

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.3.89>

IIBC 2016-3-12

## 고차 QAM 신호에 대한 결정 지향 오차 신호의 크기 값을 이용한 이중 모드 블라인드 등화 알고리즘의 성능 분석

### Performance Evaluation of a Dual-Mode Blind Equalization Algorithm Using the Size of Decision-Directed Error Signal for High-Order QAM Signals

정영화\*

Young-Hwa Jeong \*

**요 약** 본 논문에서는 결정 지향 오차 신호의 크기 값을 이용하여 두개의 블라인드 등화 알고리즘이 자동으로 전환 되는 이중 모드 블라인드 등화 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 등화초기에는 주로 큰 고정 스텝 크기를 가지는 MSAGF-SMMA를 통하여 보다 빠른 수렴 속도를 얻도록 하고, 어느 정도 등화가 이루어진 시점부터는 주로 가변 스텝 크기를 가지는 MSAGF-SMMA가 동작하도록 함으로써 정상상태에서 보다 작은 잔류 오차를 얻도록 하였다. 가변 스텝 크기는 고정 스텝 크기에 결정 지향 오차 신호의 크기 값을 곱하여 구한다. 본 논문에서 제안한 알고리즘에 대한 성능을 분석하였다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 제안한 알고리즘이 MMA, SMMA, 그리고 MSAGF-SMMA에 비해 정상상태에서의 잔류 심볼간 간섭과 잔류 오차 등에서 크게 향상된 성능을 가짐을 확인하였다.

**Abstract** In this paper, we propose a dual-mode blind equalization algorithm that two of the blind equalization algorithm using the size of the decision-directed error signal is automatically switched. The proposed algorithm has a faster convergence speed due to operation of the MSAGF-SMMA with large fixed step-size mainly in the initial equalization. After the equalization has been made to some extent, the proposed algorithm has a smaller residual error in the steady- state by operation of the MSAGF-SMMA with a variable step-size mainly. The variable step-size is determined by multiplying the size of the decision-directed error signal of a fixed step-size. In this paper, we analyze the performance of the proposed algorithm. The computer simulation results demonstrate that the proposed algorithm has a significantly improved performance in terms of a residual inter-symbol interference and residual error in the steady-state compared with the MMA, SMMA, and MSAGF-SMMA.

**Key Words** : MMA, MMA, SMMA, MSAGF-SMMA, dual-mode blind equalization, variable step-size

## 1. 서 론

대부분의 유선 케이블 및 무선과 광통신 시스템에서

고속 데이터 통신을 구현하기 위해서는 다중 경로 채널에서의 ISI(inter-symbol interference)로 부터 야기되는 수신된 신호의 위상과 크기에 대한 왜곡 문제를 해결해

\*정희원, 남서울대학교 정보통신공학과  
접수일자 : 2016년 5월 3일, 수정완료 : 2016년 6월 3일  
게재확정일자 : 2016년 6월 10일

