

이동 통신 페이딩 채널에서 적응 등화기의 성능 평가

김 홍 식, 이 동 유, 김 주 광, 김 용 로, 유 흥 균
충북대학교 전자공학과

Performance Evaluation of Adaptive Equalizer in Mobile Communication Fading Channel

Hong-Sik Keum, Dong-Yoo Lee, Ju-Kwang Kim, Yong-Ro Kim, Heunggyoon Ryu
DEPT. OF ELECTRONIC ENG., CHUNGBUK NAT'L UNIVERSITY

Abstract

We consider the tapped-delay line (TDL) equalizer with the few calculation quantity and the simplicity, the decision feedback equalizer(DFE) with the good property for interference, and lattice equalizer(LE) with high insensitivity to roundoff noise in mobile communication fading channel. The used adaptive algorithm is the LMS algorithm and RLS algorithm.

In this paper, we have evaluated the performance of the TDL equalizer, the decision feedback equalizer, and lattice-structured equalizer, for the digital signal corrupted by the impulsive noise and the white gaussian noise under the fading channel environment.

From the results of error performance analyses, it is confirmed that lattice-structured equalizer has better performance than DFE equalizer and TDL equalizer.

1. 서 론

이동통신에서는 부호간 간섭(intersymbol interference : ISI)과 채널상의 잡음과 다중 경로 페이딩으로 인하여 왜곡된 디지털 신호를 복원하기 위하여 간단한 선형 등화기와 적절한 진폭 왜곡 채널에 특히 유용한 비선형 등화기 등이 연구되어 왔다[1,2].

실제로 계산량이 적고 필터의 구조가 간단한 TDL(tapped-delay line) 선형 등화기와 과거잡음의 간섭에 대한 제거 능력이 뛰어난 결정 피환을 이용한 DFE (decision feedback equalizer) 비선형 등화기 그리고 TDL 선형등화기보다 채널

상관 행렬의 고유치 분포비에 관계가 적은 것으로 알려져 있는 격자 등화기 (lattice equalizer)가 주로 사용되고 있다. 그리고, 적응 등화기의 적응 알고리즘으로는 비교적 계산량이 적고 간단한 LMS (Least Mean Square)알고리즘과 수렴속도가 빠르며 비로간의 직교화 능력이 우수한 RLS (Recursive Least Square)알고리즘 등이 사용되고 있다[3,4]. LMS 알고리즘과 RLS 알고리즘의 큰 차이는 LMS 알고리즘이 추정오차의 제곱값에 대한 통계적 평균치를 줄이도록 동작 되는 반면, RLS 알고리즘은 추정오차의 순시값에 대한 가중치 합(Weighted Sum)을 줄이도록 동작 된다는 것이다.

본 논문에서는 등화기의 입력신호로 페이딩 채널에서 임펄스성 잡음과 백색 가우시안 잡음이 동시에 부가된 디지털 신호에 대하여 LMS(least mean square) 알고리즘을 사용한 TDL 등화기와 DFE (decision feedback equalizer) 등화기, 그리고 격자 등화기(lattice equalizer)의 성능을 평가하였다. 또한 RLS(recursive least square)알고리즘을 사용하여 위와 같이 성능을 비교 평가하였다.

2. 적응 등화기와 페이딩 채널

- 1. 적응 등화기
- 1) TDL 등화기

TDL(transversal 또는 nonrecursive)등화기는 많은 등화기 구조들 중 가장 간단한 구조를 가지고 있다.

이러한 TDL 등화기에서 수신된 신호의 현재 그리고 과거 값 $r(t-nT)$ 는 등화기 계수(탭 이득) C_n 에 의해 선형적으로 가중되고 출력을 산출하기 위해 합해진다.

등화기 계수 $C_n, n=0, 1, \dots, N-1$,은 결합된 채널과 등화기

의 임펄스 응답의 샘플을 등화기의 전체 길이 N 중에서 하나인 T 간격 순간을 전부 영으로 만들어 주기 위해 선택된다.

LMS 알고리즘을 사용한 탭 계수 갱신 방정식은 식 (1)과 같다.

$$C_n(k+1) = C_n(k) - d * e_k * w(t_0 + kT - nT) \quad (1)$$

$n=0, 1, \dots, N-1$

여기서, $C_n(k)$: k 번째 시각에서 n 번째 탭 계수,

e_k : 오차 신호,

t_0 : 샘플링 타이밍,

d : 적응상수, 또는 스텝 크기.

