
SOFM 자력등화를 이용한 와이브로 시스템 설계 방법

박진우* · 엄기환*

The Design Method of WiBro System Using the SOFM Blind Equalization

Jin-woo Park* · Ki-Hwan Eom*

요 약

와이브로는 OFDMA/TDD (Orthogonal frequency division multiple access / Time division duplexing) 기술을 기반으로 하는 고속 이동 인터넷 표준이고, IEEE802.16e 무선 MAN 표준 통합 버전의 하나이다. 본 논문에서는 SOFM 자력등화를 이용한 와이브로 시스템의 설계 방법을 제안하였다. 제안한 설계 방법은 Broadband 16 QAM 와이브로 시스템 수신단에 Busssgang 알고리즘을 이용한 SOFM 신경망 자력등화를 사용한다. 제안한 설계 방법의 유용성을 확인하기 위하여 MSE와 BER에 대하여 시뮬레이션 하였으며, 시뮬레이션 결과 제안한 SOFM 자력등화를 이용한 와이브로 시스템의 등화 성능은 기존의 와이브로 시스템보다 개선되었음을 확인하였다.

ABSTRACT

WiBro(Wireless Broadband Internet) is the standard of high-speed portable internet based on OFDMA/TDD techniques, and the subset of consolidated version of IEEE802.16e Wireless MAN standard. In this paper, we propose the design method of WiBro system using the SOFM Blind Equalization. Proposed design method used SOFM neural network blind equalization with Busssgang algorithms in the Broadband 16 QAM WiBro system receiver. To verificate the proposed design method usability, the MSE and the BER are simulated. The simulation results shown that is improved the equalization performances of the proposed WiBro system using the SOFM Blind equalization than the existing WiBro system.

키워드

WiBro, OFDMA, TDD, SOFM, Blind equalization

I. 서론

기존의 인터넷 접속 서비스는 서비스 종류에 따라 접속 장소의 고정성, 접속 속도와 단말기의 크기, 공간 제약등의 단점을 가지고 있다. 따라서 기존의 인터넷 서비스의 단점을 보완하면서 4세대 이동 통신으로 유비쿼터스 시대에 걸맞은 무선초고속 인터넷 서비스인 와이브로의 등장이 필요하게 되었다[1-2].

오늘날 와이브로 시스템은 인터넷 접속 서비스의 발달로 이동중에도 초고속 데이터 전송속도를 유지하면서 언제 어디서든지 접속이 가능하고 장애발생시 자체 복원능력이 뛰어난 시스템 개발이 필요하게 되었다 [2-3]. 또한 데이터 전송 시스템에선 정보 통신망의 발달로 데이터의 전송율이 높아지고 채널이 다차간 공유되는 상황에서 주파수 대역과 실시간 데이터 처리를 위해 송신단과 수신단 사이에 약속된 데이터를 주고 받을 수

없는 경우도 여러분야에서 발생하고 있다. 따라서 수신단의 입력 데이터를 이용하여 자체적으로 송신 데이터를 추정할수 있는 방법이 필요하게 되었고 이를 자력동화(Blind Equalization)라 한다[4].

자력 동화의 대표적인 알고리즘은 Busssgang 계열 알고리즘인데 Sato, Godard 알고리즘 등이 있다. Busssgang 계열 알고리즘은 비선형 함수를 이용하여 등화기 출력에서 송신 데이터를 추정한 후 추정치로 등화기의 계수를 조정하는 방법으로 등화한다[5].

최근 신호 처리, 디지털 통신, 제어 시스템등에서 신경망(Neural Network) 회로를 이용하는 새로운 시스템들을 많이 제안하고 있다[6-7].