Received: 3 May, 2016 / Revised: 3 May, 2016 /

Accepted: 10 June, 2016

\*Corresponding Author: ykjeong@nsu.ac.kr

Dept. of Information & Communication, Namseoul University, Korea

야 한다. 블라인드 등화는 이러한 ISI의 영향을 제거하는 데 있어서 매우 강력한 해결 방법이라 할 수 있다. 이 방법은 데이터- 의존 등화 방법과는 달리 훈련 열 데이터를 추가로 부가하지 않아도 된다는 점에서 큰 차별성을 가진다. 널리 알려진 블라인드 등화 알고리즘으로는 CMA<sup>[1]</sup>, MMA(multi-modulus algorithm)<sup>[2]</sup>, MCMA<sup>[3]</sup> 등이 있다. CMA는 초기 등화 시 빠른 눈 열림의 장점을 가지나 등화 후 위상 회전된 신호 점을 보상하기 위해 추가적인 위상 회전 보상을 필요로 한다는 단점을 가지고 있다. 이후 제안된 MMA나 MCMA는 CMA 알고리즘을 실수 영역과 허수 영역으로 나누어 적용함으로써 신호점의 위상 회전 문제를 해결하였다. 그러나 이 알고리즘들은 모두 원 신호점과의 불일치로 인한 misadjustment 문제를 가지고 있다. 이러한 misadjustment 문제는 등화 후 정상상태에서 큰 잔류 오차를 가지는 원인이 된다. S. Abar와 R.A. Axford는 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 SMMA(sliced multi-modulus algorithm)<sup>[4]</sup>를 제안하였다. 이 알고리즘은 MMA에서 사용되는 dispersion 상수에 가중치를 부가한 방법으로 원 신호점과의 불일치 문제를 상당히 경감시켰다. 그러나 이 방법 역시 등화 후 정상상태에서의 잔류 오차를 크게 줄이지는 못하였다.

본 논문에서는 SMMA 알고리즘에 등화 수렴 속도를 더욱 강화할 수 있는 MSAG-SMMA<sup>[5]</sup>와 정해진 범위의 수렴 영역에 등화 신호가 들어 왔을 때 보다 작은 잔류 오차를 가질 수 있도록 가변 스텝 크기를 가지는 MSAG-SMMA가 특별히 정해진 결정 지향 오차 신호(decision-directed error signal)<sup>[6]</sup> 크기 값의 범위에 따라 자동으로 전환되는 이중 모드 블라인드 등화 알고리즘을 제안한다. 보통 Busgang 계열의 블라인드 등화 알고리즘<sup>[7]</sup>은 등화 속도를 빠르게 하기 위해서 고정 스텝 크기를 크게 하면 정상상태에서 잔류 오차가 크게 되거나 발산하게 되고, 작게 하면 정상상태에서 잔류 오차는 작게 되지만 등화 속도는 느리게 되는데, 제안한 알고리즘에서는 고정 스텝 크기에 결정 지향 오차 신호의 크기 값을 곱하여 구한 가변 스텝 크기를 적용함으로써 등화 초기에서의 빠른 수렴 속도와 정상상태에서의 작은 잔류 오차 모두를 가지는 성능을 얻을 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 컴퓨터 모의실험을 통하여 256-QAM 신호에 대해서 제안한 알고리즘이 MMA, SMMA, 그리고 MSAGF-SMMA과 비교하여 우수한 특성을 가짐을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서 SMMA와 MSAGF-SMMA를 소개하고, III장에서 제안한 결정지향 오차 신호의 크기 값을 이용한 이중모드 블라인드 등화 알고리즘을 설명한다. IV장에서는 컴퓨터 모의실험 결과를 통하여 제안한 알고리즘과 MMA, SMMA, 그리고 MSAGF-SMMA와의 성능을 비교, 분석한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. SMMA와 MSAGF-SMMA

### 1. SMMA

SMMA(sliced multi-modulus algorithm)는 constant modulus 알고리즘 부류의 블라인드 등화 알고리즘들이 근본적으로 가지는 원신호점과의 misadjustment 문제를 해결하기 위하여 제안된 많은 연구들 중의 하나이다<sup>[4]</sup>.

SMMA의 비용함수는 MMA의 dispersion 상수  $R_{SMMA,R}$  과  $R_{SMMA,I}$  에 가중치를 부가함으로써 구할 수 있으며, 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$J = E[(y_R^2(n) - |\hat{a}_R(n)|^c R_{SMMA,R})^2] + E[(y_I^2(n) - |\hat{a}_I(n)|^c R_{SMMA,I})^2] \quad (1)$$