등화기의 계수 갱신 방정식에 RLS 알고리즘을 사용하면 식 (2)와 같다[1][6].

$$H(k) = H(k-1) + R(k) \cdot e(k) \quad (2)$$

여기서, $H(k)$: k 번째 시각에서 N 개의 계수 벡터,

$R(k)$: N 개의 weight 벡터

$$= \frac{\beta^{-1} \cdot P(k-1) \cdot X(k)}{1 + \beta^{-1} \cdot X^T(k) \cdot P(k-1) \cdot X(k)}$$

β : exponential weighting factor (> 1),

$$P(k) = \beta^{-1} P(k-1) - \beta^{-1} R(k) X^T(k) P(k-1)$$

; $N \times N$ 벡터,

$X(k)$: N 개의 입력 벡터,

$e(k)$: 오차 신호

$$= d(k) - X^T(k) H(k-1),$$

$d(k)$: desired 신호.

2) 결정 궤환 등화기(Decision-Feedback Equalizer)

적심한 진폭 왜곡 채널에 특히 유용한 간단한 비선형 등화기는 과거의 심볼들에서 ISI를 제거하기 위하여 결정 궤환을 사용한다.

결정 궤환 등화기 (DFE)의 구조는 그림 1과 같다. 등화된 신호는 등화기 전방의 출력과 궤환부분의 합이다. 전방부분은 TDL 등화기와 같다. 결정은 두번째 TDL 필터에 의해서 궤환된 등화신호를 만든다.

기본 개념은 과거의 심볼값을 알고 있다면, 이러한 심볼들에 의해 제공된 ISI는 등화기 출력에서 적당한 가중치를 가진 과거 심볼값 들을 뺌으로서 완전히 제거될 수 있는 것이다. 가중치는 등화기의 채널과 전방부분을 포함하는 시스템 임펄스 응답의 무미 표현이다.

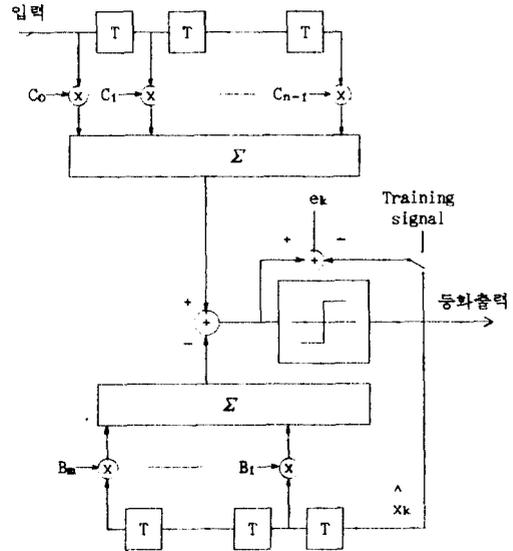


그림 1. 결정 궤환 등화기 (D F E)

전방과 궤환 계수들은 MSE를 최소화하기 위하여 동시에 조정된다. 전방 계수들에 대한 갱신 방법은 선형 등화기에서와 같다.

궤환 계수들은 식 (2)에 의해 조정된다.

$$b_m(k+1) = b_m(k) + d * e_k * x_{k-m}, \quad m = 1, \dots, M \quad (2)$$

여기서, $b_m(k)$: k 번째 시각에서 m 번째 궤환 계수,

x_k : k 번째 결정 심볼.

$b_m(k)$ 의 최적 LMS값은 ZF(Zero Forcing) 등화기에서와 유사한 방법으로 궤환부분의 짧은 기간내에 ISI를 영으로 감소시키는 것이다. DFE의 궤환부분의 출력이 noise-free 과거 결정의 가중된 합이기 때문에, 궤환계수들은 등화기 출력에서 잡음 전력을 결정하는 것에 아무런 영향도 끼치지 않는다.

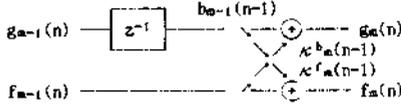
3) 격자 등화기(Lattice Equalizer)

격자 등화기는 일반적으로 TDL 선형 등화기보다 수렴속도에 있어 채널 상관 행렬의 고유치 분포비에 관계가 적은 것으로 알려져 있다.

격자 등화기 구조는 반사(reflection)또는 PARCOR 계수라 불리는 내부계수를 가진 $n-1$ 개의 단계(stage)의 조합으로 구성된다. 입력 $y(i)$ 의 직교화 과정은 각 단계(stage)를 거

치면서 이루어진다.

격자동화기의 구성도는 그림 2와 같다.