신경망은 학습 방법에 따라 크게 지도학습 신경망과, 자율학습 신경망으로 구분된다. 전자의 대표적인 경우인 MLP(Multi Layer Perceptron)는 출력 데이터와 원래의 송신 데이터간의 차이를 감소시키는 방향으로 학습하므로 개념은 적응등화 기법과 같지만, 후자의 대표적인 경우인 SOFM(Self-Organizing Feature Maps)은 자체 학습에 의해 수신 신호를 크기와 위상이 고려된 송신 데이터 형태인 직교좌표로 분류하므로 자력동화 개념과 비슷하다[7].

본 논문에서는 수신단에 입력된 데이터의 왜곡현상을 보상하기 위해 SOFM 자력동화를 이용한 와이브로 시스템 설계 방법을 제안한다. 제안한 방법은 Broadband 16 QAM 와이브로 시스템 수신단에서 SOFM 신경망을 이용하여 채널을 통과한 왜곡 QAM 수신 데이터를 전처리한 다음 기존의 Busssgang 계열 알고리즘에 의해 송신 데이터를 추정한다. 따라서 채널을 통과한 데이터는 시간 지연요소로 인해 데이터 왜곡현상인 ICI(Inter Carrier Interference)가 발생하는데 이 ICI를 사전 보상하기 위해 수신단에서 SOFM 자력동화를 이용하여 전처리한다.

제안하는 설계방법의 유용성을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 통하여 MSE(Mean Square Error)와 BER(Bit Error Rate)에 대하여 기존의 와이브로 시스템과 비교 검토한다.

II. 와이브로 시스템

와이브로 시스템은 IEEE 802.16e 표준을 기반으로 제 공하는 이동 광대역 무선 서비스이다[1]. 표 1은 와이브

로 시스템 변수들이다[2].

표 1. 와이브로 시스템 파라미터
Table 1. WiBro system parameters

와이브로 시스템 파라미터	파라미터 값
주파수	2.3 ~ 2.4 GHz
대역폭	8.75 MHz
샘플링 주파수 (Fs)	10 MHz
샘플링 간격 (1/Fs)	100 nsec
FFT 크기 (NFFT)	1024
부반송파 주파수 간격	9.765625 KHz
유효심벌 시간 (Tb=1/Δ f)	102.4 μ sec
CP 시간 (Tg=Tb/8)	12.8 μ sec
OFDMA 심벌 시간 (Ts=Tb+Tg)	115.2 μ sec
TDD 프레임 길이	5 msec
프레임당 심볼수	42(DL:27,UL:15)
DL/UL 구성비율	1:1, 2:1, 5:1
이동성	120 Km/h 이하

CP:cyclic prefix DL:하향구간 UL:상향구간

2.3GHz~2.4GHz 주파수 대역에서 10MHz 채널 대역 폭을 지원하는 OFDMA/TDD 기술을 채택하여 무선으로 광대역 접속을 가능하게 한다.

와이브로 시스템의 OFDMA 변환 심볼의 시간영역 구조는 그림 1 과 같다.

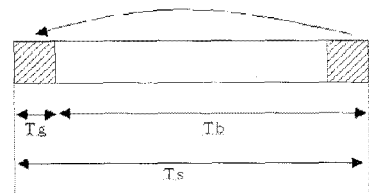


그림 1. OFDMA 변환 심볼 시간영역 구조
Fig. 1 Time mode scheme of OFDMA transform symbol

OFDMA 파형을 푸리에 역변환을 통해 시간 영역으로 변환하고 이때 유효 심벌 시간을 Tb 라고 하면, Tb/8 을 CP(Cyclic Prefix)라 하여 OFDMA 변환 신호의 맨 앞에 위치하게 한다. CP는 신호의 직교성(Orthogonal)을 유지하는 역할과 동시에 다중경로(Multipath)의 정보를 알려주는 역할을 하며 수신단에서 제거한다.

다음 그림 2는 TDD 영역에서 하향구간과 상향구간의 프레임 구조이다[2].