SMMA는 등화 결과  $y(n)$ 에 대해서 가장 가까운 신호점 심볼(constellation symbol)로 결정되는 결정 장치 출력의 절대값  $|\hat{a}_R(n)|^c$  과  $|\hat{a}_I(n)|^c$  를 dispersion 상수  $R_{SMMA,R}$  과  $R_{SMMA,I}$ 에 대한 가중치로 사용하였다. 여기서  $c$ 는  $c \leq 1$ 인 양의 상수이다.

dispersion 상수  $R_{SMMA,R}$  와  $R_{SMMA,I}$ 는 식 (2)로 각각 정의된다<sup>[4]</sup>.

$$R_{SMMA,R}^2 = \frac{E[a_R^4(n)]}{E[|a_R(n)|^{2+c}]} \quad R_{SMMA,I}^2 = \frac{E[a_I^4(n)]}{E[|a_I(n)|^{2+c}]} \quad (2)$$

식 (2)에서  $c=0$  일때 SMMA의 dispersion 상수는 MMA의 dispersion 상수와 같게 된다. 즉 이때 SMMA가 MMA와 동일하게 동작하게 된다는 의미이다.

SMMA의 탭 갱신 알고리즘은 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) - \mu e_{SMMA}(n) \mathbf{x}^*(n) \quad (3)$$

여기서 SMMA 오차 신호  $e_{SMMA}(n)$ 의 실수와 허수성분은 식 (4)로 구해진다.

$$\begin{aligned} e_{SMMA,R}(n) &= (y_R^2(n) - |\hat{a}_R(n)|^c R_{SMMA,R}) y_R(n) \\ e_{SMMA,I}(n) &= (y_I^2(n) - |\hat{a}_I(n)|^c R_{SMMA,I}) y_I(n) \end{aligned} \quad (4)$$

## 2. MSAGF-SMMA

MSAGF-SMMA(modified stop-and-go flagged-SMMA)는 SMMA의 오차 신호와 결정지향(decision-directed) 알고리즘의 오차 신호와의 음양부호에 대한 비교로 부터 얻어지는 이진 flag  $f_{MSAG,R}$  과  $f_{MSAG,I}$  를 SMMA 탭 갱신 식에 적용한 알고리즘이다<sup>[5]</sup>. 이 알고리즘은 매우 빠른 정상상태로의 수렴 속도를 가진다.

실수부 flag,  $f_{MSAG,R}$  과 허수부 flag,  $f_{MSAG,I}$  는 각각 식 (5)로 정의된다.

$$\begin{aligned} f_{MSAG,R} &= \begin{cases} 1 & \text{if } \text{sgn}(e_{SMMA,R}(n)) = \text{sgn}(e_{DD,R}(n)) \\ 0 & \text{if } \text{sgn}(e_{SMMA,R}(n)) \neq \text{sgn}(e_{DD,R}(n)) \end{cases} \\ f_{MSAG,I} &= \begin{cases} 1 & \text{if } \text{sgn}(e_{SMMA,I}(n)) = \text{sgn}(e_{DD,I}(n)) \\ 0 & \text{if } \text{sgn}(e_{SMMA,I}(n)) \neq \text{sgn}(e_{DD,I}(n)) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $e_{DD,R}(n)$ 와  $e_{DD,I}(n)$ 는 결정지향 알고리즘의 오차 신호<sup>[6]</sup>를 나타내며,  $\text{sgn}(\cdot)$ 은 signum 함수를 나타낸다.

MSAGF-SMMA의 탭 갱신 식은 식 (6)으로 정의된다.

