

주파수 선택적 채널 환경에서의 효율적인 MLSE 등화 알고리즘

김 지 혜, 김 성 수
충북 대학교 전기전자 컴퓨터 공학부

Efficient MLSE Equalization algorithm in Frequency selective channel environment

Kang Jee-Hye, Kim Sung-Soo
Chungbuk National University, Dept. of Electrical Computer Engineering.

Abstract - 본 논문에서는 빠르게 변화하는 이동 무선 채널 환경에서 심각한 성능 저하를 일으키는 인접 심볼 간섭(Inter-symbol interference: ISI)에 대처하기 위해 MLSE(Maximum Likelihood Sequence Estimation) 등화기의 성능을 향상시키는 방법을 제안하였다. 기존의 MLSE 등화기는 비터비 알고리즘으로 어느 정도 계산량을 감소시켰지만, 정확한 채널 임펄스 응답을 필요로 하기 때문에, 시변 채널에서의 복잡한 채널 추정기가 문제점으로 남아 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 간단하고 향상된 칼만 필터 기반의 채널 추정기를 새롭게 제안하여 MLSE의 복잡성을 줄였다. 또한, 복잡한 채널 추정을 대신하여 페이딩 채널을 거쳐 수신된 데이터를 클러스터로 매핑하여 클러스터 중심 추정을 이용한 1-D CBSE(1-Dimensional Clustering-based Sequence Equalizer) 알고리즘에, 최소 길이를 지닌 훈련 시퀀스를 제안하여 개선된 1-D CBSE를 이용한 MLSE 등화 성능을 보여주었다.

1. 서 론

현재의 무선 통신 시스템은 극심한 이동 무선 환경에서의 성능향상을 위한 여러 신호 처리 기법들이 연구되고 있다. 이동 무선 채널은 여러 장애물과 사용자의 이동 속도에 따른 다중경로 전파와 도플러 스프레드에 의한 영향으로 심각한 성능 저하를 가지게 된다. 이러한 주파수 선택적 채널환경에서 발생하는 인접 심볼 간섭은 무선 채널에서의 높은 데이터 전송률을 갖는 통신 시스템의 주요한 문제점으로 인식되어 왔고, 이를 제거하기 위한 많은 등화 기법들이[1] 제안되었다. 일반적으로 페이딩 채널은 시간에 따라 변화하기 때문에 이동 무선 채널의 시변 특성에 따라 적용적으로 대처할 수 있는 적응 등화기가 필수적으로 요구된다. 대부분 적응 등화기의 동작은 훈련과 추적 모드로 구분할 수 있다. 이미 수신단에서 알고 있는 고정된 길이의 훈련 시퀀스를 가지고, 채널의 상태를 추정하여 최적의 등화기 필터 계수를 찾아낸다. 이러한 훈련 모드를 거친 후, 실제의 정보 데이터가 전송되면 적응 등화기는 채널에서의 다중경로로부터 야기되는 왜곡을 보상하기 위해서, 적응 순환 알고리즘을 사용하여 채널 추정과 등화기의 계수들을 적절히 변화시켜준다. 그러나 채널 상태를 추정하는 과정에서 수반되는 여러 가지 문제점들은 성능 저하와 등화기 사용의 많은 제한을 가져온다. 특히, 수렴 속도와 복잡한 계산과정은 반드시 해결해야 할 과제로 남게 되었다.

본 논문에서는 우수한 등화성능을 가지고 있지만, 실제로 높은 복잡성으로 인해 사용이 제한되고 있는 MLSE 기반의 효율적인 등화 알고리즘을 제안한다.

MLSE 기반의 등화기는 반드시 그 채널 상태를 알아야 하므로 새로운 칼만 필터 기반의 채널 추정 기법과 채널 추정을 대신한 개선된 1-D CBSE 기법[2]을 이용한 MLSE 등화기를 본론에서 구체적으로 살펴본다.

2. 본 론

2.1 통신 시스템과 채널 모델.

그림1은 등가의 기저대역 통신 시스템을 보이고 있는데, 여기서 I_k 는 전체 M 개의 서로 다른 심볼들 중의 하나로 k 번째 전송된 심볼이고, n_k 는 부가적인 백색 잡음, 그리고 \hat{I}_k 는 k 번째로 수신된 관측 데이터이다.