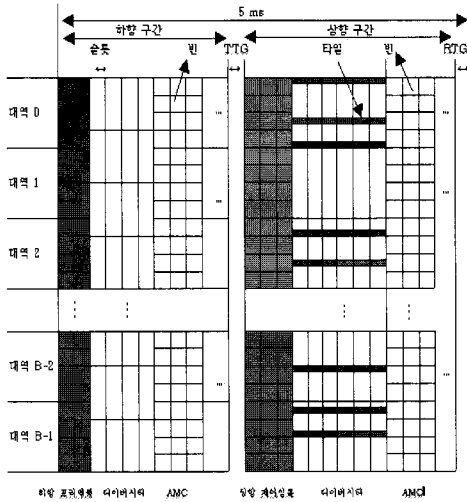


그림 2. TDD 영역에서 프레임 구조
Fig. 2 Frame scheme of TDD mode

TDD 모드의 하향구간과 상향구간은 전송시간으로 구분된다. 하향구간 전송은 2개의 프리앰블 심볼과 데이터 심볼 순서로 시작되고 상향구간 전송은 3개의 제어 심볼 전송부터 시작된다.

III. SOFM 자력 등화

3.1 자력 등화

다음 그림 3은 자력 등화 블록도이다[4-5].

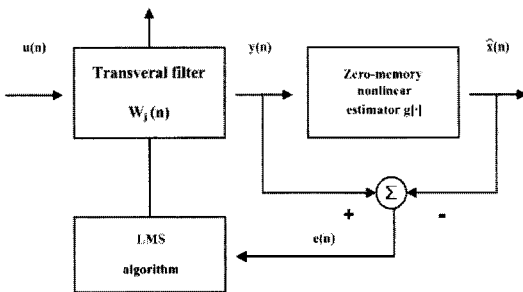


그림 3. 자력 등화 블록도
Fig. 3 Blind equalization block diagram

그림 3은 수신 왜곡 데이터 $u(n)$ 이 등화 과정을 거쳐 송신 데이터 $x(n)$ 의 추정치인 $\hat{x}(n)$ 을 출력해 가는 과정을 보여준다. 수신 왜곡 데이터 $u(n)$ 은 등화기를 통과하여 다음과 같이 출력된다.

$$y(n) = \sum_{i=-L}^L w_i(n) u(n-i) \quad (1)$$

필터 탭 계수 $w_i(n)$ 은 다음과 같다.

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \mu u(n-i)e(n) \quad (2)$$

$$i = 0, \pm 1, \dots, \pm L$$

$$\text{여기서, } e(n) = y(n) - \hat{x}(n) \quad (3)$$

이며, μ 는 스텝 크기를 나타내는 파라미터이다.

식(1)-(3)의 실현은 그림 4와 같다[4].

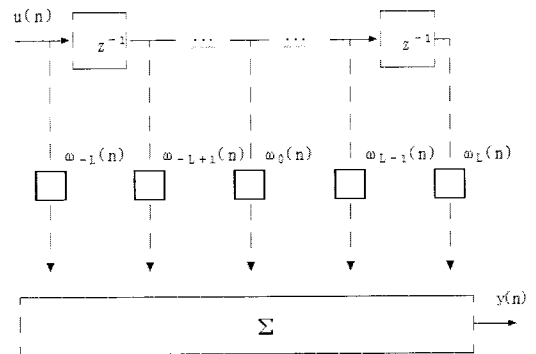


그림 4. 트랜스버설 필터
Fig. 4 Transversal Filter

송신 데이터를 $x(n)$ 이라 하면, $x(n)$ 은 채널을 통과한 후 수신 입력 $u(n)$ 이 되고, 수신 입력 $u(n)$ 은 Transversal Filter 를 통과하여 등화기 출력 $y(n)$ 이 되므로 $y(n)$ 에서 $x(n)$ 의 추정치 $\hat{x}(n)$ 을 얻기 위해 입·출력 관계가 다음과 같은 무기역성 비선형 함수를 이용한다.

$$\hat{x}(n) = g[y(n)] \quad (4)$$

윗 식에서 $\hat{x}(n)$ 을 구하는 비선형 함수 $g[\cdot]$ 를

Bussgang 계열 알고리즘이라 하며 대표적인 알고리즘은 다음과 같다.