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) - \mu e_{MSAGF-SMMA}(n) \mathbf{x}^*(n) \quad (6)$$

여기서 MSAGF-SMMA 오차 신호  $e_{MSAGF-SMMA}(n)$ 의 실수와 허수성분은 식 (7)와 같다.

$$\begin{aligned} e_{SMMA,R}(n) &= f_{MSAG,R} (y_R^2(n) - |\hat{a}_R(n)|^c R_{SMMA,R}) y_R(n) \\ e_{SMMA,I}(n) &= f_{MSAG,I} (y_I^2(n) - |\hat{a}_I(n)|^c R_{SMMA,I}) y_I(n) \end{aligned} \quad (7)$$

## III. 제안한 결정지향 오차 신호의 크기 값을 이용한 이중모드 블라인드 등화 알고리즘

제안한 결정지향 오차 신호의 크기 값을 이용한 이중모드 블라인드 등화 알고리즘은 고정 스텝 크기를 가지고 MSAGF-SMMA를 수행하도록 하느냐, 아니면 가변 스텝 크기를 가지고 MSAGF-SMMA를 수행하도록 하느냐 하는 판단의 기준으로 결정 지향 오차 신호의 크기 값을 이용한다. 그 크기 값이  $0 < \lambda < 1$ 으로 정의되는 임계값  $\lambda$ 보다 크면 고정 스텝 크기를 가지는 MSAGF-SMMA를 수행하고, 임계값  $\lambda$ 보다 작거나 같으면 가변 스텝 크기를 가지는 MSAGF-SMMA를 수행하도록 고안하였다. 등화 초기에는 대부분 결정 지향 오차 신호의 크기가 임계값보다 크기 때문에 고정 스텝 크기를 가지는 MSAGF-SMMA가 주로 동작하게 되는데, 이때 매우 빠른 정상상태로의 수렴속도를 가지게 된다. 어느 정도 등화가 이루어져서, 눈 패턴 모양으로 보았을 때 눈이 열린 시점부터는 정상상태에서의 잔류 오차를 줄이기 위하여 적용된 가변 스텝 크기를 가지는 MSAGF-SMMA가 주로 동작하게 된다. 이때 고정 스텝 크기를  $\mu_{upper}$ 로 하였을 때 가변 스텝 크기는  $\mu_{upper}$ 가 결정 지향 오차 신호의 크기  $|e_{DD}(n)|$  값에 따라 변하도록 하였다. 이 가변 스텝 크기  $u_{upper}|e_{DD}(n)|$ 는  $\mu_{upper}$ 보다 작은 값을 가지며, 등화 후 신호점이 원 신호점에 가까울수록 그 크기는 매우 작게 됨에 따라 탭 갱신 값 역시 크게 변화가 없게 되어 안정적인 정상 상태를 유지하게 된다. 따라서 빠른 수렴속도와 더불어 정상상태에서의 매우 작은 잔류 오차를 동시에 가지는 블라인드 등화 알고리즘을 구현 할 수 있다.

$|e_{DD}(n)| = |y(n) - \hat{y}(n)|$ 로 나타낼 수 있으며,  $y(n)$ 은 등화 결과 신호이고  $\hat{y}(n)$ 은 추정된 심볼 신호 값이다.

제안한 알고리즘의 오차 신호  $e_{DM-MSAGF-SMMA}(n)$ 의 실수와 허수성분은 MSAGF-SMMA의 오차 신호  $e_{MSAGF-SMMA}(n)$ 의 실수와 허수성분과 같으며, 따라서 제안한 알고리즘의 탭 갱신 식은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.



SMMA에서  $R_{SMMA,R}^2, R_{SMMA,I}^2$  값은 각각 식 (5)에 따라 12.733으로 하였다.