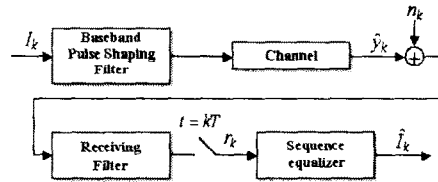


그림 1. 기저대역 통신 시스템 모델.

임의의 $M=4$ 인 QPSK 변조방식을 채택하고, 전송된 데이터 시퀀스는 서로 독립적이고 동일하게 분포된(i.i.d) 경우로 가정한다. 아울러, 통신, 채널, pulse shaping 필터와 receiving filter를 포함하여 고려되어야 할 영향들은 L 개의 연속적인 전송 심볼들로 확장되어, $H(z)$ 의 전달함수를 갖는 유한 임펄스 응답 필터(FIR)로 모델링 되어질 수 있다. 따라서 심볼들의 전송 주기가 T 일 때, 임의의 $t=kT$ 의 시점에서 샘플된 수신 신호는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_k = \sum_{i=0}^{L-1} I_{k-i} \cdot h_i^* + n_k = \mathbf{h}^H \mathbf{I}_k + n_k \equiv \bar{y}^k + n_k \quad (1)$$

여기서 n_k 는 실수부와 허수부 모두 백색 시퀀스들로 이루어진 복소의 부가적 잡음이다. 잡음의 분산은 σ_n^2 이고, σ_s^2 는 심볼들의 분산값으로, 신호대 잡음비(SNR)은 다음과 같다.

$$SNR = \frac{\|\mathbf{h}\|^2 \sigma_s^2}{\sigma_n^2} \quad (2)$$

식 (1)에 h_i^* 는 복소 켈레의 채널 탭들을 의미하고, $I_k, I_{k-1}, \dots, I_{k-L+1}$ 와 \bar{y}^k 는 각각 전송된 심볼들의 시퀀

스와 이와 관련된 무잡음의 관측값을 나타낸다. 따라서 $\mathbf{h} = [h_0, h_1, \dots, h_{L-1}]^T$ 는 채널 임펄스 응답의 L 개의 복소 탭들로 이루어진 벡터이고, 성공적으로 전송된 심볼들로 이루어진 벡터는 $\mathbf{I}_k = [I_k, I_{k-1}, \dots, I_{k-L+1}]^T$ 로 표현한다. 위 수식에서의 T, H 는 각각 Transposition과 Hermitian 변환을 의미한다.

2.2 클러스터링 기법을 이용한 MLSE 등화기

최적의 시퀀스 등화기는 최대 가능성의 시퀀스 추정을 기반으로 제안되었는데, 이는 비터비 알고리즘을 통해서 구현되며, 채널의 임펄스 응답(channel impulse response: CIR)을 알아야만 한다. 실제적으로 CIR은 최소 평균 장승(least mean square :LMS)기법이나 칼만 타입의 알고리즘을 이용하여 추정된다. 많은 통신 시스템에서 데이터들은 블록 단위로 전송되는데, CIR을 추정하기 위해서 미리 각 블록 마다 수신단에서도 알고 있는 훈련 시퀀스를 전송한다. 최근에 제안된 1-D CBSE [2]는 정확한 채널 임펄스 응답을 위한 여러 가지 문제점들을 피하기 위해 수신단에서 관측된 데이터들의 클러스터를 이용한다. 즉, 직접적인 채널 추정 대신 클러스터들의 중심을 추정하여 이를 MLSE 등화기에 적용한다. 무엇보다도 기존에 제시된 클러스터 기반의 등화기 알고리즘에 비해서, 클러스터 중심의 대칭적 구조를 효율적으로 이용하여 복잡성을 크게 감소시킨다. 또한 1-D CBSE는 채널의 임펄스 응답을 위한 파라미터 모델링을 요구하지 않게 때문에 비선형 시스템에서도 효과적으로 이용할 수 있다.

2.2.1 1-D CBSE와 MLSE 등화기.

그림 2는 $M=4, L=2$ 인 채널에서의 관측 데이터들로 이루어진 각 클러스터에서 $\hat{\mathbf{y}}^j$ 와 \mathbf{I}^j 의 일대일 대응관계에 의해서 라벨링됨을 보여주었다. 따라서 기존의 MLSE에서 요구되었던 정확한 채널 추정 값 \mathbf{h} 를 구하는 대신에 각 클러스터의 중심 $\hat{\mathbf{y}}^j$ 이 MLSE에 그대로 적용된다.