3.1.1 Sato 알고리즘

Sato 알고리즘은 직교 좌표 각 사분면에 대표되는 한 신호를 기준으로 대표 신호와 등화기 출력과의 차이를 이용하여 등화기 탭 계수를 갱신하는 축소 신호군 알고리즘이다[5].

Sato 알고리즘에서 $\hat{x}(n)$ 은 다음식과 같다.

$$\hat{x}(n) = \gamma \operatorname{sgn}[y(n)] \quad (5)$$

$$= \begin{cases} \gamma & y(n) > 0 \\ -\gamma & y(n) < 0 \end{cases}$$

여기서

$$\gamma = \frac{E[x^2(n)]}{E[|x(n)|]} \quad (6)$$

이며, 식(5)를 식(3)에 대입하면 다음과 같고

$$e(n) = y(n) - \gamma \operatorname{sgn}[y(n)] \quad (7)$$

윗 식을 식(2)에 대입하여 탭 계수를 조절한다.

이 알고리즘의 특징은 탭 계수가 단순하게 이루어지므로 송신 데이터열의 확률 밀도 함수가 균일하지 않으면 자력 등화 성능을 보장할 수 없는 단점이 있지만, 일단 수렴하게 되면 잔류 오차가 줄어드는 장점이 있다[5].

3.1.2 Godard 알고리즘

Godard 알고리즘은 비선형 함수 $g[\cdot]$ 가 반경이 일정한 원의 형태로 원과 등화기 출력간의 가장 가까운 거리를 찾아서 이 값을 오차로 이용하여 등화기 탭 계수를 갱신하는 등 반경 알고리즘이다. 이 경우 수렴특성이 우수한 비블록 함수는 다음식과 같다[5].

$$J_2(n) = E[(|y(n)|^2 - R_2)^2] \quad (8)$$

여기서

$$R_2 = \frac{E[|x(n)|^4]}{E[|x(n)|^2]} \quad (9)$$

이때 오차는 다음과 같다.

$$e(n) = y(n)|y(n)|^{p-2}(R_p - |y(n)|^p)$$

$$= y(n)(R_2 - |y(n)|^2) \quad (10)$$

윗 식을 식(2)에 대입하여 탭 계수를 조절한다.

이 알고리즘의 특징은 비용 함수가 원형이므로 수신단에서 정확한 위상의 복원없이도 동작이 가능하며 다른 Bussgang 알고리즘에 비해 수렴 속도가 빠르다. 그러나 등화기가 수렴한 후에는 잔류 오차가 큰 단점이 있다[5].

3.2 제안하는 SOFM 자력 등화

그림 5는 송신 데이터가 16 QAM 인 경우 SOFM의 일반적인 구조이다[6-7].

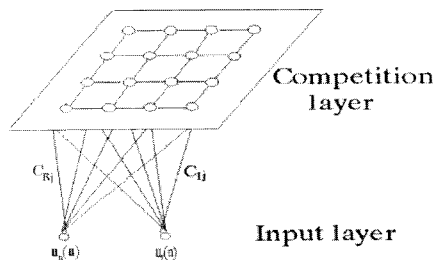


그림 5. SOFM
Fig. 5 SOFM

송신 데이터가 16 QAM 이므로 경쟁층 노드수는 16 이고 x, y 직교좌표를 나타낼 수 있는 입력수는 2 이다.

