

결정제한 복조에 근거한 차동 DPSK 시스템용 선형 등화기

장 동운* 이 용훈**
*국방과학연구소 **한국과학기술원

요약문

본 논문에서는 선형제한 등화방식과 결정제한 복조방식을 결합하여 차동 PSK 신호 검출에 필요한 등화기 구조를 제안한다. 이 등화기의 출력을 등화기의 제한부로 입력하기에 앞서, 결정제한 복조방식에 근거하여 적절히 변형함으로써 제안된 구조는 마치 결정제한 등화기처럼 동작한다. 모의 실험 결과는 실제로 제안된 등화기가 기존의 차동검파 방식의 등화기 보다 월등한 성능을 나타내고, 동기검파를 위한 결정제한 등화기에 근접한 성능을 가짐을 보여준다.

1. 서론

차동 동기 수신기(differentially coherent receivers)에서, 미지의 시변 채널에 의한 신호의 왜곡을 보상하기 위해 선형[1],[2] 및 비선형[3] 등화기들이 제안되었다. [2]에서 Sehier 와 Kaleh 는 선형채널에 의한 심볼간 간섭(intersymbol interference:ISI)를 줄이기 위해 선형 등화기를 설계하였다. 이 등화기는 비선형 차동검파기(differential detector) 앞에 위치한다. 이 경우 동기식 복조(coherent demodulation)에 사용되는 기존의 선형등화기와는 달리, 결정기(decision device) 와 등화기 사이에 있는 차동검파기로 인해, 결정제한 방식으로의 직접적인 변환은 곤란해진다. 반면에 등화기가 차동 검파기 뒤에 위치하면 결정제한 구조를 가질 수 있다. 그러나 이러한 방식으로 등화기를 구성하면 차동 검파에 의해 야기되는 비선형 특성을 보상해야 하는 단점이 있다. 이와 같은 관찰은 [3]에서 제안된 비선형 Volterra 형 결

정제한 등화기(VDFE)에 이르게 된다. 이 VDFE 는 ISI 가 심한 채널에서 선형등화기 보다 뛰어난 성능을 보인다. 그러나 차동검파기의 비선형 특성을 보상하는 것은 효율적이지 못하다. 즉 차동검파기의 전단에 위치하고 동시에 결정제한 구조를 가지는 것이 바람직한 등화기의 구조라 할 수 있다.

이 논문에서는 결정제한 DPSK 복조방식 [4]-[7]을 이용하여 위에서 언급한 등화기 구조를 설계할 수 있음을 보인다. 제안된 등화기는 선형제한(linear feedback) 형태의 구조이나 그 출력은 제한부로 제한 되기 전에 결정제한 복조방식에 따라 적절하게 변형된다. 변형된 선형제한 등화기(modified linear feedback equalizer:MLFE)라 명명된, 이 등화기는 현재까지의 등화기보다 우수할 뿐만 아니라 동기식 복조에 사용되는 결정제한 등화기에 매우 근접한 성능을 보인다.

2. 변형된 선형제한 등화기

MLFE 를 설명하기에 앞서 사용되는 용어들을 설명하고 DPSK 시스템을 위한 선형 등화기에 대해 살펴보기로 한다. 또한 결정제한 DPSK 복조와 선형등화기의 결합에 관해서도 설명한다.

그림 1 은 선형 등화기를 포함하는 차동 DPSK 수신기를 나타낸다. 송신 측에서 정보 심볼 $a(k)$ 는 다음과 같이

$$d(k) = a(k) d(k-1) = d(0) \prod_{i=1}^k a(i). \quad (1)$$

로 차동 부호화 된다. 수신 측에서 등화기 입력은

$$r(k) = e^{j\theta} \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(i)d(k-i) + \eta(k) \quad (2)$$

로 표현된다. 여기서 θ 는 미지의 반송파 위상이며 $\{h(i)\}$ 는 송신필터, 채널, 수신필터를 포함하는 전체채널의 임펄스 응답 (impulse response)을 의미한다. $\tilde{a}(k)$ 를 얻기 위해 등화기 출력 $x(k)$ 를 차동검파하고 양자화한다. 에러 신호 $e(k)$ 는 등화기의 탭을 갱신하는데 이용된다.