< 각 단계의 구성 >

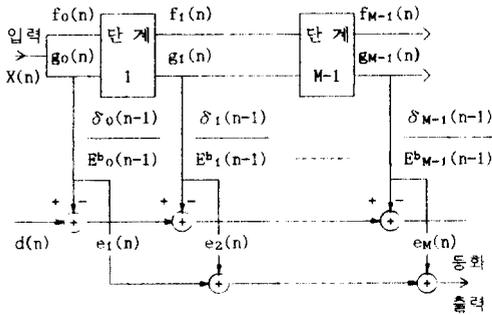


그림 2. 격자 동화기 (lattice equalizer)

RLS 격자 알고리즘은 다음 식과 같다.

- 격자 예측기(predictor)
; begin with $n=1$ & $n=0, 1, \dots, M-2$

$$k_{m+1}(n-1) = w_m k_{m+1}(n-2) + \alpha_m(n-2) f_m(n-1) g_m(n-2)$$

$$c_{m+1}^f(n-1) = -\frac{k_{m+1}(n-1)}{E_{m+1}^b(n-2)}$$

$$c_{m+1}^b(n-1) = -\frac{k_{m+1}(n-1)}{E_m^f(n-1)}$$

$$f_{m+1}(n) = f_m(n) + c_{m+1}^f(n-1) g_m(n-1) \quad (3)$$

$$g_{m+1}(n) = g_m(n-1) + c_{m+1}^b(n-1) f_m(n) \quad (4)$$

$$E_{m+1}^f(n-1) = E_m^f(n-1) - \frac{|k_{m+1}(n-1)|^2}{E_m^b(n-2)}$$

$$E_{m+1}^b(n-1) = E_m^b(n-2) - \frac{|k_{m+1}(n-1)|^2}{E_m^f(n-1)}$$

$$\alpha_{m+1}(n-1) = \alpha_m(n-1) - \frac{\alpha_m^2(n-1) |g_m(n-1)|^2}{E_m^b(n-1)}$$

- 격자 필터; begin with $n=1$ & $n=0, 1, \dots, M-1$

$$\delta_m(n-1) = w_m \delta_m(n-2) + \alpha_m(n-1) g_m(n-1) e_m(n-1)$$

$$\xi_m(n-1) = -\frac{\delta_m(n-1)}{E_m^b(n-1)} \quad (5)$$

$$e_{m+1}(n) = e_m(n) + \xi_m(n-1) g_m(n)$$

여기서, c_{m+1}^f, c_{m+1}^b : m 단계의 전·후방 반사계수,

E_m^f, E_m^b : m 단계의 전·후방 예측 오차,

w_m : m 번째 텀 계수.

2. 이동통신 페이딩 채널

이동 통신 채널을 그림 3과 같이 3-way로 모델링하였다.

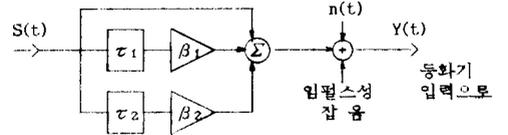


그림 3. 3-way 페이딩 채널 모델

동화기의 입력신호 Y(t)는 식 (6)과 같다.

$$Y(t) = S(t) g(t-nT) + \beta_1 S(t) g(t-nT-\tau_1) + \beta_2 S(t) g(t-nT-\tau_2) + n(t) + in(t-nT) \quad n = -\infty \sim \infty \quad (6)$$

여기서, S(t) : '1/0'의 원천 데이터,

$$g(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2 \\ 0, & |t| > T/2 \end{cases}$$

β_1, β_2 : 각 경로의 감쇄율,

τ_1, τ_2 : 각 경로의 지연,

$n(t)$: 백색 가우시안 잡음,

$in(t)$: 임펄스성 잡음.

3. 동화기 성능 분석

성능 분석을 위하여 3-way 페이딩 채널을 통과한 가우시안과 임펄스성 잡음이 부가된 디지털 신호를 심플주기당 8 샘플로 샘플링하여 입력으로 사용하였다.

그림 4는 임펄스성 잡음이 부가되지 않았을 때의 LMS 알고리즘을 사용한 TDL, DF, LE 동화기의 특성을 비교한 것이다.

표 1에 그림 4의 성능 분석에 사용한 설정치를 나타내었다.