그림 5에서 왜곡 수신 데이터 $u(n)$ 는 실수 부분과 허수 부분으로 나뉘어져 2개의 입력 노드 $u_R(n)$ 및 $u_I(n)$ 에 인가된다. $u_R(n)$ 및 $u_I(n)$ 은 경쟁층 각 노드와 개별 연결되고, 경쟁층 노드 가중치 c_{Ri} 및 c_{Ii} 에 대해 학습한다. 학습의 기본은 수신 데이터 $u(n)$ 와 경쟁층 노드 가중치간의 유클리드 거리가 가장 적은 노드를 경쟁층 노드에서 승자 노드로 결정하고,

이 노드의 가중치를 출력한다. 승자 노드 가중치는 가장 많이 갱신하고 승자 노드를 중심으로 이웃 반경에 따라 이웃 노드 가중치를 차등 갱신한다. 따라서 수신 데이터 $u(n)$ 의 패턴은 16개 경쟁층 노드 가중치에 대해 균일하게 학습을 진행하면서 크기와 위상이 고려된 직교좌표 형태 16개 군으로 분류된다.

그림 5의 SOFM을 이용한 제안하는 자력등화 블럭도는 그림 6과 같다.

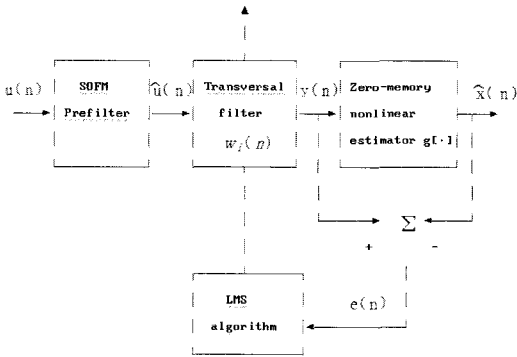


그림 6. 제안하는 SOFM 자력 등화 블럭도
Fig. 6 Proposed SOFM Blind equalization block diagram

제안하는 방식은 자력등화의 전처리 과정으로 SOFM을 사용한다. 따라서 왜곡 수신 데이터 $u(n)$ 로부터 다음을 출력한다.

$$\hat{u}(n) = S[u(n)] \quad (11)$$

여기서 $S[u(n)]$ 는 $u(n)$ 에 대한 SOFM 전처리 출력이다.

SOFM의 출력식은 그림 5를 이용하면,

$$\hat{u}(n) = \min \{ [u_R(n) - c_{Rj}(n)]^2 + [u_I(n) - c_{Ij}(n)]^2 \} \quad (12)$$

여기서 \min 은 입력 패턴에 대해 유클리드 거리가 가장 적은 SOFM 경쟁층 노드의 가중치 선택을 의미한다.

따라서 자력 등화의 출력은

$$y(n) = \sum_{i=1}^L w_i(n) \hat{u}(n-i) \quad (13)$$

이때 오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e(n) &= y(n) - \hat{x}(n) \\ &= y(n) - g[y(n)] \end{aligned} \quad (14)$$

IV. 시뮬레이션 및 검토

다음 그림은 기존의 와이브로 시스템 블럭도이다[2].

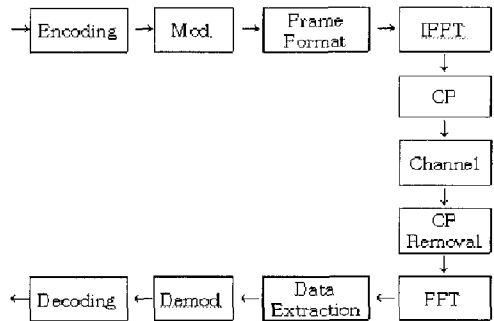


그림 7. 와이브로 시스템 블럭도
Fig. 7 WiBro system block diagram

그림 7은 송신단에서 랜덤한 QAM 변조 데이터를 발생하고 역 고속 푸리에 변환(IFFT)을 통해 주파수 영역의 데이터를 시간 영역의 데이터로 변환하였다. 와이브로 시스템은 실시간 동시 송·수신 방식으로 동작하고 보호구간인 CP를 동반하여 수신단에 데이터를 전송하며 수신단에선 이 CP를 제거하여 송신단 데이터 전송의 역과정을 수행한다.