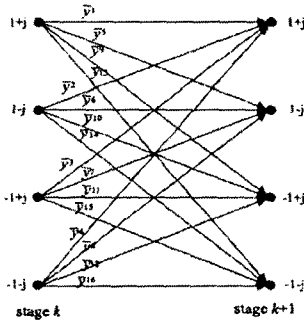


그림 2. $M=4, 2$ -tap 채널의 Trellis diagram.

각 클러스터들은 부가되는 잡음 전력 따라 그 퍼짐 정도가 달라지고, 클러스터들의 개수와 위치는 채널 임펄스 응답의 탭들의 수와 그 값에 따라 결정된다.

2.2.2 효율적인 클러스터링 기반의 채널 추정.

1-D CBSE에서 제안된 새로운 클러스터의 중심 추정 방식[2]은 모든 중심을 직접적으로 구하지 않고, 단지 L 개의 선택된 초기 중심값만 구하면, 나머지 중심값들을 모두 찾아낸다. 따라서 클러스터링 기법의 성능은 초기 L 개의 클러스터의 중심들을 얼마나 정확히 추정하였는가에 달려 있고, 그것은 곧 훈련 시퀀스에 의해서 좌우된다. 다시 말하면, 훈련 시퀀스에 따라 결정되는 관측 데이터들을 가지고 초기 클러스터의 중심을 구하게 되므로 이의 구성여부는 매우 중요한 요소가 된다. 기존의

복잡한 채널 추정을 간단하면서도 효율적으로 개선시킨 1-D CBSE 방식은 복잡성과 계산량을 감소시킨 반면, 적절한 훈련 시퀀스를 구성하는 방법에 대해서는 간과했다. 본 논문에서는 이러한 해결책으로 구조적인 최소의 길이를 지닌 최적의 훈련 시퀀스를 구성하는 방법을 제안한다. 단순히 훈련 시퀀스의 길이를 늘려주므로 향상된 추정 성능을 얻고자 했던 기존의 관점에서 벗어나서 초기 L 개의 중심 추정을 위해 반드시 필요한 훈련 시퀀스만을 가진다. 최적의 훈련 시퀀스는 M -ary에 따라 전체 M 개의 훈련 시퀀스 집합을 만들 수 있다. 표 1은 이에 따른 최적의 훈련 시퀀스 집합을 보여준다. 표 1에서의 $N_{i, \dots, m}$ 은 최소 길이의 훈련 시퀀스를 이루는 심볼의 전체 개수를 의미한다. 예를 들어, $M=4, L=3$ 에서의 최적의 훈련 시퀀스 집합은 표 2와 같이 나타낼 수 있다.

표 1. 제안된 M 개의 최적의 훈련 시퀀스 집합

Tr_1	$\dots, I_{1,1}, I_{1,2}, \dots, I_{1,N_{i, \dots, m}}$
Tr_2	$\dots, I_{2,1}, I_{2,2}, \dots, I_{2,N_{i, \dots, m}}$
\vdots	\vdots
Tr_M	$\dots, I_{M,1}, I_{M,2}, \dots, I_{M,N_{i, \dots, m}}$

표 2. $M=4, L=3$ 에서의 최적의 훈련 시퀀스 집합

Tr_1	$1+j, 1+j, -1-j, 1+j, 1+j$
Tr_2	$-1+j, -1+j, 1-j, -1+j, -1+j$
Tr_3	$1-j, 1-j, -1+j, -1+j, -1+j$
Tr_4	$-1-j, -1-j, 1+j, -1-j, -1-j$

2.3 칼만 필터 기반의 MLSE 등화 알고리즘

일반적으로 페이딩 환경에서 채널의 변화를 추정해야 할 경우에는, 빠르고 적응적인 추정 알고리즘을 요구하며, 데이터 기반의 채널 추정 방법은 낮은 복잡성과 좋은 성능을 가지고 있기 때문에 오늘날 많은 통신 시스템에 사용되고 있다. 그러나 채널을 추정하기 위해 사용되는 훈련 시퀀스들은 대역폭 효율의 손실을 가져온다. 따라서 본 논문에서는 훈련 시퀀스의 길이를 증가하지 않고 채널의 추정 성능을 향상시킬 수 있는 칼만 필터 기반의 MLSE 등화 알고리즘을 제안한다. 칼만 필터를 가진 채널 추정기는 훈련 시퀀스만 가지는 추정기 보다도 높은 성능 이득을 가진다.