그림 2에서 MMA는 256-QAM 신호를 등화시키는데 15000번 정도의 반복횟수에서 정상상태에 들어가며, 평균적으로 -26.63dB 정도의 ISI 값을 가진다. SMMA는 13000번 정도의 반복횟수에서 -32.27dB 정도의 ISI 값을 가지며 정상상태를 유지함을 보인다. MSAGF-SMMA는 7350번 정도의 반복횟수에서 -38.45dB 정도의 ISI 값을 가지며 정상상태로 들어감을 보인다. 이와 비교해서 제안한 알고리즘은 MSAGF-SMMA와 같은 -38.45dB에 도달하는데 6660번 정도의 반복횟수가 필요하며, 7600번 정도의 반복횟수에서 -50dB를 넘어선다. 7990번 정도의 반복횟수에서 -50.6dB의 ISI 값을 가지며 정상상태를 유지한다. 평균적인 ISI값은 -50.66dB를 보인다. 그림 2를 통하여 제안한 알고리즘은 정상상태에서 MMA 알고리즘 보다는 24.03dB 정도, SMMA 보다는 18.39dB 더 작은 ISI 값을 가짐을 알 수 있으며, MSAGF-SMMA와 비교하면 12.21dB정도 더 작은 ISI 값을 가진다. 수렴 속도 면에서 살펴보면 MMA보다 7010 반복횟수 정도, SMMA보다는 5010 반복횟수 정도, 그리고 MSAGF-SMMA와 비교하였을 때 동일한 ISI 값까지는 제안한 알고리즘이 690 반복횟수 정도 더 빠르나, 정상상태에 들어서는 시점으로 비교해 본다면 제안한 알고리즘이 640 반복횟수 정도 느리다.

그림 3-(a)와 그림 3-(b)는  $\lambda = 0.35$ 로 하였을 때 반복 횟수에 따른 결정 지향 오차 크기  $|e_{DD}(n)|$  의 값의 변화와 그림 3-(a)를 반복 횟수 4000에서 8000 사이로 확대하여 본  $|e_{DD}(n)|$  의 값의 변화를 나타낸다. 그림 3-(a)와 (b)를 통하여 등화가 시작된 뒤 눈 패턴이 완전히 열리기 전까지  $|e_{DD}(n)|$  는 주로 1보다 큰 값을 가지다가, 눈 패턴이 완전히 열린 정상상태에서는 모두 0.3보다 작은 값 내에서 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 등화초기에는 주로 고정 스텝 크기  $\mu_{upper}$  가 등화 계수를 갱신하는데 사용되어 빠른 수렴 속도를 가지는데 공헌을 하지만 눈 패턴이 완전히 열린 후의 정상상태에서는  $\mu_{upper}|e_{DD}(n)|$  값이 등화 계수를 갱신하는데 사용됨으로써 등화 계수 갱신의 폭이 크지 않도록 조절하며, 이것은 정상상태에서의 잔류 오차가 커지지 않도록 하는 역할을 한다.

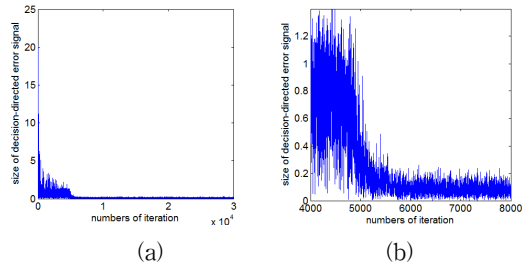


그림 3. 반복 횟수에 따른 결정 지향 오차 신호 크기  $|e_{DD}(n)|$  의 값의 변화( $\lambda = 0.35$  일때)

- (a)  $\lambda = 0.35$ 로 하였을 때 반복 횟수에 따른 결정 지향 오차 신호 크기  $|e_{DD}(n)|$  의 값의 변화
- (b) (a)를 확대하여 본 결정 지향 오차 신호 크기  $|e_{DD}(n)|$  의 값의 변화

Fig. 3. Change in the size of the decision-directed error signal  $|e_{DD}(n)|$  corresponding to numbers of iteration  $\lambda = 0.35$

- (a) Change in the size of the decision-directed error signal  $|e_{DD}(n)|$  corresponding to numbers of iteration when  $\lambda = 0.35$ .
- (b) Change in the size of the error decision-directed error signal  $|e_{DD}(n)|$  by expanding (a)