본 논문에서는 기존의 와이브로 시스템 블럭도 수신단에 SOFM 전처리 자력 등화를 삽입하여 그림 8과 같이 새로운 와이브로 시스템을 설계하였다.

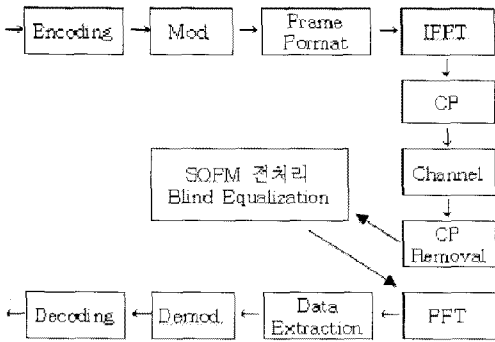


그림 8. 제안한 와이브로 시스템 블록도
Fig. 8 Proposed WiBro system block diagram

채널 모델은 60km/h 이상 120km/h 이하 고속 이동 차량에서도 사용가능한 ITU-R Vehicle-A 표준이다[8].

채널을 통과한 데이터는 시간 지연요소로 인해 데이터 왜곡현상인 ICI가 발생하는데 이 ICI를 보상하기 위해 수신단에서 SOFM 자력동화를 이용하여 전처리하였다.

왜곡된 수신 데이터 실수 부분과 허수 부분을 동시에 입력하기 위해서는 SOFM 입력 노드 수는 2개 이고 경쟁층 노드 수는 16개로 16 QAM 데이터가 각각 사상(Mapping) 되게 하였다. 따라서 각 노드의 가중치 수는 입력 노드 수와 경쟁층 노드 수의 곱이므로 $2 \times 16 = 32$ 가 된다.

이웃 반경내 노드들의 가중치는 다음식으로 갱신한다.

$$\begin{aligned} \Delta c_{Rj} &= \eta \Lambda(R, j^*) [u_{Rj}(n) - c_{Rj}(n)] \\ \Delta c_{Ij} &= \eta \Lambda(I, j^*) [u_{Ij}(n) - c_{Ij}(n)] \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 η 는 시간에 따라 감소하는 함수로 수렴율을 결정하며 식(16)을 사용했고, $\Lambda(i, j^*)$ 는 이웃 함수(neighborhood function) 로 식(17)과 같다.

$$\eta = 0.03 \left(1 - \frac{n}{10^4}\right) \quad (16)$$

$$\Lambda(R, j^*) = \exp\left(-\frac{|c_{Rj}(n) - c_{Rj^*}(n)|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (17)$$

$$\Lambda(I, j^*) = \exp\left(-\frac{|c_{Ij}(n) - c_{Ij^*}(n)|^2}{2\sigma^2}\right)$$

여기서 σ 는 이웃 반경 크기를 결정하는 파라미터 이고 학습이 진행됨에 따라 점차 감소한다.

$$\sigma = 40 \left(1 - \frac{n}{10^4}\right) \quad (18)$$

SOFM의 학습 시간을 빨리 유도하기 위해 경쟁층 노드의 초기 가중치를 원 데이터 크기인 $\pm 1, \pm 3$ 의 조합으로 설정 하였다.

수신단에서 자력동화 Transversal Filter의 탭 수는 채널 임펄스 응답 갯수의 2배 이상이고, 탭의 중앙을 중심으로 대칭이 되어야 하므로 11개로 사용하였으며 식(2)의 스태프 크기 μ 는 0.001로 선택 하였다. Sato 알고리즘에서 $\gamma = 2.5$ 를 사용하였고 Godard 알고리즘에서 $R_2 = 8.2$ 로 하였다. 시뮬레이션을 위해 10000개의 데이터를 사용하였고, 화이트 가우시안 잡음은 평균 0, 분산 0.1, 신호대 잡음비(SNR:Signal to Noise Ratio) 25dB를 부가 하였다. 송신단과 수신단간의 반송파와 심볼의 타이밍은 완벽하게 동기화되고 송신단 QAM 데이터 확률 밀도 함수의 균일분포와 전체 채널 정보는 수신기에 알려져 있는 것으로 가정하였다. 따라서 채널 추정을 위한 파일럿(Pilot) 신호는 사용하지 않았다.