채널의 time evolution을 표현하기 위한 stochastic 모델을 필요로 하므로, 이에 대응하여 각 등화기의 탭 계수들은 시간에 대한 랜덤 프로세스로 고려되어야 한다 [3]. 대부분의 통신 시스템에서 시변하는 계수들을 추적하는 것은 매우 중요한 과제이며, regression theory를 적용하여 각 채널 탭들을 저역의 복소 가우시안 프로세스로 가정하고, 그림 3과 같이 시간에 따라 변화하는 AR(auto-regression) 모델로 고려된다. 무엇보다도 이러한 다중 경로 페이딩 채널의 AR 모델 파라미터를 적절히 찾아주는 것이 채널을 추정 성능을 좌우하는 관건이 된다.

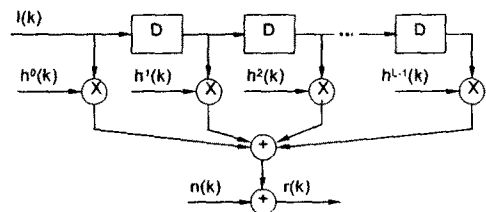


그림 3. 다중경로 채널 모델

본 논문에서는 추정해야 할 페이딩 채널을 Jakes model로 가정하고, EM(expectation Maximization) 알고리즘과 순환적인 칼만 필터[4]를 적용하여 각 파라미터를 찾아 갱신해준다. 우리가 추정해야 할 탭 계수들은 추정 오차의 분산을 최소화하는 칼만 필터링 기반의 적응적인 알고리즘으로 On-line에서도 구현될 수 있다. 대부분의 적응 알고리즘과 마찬가지로 훈련 기간 동안 채널의 변화를 추정하고, 그 뒤, 결정 지향(decision directed) 모드로 전환되거나, MLSE의 비터비 알고리즘을 사용하여 수신된 심볼을 검출한다. 본 논문에서는 페이딩 채널의 AR 모델 파라미터를 최적으로 찾아내어, 이를 기반으로 칼만 필터 채널 추정기와 비터비 등화기에 적용하였을 때 우수한 성능과 동시에 짧은 훈련 시퀀스에 의한 대역폭 효율의 향상을 다음의 시뮬레이션을 통해 보인다.

2.4 시뮬레이션 결과

2.4.1 최적의 훈련 시퀀스를 이용한 1-D CBSE

본 논문에서 제안하는 최적의 훈련 시퀀스에 따른 성능 분석을 위해 시뮬레이션에 사용한 채널의 임펄스 응답 $H(z) = (0.5 - j) + (-0.6 - 0.1j)z^{-1} + (0.1 + 0.2j)z^{-2}$ 은 L=3의 길이와 M=4의 QPSK 변조를 이용하였다. 블록화된 데이터 형태의 전송에서 각 블록은 1000개의 심볼들로 이루어졌고 비트율은 300kb/s, 캐리어 주파수는 900MHz로 가정하였다. 그림 4는 위에서 주어진 3-tap의 페이딩 채널에서의 수신 데이터와 최적의 훈련 시퀀스를 이용한 1-D CBSE의 결과를 보여주었다. 그림 5. SNR이 각각 10, 12[dB]에서 기존의 1-D CBSE를 이용한 MLSE의 SER를 훈련 시퀀스의 길이에 따라 비교한 것이다. 이것을 보면, 훈련 시퀀스의 길이가 길수록 성능이 향상된다는 것은 어느 이상의 SNR과 일정 길이 이상의 시퀀스를 이용할 경우라는 것을 알 수 있다. 따라서 중심 추정을 위한 훈련 시퀀스는 SNR이 어느 이상의 조건을 만족하는 상황에서는 최소 길이로 충분히 원하는 성능을 얻을 수 있다. 이것은 짧은 훈련 시퀀스를 이용함으로써 대역폭 효율의 향상과 빠른 추정 과정의 이득을 동시에 얻을 수 있다.

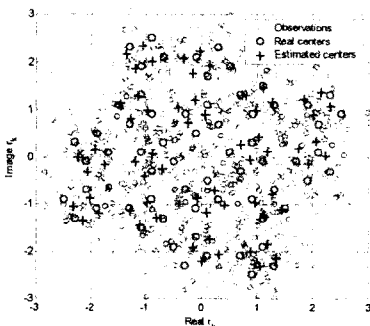


그림 4. 제안된 최적의 훈련 시퀀스를 이용한 CBSE기반의 클러스터 추정결과(SNR=15[dB]).