위의 DPSK 시스템의 성능을 개선하기 위해 결정 계환 복조방식 [4]-[7]을 등화기와 함께 사용하는 것을 고려해 볼 수 있다. 그림 2에 보인 것처럼 결정계환 복조에서 시각 k 에서의 기준 위상은 $\arg[\tilde{d}_n(k-1)]$ 로 주어진다.

여기서 $\tilde{d}_n(k-1) = \tilde{d}(k-1)/\tilde{d}(k-1)$ 이고

$$\tilde{d}(k) = x(k) + \sum_{i=1}^M \left\{ \prod_{j=0}^{i-1} \tilde{a}(k-j) \right\} x(k-i). \quad (3)$$

이다.

이런 방식으로 선형등화기와 결정계환 복조를 결합하는 것은 그림 1의 선형등화기에 비해 큰 성능의 향상은 보이지 않는다. 그 이유는 선형등화기가 ISI를 잘 보상하지 못 할 경우 (3)으로 표현되는 기준 위상이 불확실해지기 때문이다.

이 논문에서 제안된 MLFE는 선형 등화기를 선형계환 등화기로 교체하고, 그것의 계환부로 $\tilde{d}_n(k-1)$ 를 계환 시킴으로써 얻어지며 그림 3처럼 나타낼 수 있다. 등화기의 탭 계수 갱신을 위해 least mean square(LMS) 알고리즘을 사용하면 이 시스템은 다음 식들로 주어진다:

$$x(k) = W_k^t Q_k, \quad (4a)$$

$$e(k) = \tilde{a}(k) - x(k)\tilde{d}_n^*(k-1), \quad (4b)$$

$$W_{k+1} = W_k + \mu e(k)\tilde{d}_n^*(k-1)Q_k^*. \quad (4c)$$

여기서 t 는 transpose를 의미하며, Q_k^t 는 $\{r(k+N_f), \dots, r(k), \tilde{d}_n(k-1), \dots, \tilde{d}_n(k-N_b)\}$ 를 나타내고 N_f 와 N_b 는 각각 feedforward와 feedback의 탭 수를 표시한다. W_k 는 시각 k 에서의 $(N_f + N_b + 1)$ 차 탭 계수 벡터이다. $\tilde{d}_n(k-1)$ 와 Q_k 를 각각 $x(k-1)$ 와 $R_k^t = \{r(k+N_f), \dots, r(k), \dots, r(k-N_b)\}$ 로 대체하면 그림 2의 선형 등화기가 된다. Q_k 대신에 R_k 를 사용하면 이 시스템은 MLE가 된다.

3. 실험 결과

제안된 MLFE의 성능을 알아보고 LE, MLE 및 VDFE와의 성능 비교를 위해 [3]에서 사용한 두 가지의 선형 채널, finite impulse response (FIR), 을 사용하여 실험을 수행하였다. 이 채널들은 각각 $\{h_0, h_1, h_2\} = \{0.304, 0.903, 0.304\}$ 와 $\{0.407, 0.815, 0.407\}$ 로 나타내지는 채널 A와 B이다. 채널 B는 주파수 응답에서 spectral null을 가지며 심한 ISI를 발생시킨다. VDFE를 제외한 각 등화기는 15개의 탭을 가진다. MLFE에서 $N_f = 9$ 와 $N_b = 5$ 로 주어진다. VDFE는 본질적으로 8개의 탭이면 충분하다. (3)에서 M 값은 3으로 고정되었다. ($M = 10$ 에서도 실험하였으나 $M = 3$ 일 때와 비슷한 성능을 보여 여기서는 그 결과를 도시하지 않았다.) 반송파의 위상 편이 $\theta = 1.5\pi$, μ 는 0.005가 사용되었다. DBPSK 시스템을 가정하고 10^4 개의 학습 데이터를 이용하여 탭 계수들의 초기치를 구하였다. 비트 오류율(bit error rate:BER) 값은 10^7 개의 이진 입력 데이터를 사용하여 실험적으로 계산하였다.

