용하는 것이 가능하다.

### 2.3 등화기 구현 및 실험 환경

본 연구에서는 GNU Radio를 활용하여 CMA 등화기와 FSE를 포함한 송수신기를 구현하였고, SDR RF 장비 NI-USRP 2920를 사용하여 실제시스템에서 구현된 등화기간의 성능차이를 보고자 하였다. TSE는 FSE와 비슷하며 FSE가 상대적 성능이 우수하여 실험 내 비교대상에서 제외하였다. 실험에서 사용된 구체적인 시스템 구성 및 실험환경은 표1에 나타내었다. 그림 1은 등화기를 포함한 수신기를 GNU Radio 상에서 구현한 플로우차트를 보인다. 두 등화기의 효과적인 비교를 위해서 QPSK 신호를 송수신하여 플로우차트의 마지막에서 EVM(Error Vector Magnitude)를 성능지표로 하여 성능을 비교하였다. 실험 진행을 위해 'Custom\_FSE'를 GNU Radio내 Custom block 생성 툴을 통해 C++으로 Custom Block으로 구현하였고, FSE내에서 최적화문제를 풀기 위하여 C++ 오픈소스 라이브러리인면서 컴퓨팅 속도 측면에서 뛰어난 Gurobi 최적화 라이브러리를 사용하였다. Custom\_FSE 블록은 등화기 탭 수 및 모듈레이션에 따라 수정이 가능하도록 하였고, 과표본화 L값은 4로 고정하여 블록을 생성하여 실험에서 사용하였다. 본 실험은 실내 10m x 10m 공간에서 LOS가 어느정도 보장되는 채널 환경에서 실시되었다.

### III. 실험 결과

그림 2는 송신 및 수신된 신호의 성상도를 보인다. 그림 2-1은 송신되는 QPSK 신호를 보이는데, GNU Radio에서는 심볼이 펄스성형필터를 거치고 과표본화된 I/Q 값이 USRP로 전달된다. 이러한 이유로 성상도 사이의 값들이 존재하는 것처럼 보인다. 그림 2-2는 수신기에서 시간동기가 맞추어지기 전 수신신호의 성상도이고, 플로우차트의 Polyphase ClockSync를 거쳐 시간동기가 맞춰진 성상도를 그림 2-3에서 나타내고 있다. 그림 2-4는 블라인드 등화기와 Costas Loop을 거치고난 이후의 성상도인데, 구현된 블라인드 등화기가 제대로 동작하여 구분된 성상도 모습을 보이고 있다.

FSE는 선형계획법 계산량으로 인해 심볼의 성상도

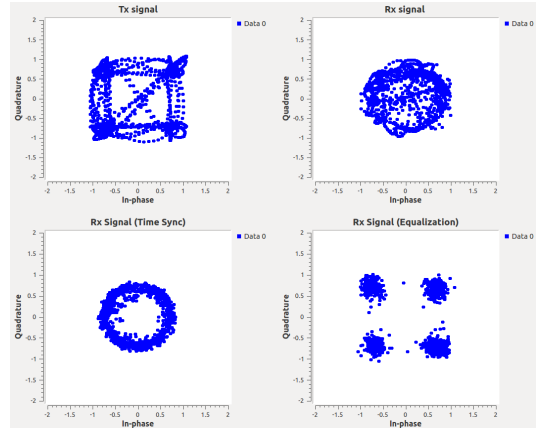


그림 2. 수신된 신호의 성상도  
Fig. 2. Constellation of the received signal

를 실시간으로 나타내기까지 평균 약 1.4초 정도 딜레이가 발생하여 실시간 등화가 빠르게 이루어져서 끊임없이 성상도를 확인할 수 있는 CMA 등화기와 차이를 보였다. 하지만 등화가 잘 이루어지기까지 필요한 샘플 수는 다른 결과를 보인다. 그림 3은 FSE와 CMA 등화기를 사용했을 때 샘플 수에 따른 EVM 성능을 비교하고 있다. 샘플 수가 증가함에 따라 EVM 부드럽게 감소하는 CMA 등화기와 달리 FSE는 짧은 샘플 수 내에 EVM이 급격히 감소하고 이후 낮은 EVM을 계속 유지하는 것을 볼 수 있다. 이는 [3]에서 언급하는 것과 같이 부분 간격 등화기가 상대적으로 짧은 시간동안 머스트하게 들어오는 샘플을 등화하기에 적절한 등화기임을 확인 할 수 있다.

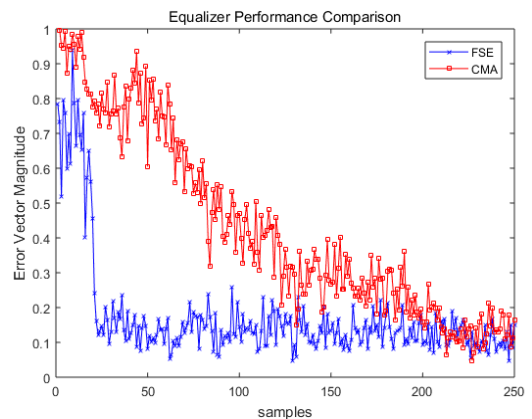


그림 3. 등화기간 샘플 수에 따른 EVM 성능 비교  
Fig 3. EVM performance comparison

## IV. 결 론

본 논문에서는 SDR장비 USRP와 GNU Radio SDR 플랫폼을 활용하여 등화기를 포함한 송수신단을 구현하였으며, 이를 활용하여 실제 무선통신환경에서 수신된 신호가 등화되는 것을 성상도 그림을 통하여 확인하였다. FSE는 선형계획법을 계산하는 시간으로 인한 등화시간이 CMA 등화기를 거치는 시간에 비해 상대적으로 오래 걸리는 것을 실시간 성상도 플롯으로 확인하였다. 하지만 FSE와 CMA 등화기의 샘플수에 따른 EVM 성능을 비교시 기존 논문들의 성능비교와 같이 FSE가 상대적으로 적은 샘플수를 통해서도 등화가 잘 이루어짐을 보였다. 본 논문에서 이루어진 실제적인 블라인드 등화기 구현 성능 분석은 블라인드 등화기를 포함한 통신시스템 구현에 있어 효과적인 기준 제시가 가능할 것이다.

## References

- [1] S. K. Lee and J. C. Lee, "On the performance analysis of blind equalization for partial response channel," *J. KICS*, vol. 28, no. 4, pp. 413-423, Feb. 2003.
- [2] Z. Ding and Z.-Q. Luo, "A fast linear programming algorithm for blind equalization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 9, Sep. 2000.
- [3] G. B. Kim, J. W. Lee, H. W. Nam, and D. Y. Park, "Fractionally spaced blind equalization using singular value decomposition," *J. KICS*, vol. 41, no. 9, pp. 1041-1043, Sep. 2016.