제안한 설계 방법의 유용성 검증을 위해서 먼저 MSE에 대한 기존의 SATO 알고리즘, 기존의 GODARD 알고리즘, 제안한 SOFM-SATO 알고리즘 제안한 SOFM-GODARD 알고리즘의 등화 성능과 수렴 정도는 그림 9와 같다.

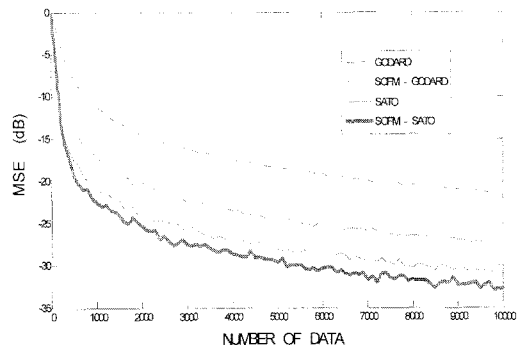


그림 9. SATO, GODARD, SOFM-SATO, SOFM-GODARD 알고리즘들의 MSE
Fig. 9 MSE of SATO, GODARD, SOFM-SATO and SOFM-GODARD algorithms

그림 9에서 기존의 SATO, 기존의 GODARD 알고리즘들에 비해 제안한 SOFM-SATO, 제안한 SOFM-GODARD 알고리즘들의 MSE에 대한 수렴성이 각각 3dB 와 6dB 정도 개선되었으므로 SOFM 자력등화가 수렴함을 알 수 있다. 또한 SOFM 학습이후 데이터들의 수렴까지 걸리는 전처리 시간은 그래프의 완만한 기울기가 확인되는 대략 2000 데이터 전후임을 알 수 있다.

위 그림에서 제안한 Sato 알고리즘은 수렴 후 잔류오차가 적고 제안한 Godard 알고리즘은 수렴속도가 빠른 특징을 보여주고 있다.

그림 9에서 제안한 알고리즘들의 자력등화가 수렴하고, 수렴성은 기존의 SATO, GODARD 알고리즘들에 비해 제안한 SOFM-SATO, SOFM-GODARD 알고리즘들의 우수함을 확인 하였다. 다음엔 MSE를 확인했던 동일한 조건으로 에러 검출 정도에 대해 BER를 통해 기존의 와이브로 시스템과 제안한 SOFM 자력등화 와이브로 시스템들을 비교하였으며 시뮬레이션 결과는 그림 10과 같다.

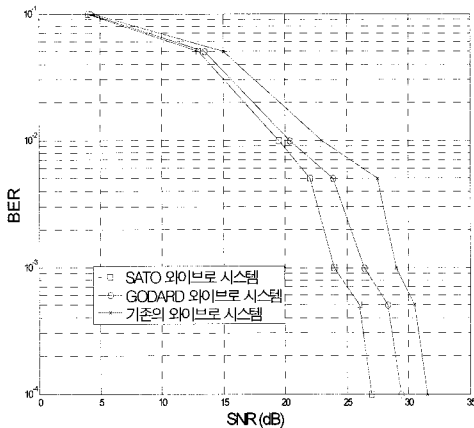


그림 10. 와이브로 시스템들의 BER 비교
Fig. 10 BER comparison of WiBro systems

그림 10은 제안한 SOFM-SATO 알고리즘을 이용한 자력등화 와이브로 시스템, 제안한 SOFM-GODARD 알고리즘을 이용한 자력등화 와이브로 시스템과 기존의 와이브로 시스템에 대해 에러 검출 성능을 BER를 기준으로 SNR을 비교하였다. 그림과 같이 제안한 SOFM 자력등화 와이브로 시스템들의 에러 검출율이 기존의 와이브로 시스템보다 우수함을 보여주고 있다.