그림 4와 5는 각각 채널 A와 B에 대한 BER를 나타낸다. 비교를 위해 동기 방식으로 검출하는 DFE(DFE/coherent)의 BER

도 동시에 도시하였다. 예상되었듯이, MLE는 LE와 대동소이한 성능을 보였다. VDFE는 채널 B에서 LE와 MLE에 비해 우수한 성능을 보이나 채널 A에서는 다소 열악한 성능을 보여준다. MLFE는 모든 비동기식 검파방식의 등화기보다 월등한 성능을 보일 뿐만 아니라 동기식 DFE/coherent에 근접한 성능을 가진다.

다음으로 MLE의 수렴 및 MSE 특성을 LE 및 DFE/coherent와 비교하기 위해 $E_b/N_0 = 15dB$ 에서 채널 A에 대해 모의 실험을 하고 그림 6에 결과를 보였다. 각각의 그래프는 500번의 수행 결과를 평균한 값을 도시한 것이다. 그림에서 수렴 속도는 3가지 등화기 모두 동일함을 볼 수 있다. 수렴 후의 MLFE의 MSE는 LFE에 비해 약 4dB 작고 DFE/coherent에 비해 0.5dB 정도 크다.

4. 결론

이 논문에서 차동 PSK와 같이 동작 가능한 결정궤환에 근거한 등화기를 제안하였다. MLFE라 하는 이 등화기는 선형궤환 구조를 가지나 그 출력은 궤환부로 입력되기 전에 결정 궤환 복조 알고리즘을 이용하여 변형된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 MLFE가 성능에 있어서 기존의 방식들에 비해 월등할 뿐만 아니라 DFE/coherent에 근접한 성능을 보이는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] R. D. Gitlin and K. H. Muller, "Optimization of digital post detection filters for PSK differential detectors," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. COM-24, no.9, pp.936-970, Sept. 1976.
- [2] P. Schier and G. K. Kaleh, "Adaptive equalizer for differentially coherent

receiver," *IEE Proceedings*, vol. 137, pt. I, pp. 9-12, Feb. 1990.

- [3] A. Masoomzadeh-Fard and S. Pasupathy, "Nonlinear equalization of multipath fading channels with differentially coherent demodulation," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, vol.14, no.3, pp.512-520, Apr. 1996.
- [4] H. Leib, "Data-aided non-coherent demodulation of DPSK," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 722-725, Feb./Mar./Apr. 1995.
- [5] F. Edbauer, "Bit error rate of binary and quaternary DPSK signals with multiple differential feedback detection," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 40, no. 3, pp. 457-460, Mar. 1992.
- [6] J. Liu, S. C. Kwatra, and J. Kim, "An analysis of decision feedback detection of differentially encoded MPSK signals," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 44, no. 2, pp.261-267, May 1995.
- [7] F. Adachi and M. Sawahashi, "Decision feedback differential phase detection of M-ary DPSK signals," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 44, no. 2, pp.203-210 May 1995.

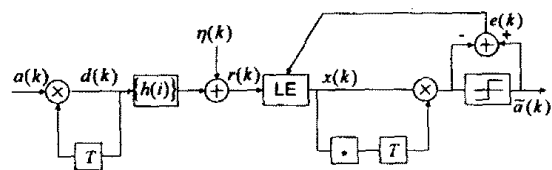


그림 1. 선형 등화기의 기저대역 모델. 여기서 T는 심볼단위의 지연을 의미하고 *는 복소공액을 나타낸다.