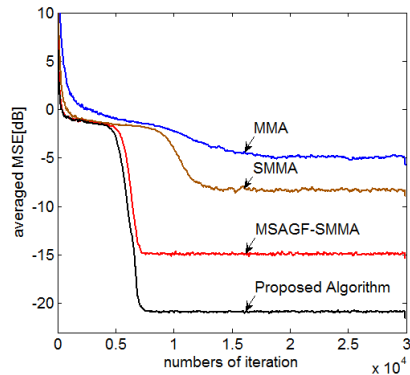


그림 4. 256-QAM 신호에 대한 estimated estimated MSE의 비교

Fig. 4. A comparison of an estimated ensemble MSE for 256-QAM signal

그림 4에서는 각각의 알고리즘에 대한 estimated ensemble MSE값들의 비교를 보인다. MMA는 평균적으로 -4.80dB, SMMA는 -8.31dB, MSAGF-SMMA는 -14.90dB, 그리고 제안한 알고리즘은 정상상태에서 -20.87dB의 MSE 값을 가짐을 보인다.

그림 4에서 제안한 알고리즘은 MMA보다 16.06dB정도, SMMA 보다는 12.56dB정도, 그리고 MSAGF-

SMMA 보다는 5.97dB정도 더 작은 MSE 값을 가짐을 보인다.

그림 5에서 블라인드 등화 알고리즘들에 대한 등화 결과 신호점도를 보인다. 그림 5-(a)에서 등화 전 신호점도를 보이고, 5-(b)에서 MMA, 5-(c)에서 SMMA, 5-(d)에서 MSAGF-SMMA, 5-(e)에서 제안한 알고리즘에 대한 등화 결과 신호점도를 각각 보인다.

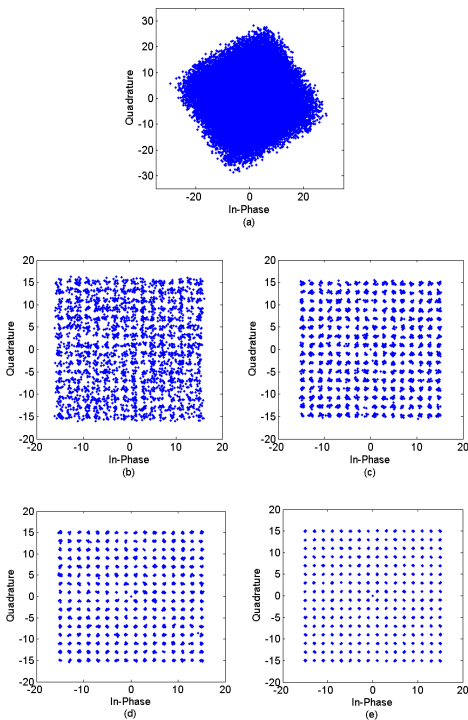


그림 5. 256-QAM 신호에 대한 신호점도  
(a) 등화 전 (b) MMA (c) SMMA (d) MSAGF-SMMA  
(e) proposed algorithm

Fig. 5. A constellation for 256-QAM signal  
(a) Before an equalization (b) MMA (c) SMMA  
(d) MSAGF-SMMA (e) proposed algorithm

## V. 결론

본 논문에서는 MSAGF-MMA에 결정지향 오차의 크기에 따라 여러 개의 구간을 설정하고 각각의 구간에 결정지향 오차 크기가 들어 왔을 때 구간마다 정해놓은 스텝 크기를 할당된 다중 스텝 크기를 가지는 LMS 알고리즘을 탭 갱신 식에 적용함으로써 성능을 크게 개선한 적응 블라인드 등화 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리

즘은 MMA나 MSAGF-MMA보다 훨씬 빠른 수렴속도를 가지며, MMA나 MSAGF-MMA보다 상대적으로 정상상태에서의 잔류 오차 특성을 크게 향상 시키도록 고안되었다.