표 2는 그림 10에 대한 제안한 SOFM 자력등화 와이브로 시스템들과 기존의 와이브로 시스템의 BER에 대해 SNR을 비교한 값이다.

표 2. 와이브로 시스템들의 BER 비교
Table 2. BER comparison of WiBro systems

BER	SOFM SATO SNR (dB)	SOFM GODARD SNR (dB)	기존의 와이브로 SNR (dB)
10 ⁻²	19.5	20.5	23
10 ⁻³	24	26.5	29
10 ⁻⁴	27	29.5	31.5

V. 결 론

본 논문에서는 전송 중에 발생하는 왜곡 데이터들을 송신측 데이터 형태인 직교 형태로 크기와 위상을 변화시키는 SOFM 신경망 자력 등화를 이용한 와이브로 시스템 설계방식을 제안하였다.

제안한 SOFM 자력등화 와이브로 시스템들은 신경망 구조의 단순함으로 인해 학습시간이 짧고 병렬처리가 가능하기 때문에 고속처리 할 수 있으며 시스템 용량의 변화가 크게 없는 특징이 있다. 따라서 자율 학습을 통해 직교형태의 데이터로 분류하고 자력 등화로 인해 왜곡된 QAM 데이터를 등화함으로써 장소에 구애받지 않고 실시간 고속데이터를 처리하는 시스템에 적합하다.

제안한 설계 방법의 유용성을 확인하기 위하여 기존의 방법과 MSE와 BER에 대하여 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션 결과 먼저 채널을 통과하면서 왜곡된 QAM 데이터는 SOFM 전처리 과정을 통해서 일정한 보상된 형태로 자력 등화 Bussgang 계열 알고리즘에 의해 등화가 되었고, 제안한 알고리즘들의 자력등화후 수렴성이 우수함을 확인하였다. 또한 제안한 SOFM 자력등화 와이브로 시스템들의 BER이 10⁻⁴ 인 경우 제안한 SOFM-SATO 알고리즘을 이용한 경우 SNR이 4.5dB와 제안한 SOFM-GODARD 알고리즘을 이용한 경우 SNR이 2dB 정도 에러 검출 능력 개선을 확인하였다.

참고문헌

- [1] TTA, "Specifications for 2.3GHz band Portable Internet Service : physical layer," June 2004.
- [2] Y. Peng et al. "Performance of Convolutional Turbo Coded High-speed Portable Internet (WiBro) System," VTC2007-spring IEEE 65th. 22-25 pp. 730-734, April 2007
- [3] X. Cai and G. Giannakis, "Bounding performance and suppressing intercarrier interference in wireless mobile OFDM," IEEE Trans. Commun., vol. 51, pp. 2047-2056, Dec. 2003.
- [4] Edward A.Lee, David G. Messerschmitt, "DIGITAL COMMUNICATION," Kluwer academic publishers, 2nd ed. 1994.
- [5] S. Haykin, "Blind Deconvolution," Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1994.
- [6] JACEK M. ZURADA, "Introduction to Artificial Neural Systems," WEST PUBLISHING COMPANY, 1992.
- [7] T. Kohonen et al. "Performance evaluation of Self-organizing map based neural equalizers in dynamic discrete signal detection," ICANN, 1991.
- [8] Recommendation ITU-R M.1225, "Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000", 1997.

저자소개

박진우(Jin-Woo Park)



1995년 동국대학교 전자공학과 공학 석사
2000년 동국대학교 전자공학과 공학 박사수료

1995년~현재 서울 교통방송 뉴미디어국 차장
※관심분야: 통신 시스템, WiBro, 방송 통신 융합

엄기환(Ki-Hwan Eom)



1972년 동국대학교 전자공학과 공학 석사
1986년 동국대학교 전자공학과 공학 박사

1994년~현재 동국대학교 전자공학과 교수
※관심분야: 통신전자제어, 센서 네트워크