표 1. LMS 동화기 및 페이딩 채널 설정치

	텀 수 (전방/후방)	텀 손기치 (전/후방)	스텝 크기 (Trn./norm.)	감쇄율 (β_1/β_2)
LE	4차 / 없음	0.2 / 없음	0.0002/0.0001	0.2 / 0.2
DFE	4차 / 3차	0.3 / 0.2	0.0002/0.0001	0.2 / 0.2
TDL	4차 / 없음	0.15/없음	0.005 / 0.001	0.2 / 0.2

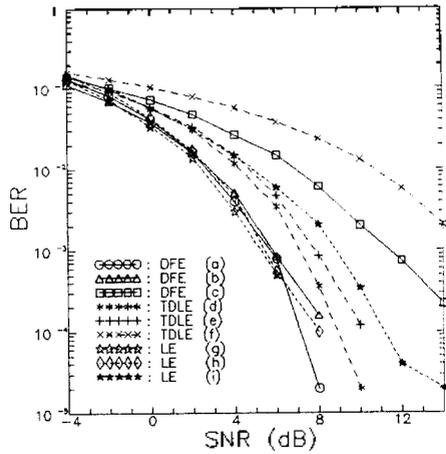


그림 4. LMS 알고리즘의 등화기 성능 '1',

그림 5는 임펄스성 잡음이 추가되었을 때의 LMS 알고리즘을 사용한 TDLE, DF, LE 등화기의 특성을 비교한 것이다. 사용된 설정치는 위 표 1에서와 동일하게 설정하였다.

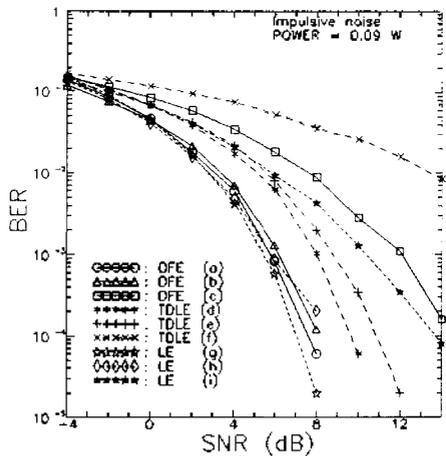


그림 5. LMS 알고리즘의 등화기 성능 '2',

그림 6은 임펄스성 잡음이 추가되지 않았을 때의 RLS 알고리즘을 사용한 TDLE, DF, LE 등화기의 성능을 비교한 것이다.

그림 6의 성능 분석에 사용한 설정치는 표 2와 같다.

표 2. RLS 등화기 및 페이딩 채널 설정치

	탭 수 (전방/후방)	탭 초기치 (전/후방)	P 벡터 초기치 (전방/후방)	감쇄율 (β1/β2)
LE	4차 / 없음	0.0 / 없음	없음 / 없음	0.2 / 0.2
DFE	4차 / 3차	0.3 / 0.2	10 / 10	0.2 / 0.2
TDLE	4차 / 없음	0.15 / 없음	8 / 없음	0.2 / 0.2

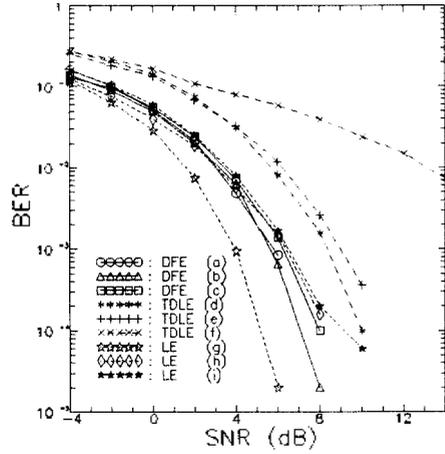


그림 6. RLS 알고리즘의 등화기 성능 '1',

그림 7은 임펄스성 잡음이 추가되었을 때의 RLS 알고리즘을 사용한 TDLE, DF, LE 등화기의 특성을 비교한 것이다. 사용된 설정치는 위 표 2에서와 동일하게 설정하였다.

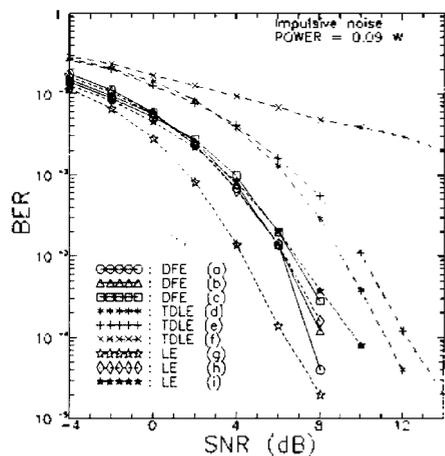


그림 7. RLS 알고리즘의 등화기 성능 '2',

그림 4, 5, 6, 7에서 (a), (d), (g)는 페이딩이 없는 경우이고, (b), (e), (h)는 경로 1에서 T/4 지연된 경우이고, (c), (f), (i)는 경로 1에서 T/4 그리고 경로 2에서 -T/4 지연된 경우이다.