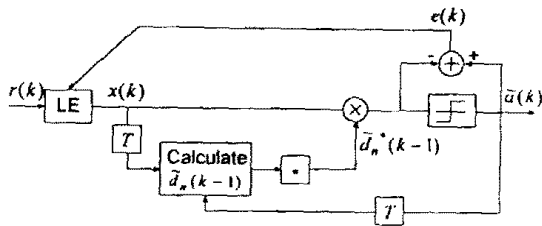


그림 2. 결정제한 복조와 선형 등화기의 결합: 변형 선형 등화기

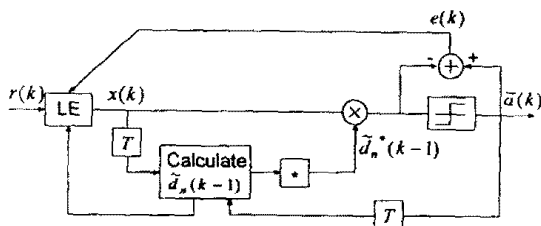


그림 3. 변형 선형 제한 등화기

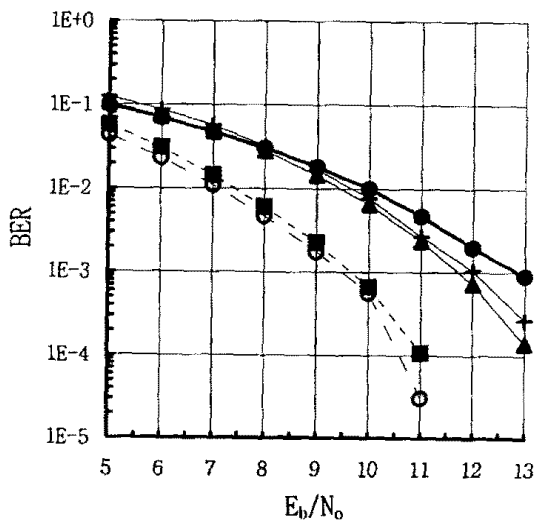


그림 4. 채널 A에서의 E_b / N_o 에 대한 비트오율 (■ MLFE, ▲ MLE, + LE, ○ DFE, ● VDFE)

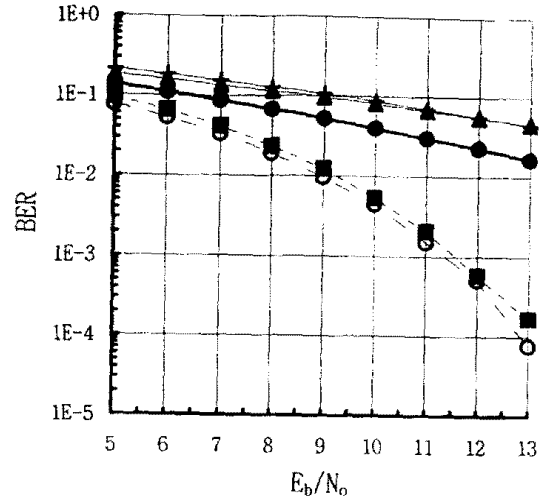


그림 5. 채널 B에서의 E_b / N_o 에 대한 비트오율 (■ MLFE, ▲ MLE, + LE, ○ DFE, ● VDFE)

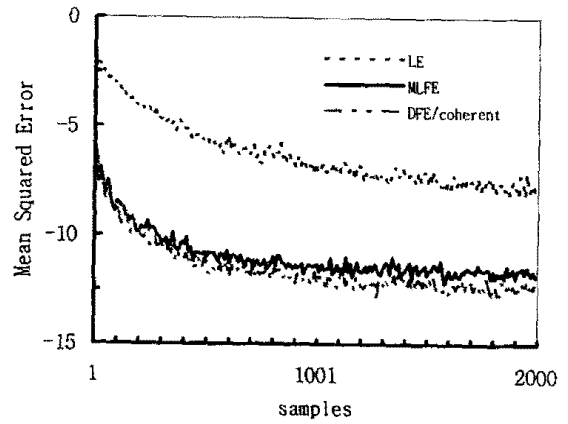


그림 6. MLFE 와 LE 및 DFE/coherent 의 수렴 및 MSE 특성 비교