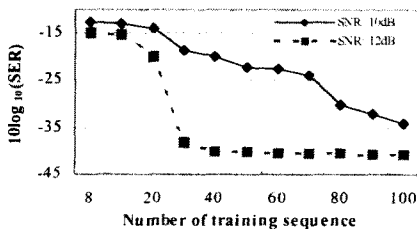


그림 5. 훈련 시퀀스의 길이 따른 심볼 에러율의 비교 (SNR = 10, 12 [dB]).

2.4.2 개선된 칼만 필터 기반의 MLSE 등화 성능

본 논문에서는 향상된 칼만 필터 기반의 채널 추정기를 이용한 MLSE 등화기를 제안하였다. 무엇보다도 MLSE의 등화성능은 페이딩 채널을 얼마나 잘 추정하느냐에 달려 있고, 또한 최적의 채널 추정을 위한 칼만 필터는 시스템과 관측 방정식을 위한 적절한 파라미터 값을 얻는 것이 가장 중요하다. 따라서 [4]에서 제안된 순환적으로 갱신되는 동적 시스템의 파라미터와 칼만 필터를 이용한 적응적인 채널 추정 성능의 향상을 얻을 수 있었다. 추정된 채널 임펄스 응답은 MLSE의 비터비 알고리즘을 거쳐서 낮은 SER의 성능을 보이고 있다. 그림 6.에서는 앞에서 제시한 동일한 채널 환경에서, 다중 경로 채널을 통해 수신된 신호의 모습과 칼만 필터 기반의 채널 추정기와 비터비 등화를 거친 심볼의 모습, 훈련 시퀀스에 의한 수렴 특성을 보이고 있다. 단지 10개의 훈련 심볼만을 사용하여 칼만 필터를 수행하여도 적절히 선택된 파라미터로 인해서 높은 칼만 채널 추정 성능을 얻을 수 있다.

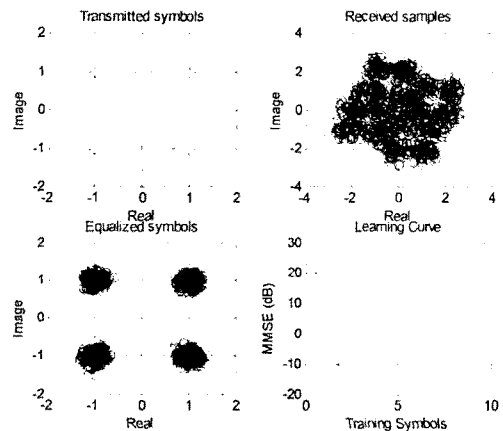


그림 6. 제안된 칼만 필터 채널 추정기와 비터비 등화기를 사용한 성능 결과.

3. 결 론

본 논문에서는 빠르게 변화되는 이동 무선 채널 환경에서 인접 심볼 간섭을 최소화 할 수 있는 최적의 MLSE 등화 알고리즘을 제안하였다. 무엇보다도 기존의 MLSE 등화기가 지닌 채널 추정의 복잡성과, 막대한 계산량의 문제점을 해결하기 위해서 두 가지의 새로운 기법을 제시하였다. 우선, 짧은 훈련 시퀀스를 가지고도 적절한 시스템 파라미터를 추정하여 높은 성능을 지닌 칼만 필터 추정기를 적용한 MLSE 등화 기법과 적절한 채널 추정을 대신하여 개선된 1-D CBSE를 적용한 향상된 최적 등화기를 설계하여 각각의 성능 결과를 시뮬레이션을 통해서 보여주었다.

[참고 문헌]

- [1] J. G. Proakis., Digital Communication, 4rd ed, New York: McGraw Hill, 2000.
- [2] U. Kopsinis and S. Theodoridis, "An Efficient Low Complexity Technique for MLSE Equalizers for Linear and Nonlinear Channels", IEEE Trans, Signal Processing, vol. 51, 3236-3248, 2003.
- [3] Michail K. T, Georgios B. G, "Estimation and equalization of fading channels with random coefficients", SIGNAL PROCESSING, 53, 211-229, 1996.
- [4] 김지해, 김성수, "EM 알고리즘을 통한 칼만 필터의 성능 개선", 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, 2615-2617, 2003.