위의 그림에서 알 수 있듯이 TDLE 등화기 보다는 DFE 등화기의 성능이, 그리고 DFE 등화기 보다는 격자 등화기의 성능이 우수함을 확인할 수 있다. 또한 페이딩 그리고 임펄스성 잡음이 있는 경우에 등화기의 특성이 나빠짐을 확인할 수 있다.

비트 오류율이 10⁻³일 때의 격자 등화기와 다른 등화기 간

의 SNR 여유를 표 3에 나타내었다.

표 3. 격자 동화기와 다른 동화기 간의 SNR 여유

(BER = 10^{-3} 일때)

임펄스성잡음		있 음		없 음	
Lattice는		DFE보다	TDL보다	DFE보다	TDL보다
L	페이딩	0.45 dB	2.6 dB	0.6 dB	1.9 dB
	없 음				
M	τ_1	0.5 dB	3.0 dB	0.4 dB	2.1 dB
	τ_2				
R	페이딩	1.9 dB	4.8 dB	1.8 dB	4.4 dB
	없 음				
S	τ_1	-0.5 dB	3.9 dB	-0.8 dB	2.6 dB
	τ_2				

이때, 사용된 통신 파라미터는 다음과 같다.

$K=0.25$. (=간접파 전력 대 직접파 전력의 비율)

임펄스성 잡음 전력 = 0.5

신호 전력 = 1.0

$\tau_1 = T/4$ 지연, $\tau_2 = -T/4$ 지연 .

4. 결 론

이동 통신 페이딩 채널에서 왜곡된 디지털 신호를 복원하기 위해 실제적으로 많이 사용하고 있는 계산량이 적고 필터의 구조가 간단한 TDL 선형 동화기와 과거심볼의 간섭에 대한 제거능력이 뛰어난 결정 궤환을 이용한 DFE 비선형 동화기, 그리고 채널 상관 행렬의 고유치 분포비에 관계가 적은 것으로 알려진 격자 동화기를 LMS 알고리즘과 RLS 알고리즘을 사용하여 동화기의 성능을 분석하였다.

10^{-3} BER을 얻기 위해서는 페이딩과 임펄스성 잡음이 없는 경우, 격자 동화기는 DFE 동화기보다 LMS 알고리즘을 사용한 경우에는 0.6 dB의 여유가 있고 RLS 알고리즘을 사용한 경우에는 1.8 dB의 여유가 있음을, 또한 TDL 동화기보다 LMS 알고리즘을 사용한 경우에는 1.9 dB의 여유가 있고 RLS 알고리즘을 사용한 경우에는 4.4 dB의 여유가 있음을 분석을 통해 얻었다.

동화기의 성능 분석 결과, TDL 선형동화기 보다는 DFE 동화기의 성능이, DFE 동화기보다는 격자 동화기의 성능이 우수함을 얻을 수 있고, 또한 페이딩과 임펄스성 잡음이 존재

하는 경우에 동화기의 특성이 나타짐을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] T. Nakai, et al., "Adaptive Equalizer for Digital Cellular Radio," IEEE, 41st, VTC, May 1991.
- [2] M. Abe, et al., "Analysis on bit-error characteristics of channel codec in digital mobile communications system," IEEE, 41st, VTC, May 1991.
- [3] E. M. Satorius, et al., "Application of Least Squares Lattice Algorithms to Adaptive Equalization," IEEE Trans. COMM, Vol. COM-29, No. 2, Feb. 1981.
- [4] R. A. Kennedy, et al., "Channels Leading to Rapid Error Recovery for Decision Feedback Equalizers," IEEE Trans. COMM, Vol. 37, No. 11, Nov. 1989.
- [5] F. Ling, et al., "A Generalized Multichannel Least Squares Lattice Algorithm Based on Sequential Processing Stages," IEEE Trans. ASSP, Vol. ASSP-32, No. 2, Apr. 1984.
- [6] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 1983.
- [7] "이동 통신 채널에서 적응 동화기의 특성 분석," 9 회 음성통신 및 신호처리 워크샵 논문집, SCAS-9권 1호, 8 1992.