컴퓨터 모의실험을 통하여 256-QAM 시스템에서 정상상태로의 수렴 속도 면에서 제안한 알고리즘 1과 비교했을 때 MMA보다 2.83배 더 빨랐으며, MSAGF-MMA와는 1.38배 더 빨랐다. MSAGF-MMA와 동일한 -37dB의 ISI에 도달하는데 있어서는 2300 반복 횟수정도를 빠른을 보인다. 한편 정상상태에서의 ISI 값은 제안한 알고리즘 1이 MMA와 MSAGF-MMA와 비교하여 각각 16.7dB와 6.6dB 정도 더 작았다. 양상불 평균 MSE 값은 제안한 알고리즘 1이 MMA와 MSAGF-MMA와 비교하여 각각 9.3dB와 1.6dB 정도 더 작았다. 이상과 같이 수렴속도와 잔류 심볼간 간섭양 그리고 평균 MSE 값을 종합하여 볼 때 제안한 알고리즘이 MMA나 MSAGF-MMA등의 적응 블라인드 등화 알고리즘의 성능을 크게 개선하였음을 확인할 수 있었으며, 특히 수렴 속도 면에서나 잔류 심볼간 간섭양면에서나 어느 쪽에 치우침 없이 뛰어난 성능을 가짐을 확인하였다.

## References

- [1] D.N. Golard, "Self-Recovering Equalization and Carrier Tracking in Two-Dimensional Data Communication Systems," *IEEE Trans, Commun.*, vol. COM-28, no. 11, pp. 1867-1875, Nov. 1980.
- [2] J. Yang, J.-J. Werner and G. A. Dumont, "The Multimodulus Blind Equalization algorithm," in Proc. 13th Int. Conf Digital Signal Processing, vol. 1, pp. 127-130, July 1997.
- [3] K.N. Oh and Y.O. Chin, "Modified Constant Modulus Algorithm: Blind Equalization and Carrier Phase Recovery Algorithm," Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Comm., vol. 1, Seattle, WA, pp. 498-502, June 1995.
- [4] S. Abrar, R.A. Axford, "Sliced Multi-modulus Blind Equalization Algorithm," *ETRI Journal*, Vol.27, No.3, pp.257-266, June 2005.
- [5] Y.H. Jeong, "Performance Analysis of SMMA

- Adaptive Blind Equalization Algorithm with A Flag," JIIBC, Vol.14, No.4, pp.71-76, Aug. 2014.
- [6] G. Picchi and G. Prati, "Blind Equalization and Carrier Recovery Using a "Stop-and-Go" Decision-Directed Algorithm," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-35, no.9, pp. 877-887, Sep. 1987.
- [7] F. Hermann and A. K. N, "Blind equalization-combinations of Bussgang and higher-order-statistics-based methods", Proc. IEE Colloq. Adaptive Signal Process. Mobile Commun. Syst., pp. 94, p. 12/1-6, 1997
- [8] O. Shalvi and E. Weinstein, "New Criteria for Blind Deconvolution of Nonminimum Phase Systems(Channels)," *IEEE Trans, Inform. Theory*, vol. IT-36, pp. 312-321, Mar. 1990.
- [9] S. Chen, T.B. Cook, and L.C. Anderson FIR equalizers," *Digital Signal Processing*, vol. 14, pp. 18-36, Jan. 2004
- [10] S. G. Lim, "The Comparison of the Adaptive Equalization Performance in MCMA Algorithm by the Weighting Factor," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC)*, VOL. 10 No. 4, pp.137-143, Aug. 2010.

## 저자 소개

### 정영화(정회원)



- 1984년 : 경희대학교 전자공학과 학사 졸업
- 1986년 : 경희대학교 전자공학과 석사 졸업
- 1998년 : 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 1994년 9월 ~ 현재 : 남서울대학교 정보통신공학과 교수

<주관심분야 : 전력선통신, 적응신호처리, 스마트그리드>

※ 본 연구는 2015학년도 남서울대학교 학술 연구지원비에 의하여 연구되었음.