

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.6.27>

JIIBC 2020-6-5

## 오차 신호의 비선형 함수를 이용하는 VS-CCA에서 적응을 위한 step 변화 속도값에 따른 등화 성능

### Equalization Performance according to the Step Change Speed Value for adaptation in VS-CCA using Nonlinear Function of Error Signal

임승각\*

Seung-Gag Lim\*

**요약** 본 논문에서는 오차 신호의 비선형 함수를 이용하는 VS-CCA (Varying Step-Compact Constellation Algorithm)에서 적응을 위한 step 변화 속도값에 따른 적응 등화의 성능을 비교하였다. VS-CCA 알고리즘은 16-QAM과 같은 nonconstant modulus 신호를 4개의 4-QAM constant modulus 신호군으로 compact화한 후, 송신 신호의 통계치인 고정 modulus를 이용하여 오차 신호를 발생하여 이의 비선형 함수를 이용하는 varying step으로 최소 비용 함수를 얻도록 적응 등화기의 탭 계수를 갱신한다. 이때 비선형 함수의 step 변화 속도값에 따라 순시 적응 step값이 결정되며, 이의 값에 따라 상이한 적응 등화 성능을 얻을 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다. step 변화 속도값에 따른 등화 성능 비교 지수로는 등화기 내부 지수와 외부 잡음에 대한 강인성을 나타내는 등화기 외부 지수를 사용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 정상 상태에서 변화 속도를 1.0보다 적게 할수록 모든 성능 지수에서 1.0보다 큰 경우 보다 우월해짐을 알 수 있었다.

**Abstract** This paper compare the adaptive equalization performance according to the values of adaptive step variation speed for adapting in VS-CCA (Variable Stepsize-Compact Constellation Algorithm) based on nonlinear function function of error signal. The VS-CCA algorithm compacts the 16-QAM nonconstant modulus signal into the 4 groups of 4-QAM constant modulus signal constellation in quadrature plane, then the error signal is generated using the constant modulus of transmitted signal statistics. The adaptive equalizer coefficient were updated in order to achieve the minimum cost function by varying step based on the nonlinear function of error signal. In this time, the instantaneous adaptive step is determined according to the value of step variation speed of nonlinear function and the different equalization performance were obtained according to the step variation speed value. The equalizer internal index and external index which represents the robustness of external noise were used for the performance comparison index. As a result of computer simulation, it was confirmed that the value of variation speed less than 1.0 give more superior in every performance index compared to the greater than 1.0 in steady state.

**Key Words** : VS-CCA, nonlinear function of error signal, constant modulus, residual isi, SER

\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공  
접수일자 2020년 11월 3일, 수정완료 2020년 11월 29일  
게재확정일자 2020년 12월 4일

Received: 3 November, 2020 / Revised: 29 November, 2020 / Accepted: 4 December, 2020

\*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

Dept. of Information and Communication, Kongju National University, Korea

## I. 서 론

대역폭 제한과 다중 경로 페이딩이 존재하는 유선과 무선 채널을 통한 고속, 광대역 정보의 신속, 정확한 전송 요구가 급격히 증가하고 있다. 무선 채널은 사용자의 편리성을 제공할 수 있어서 이를 이용하여 동영상의

멀티미디어, 의료 정보와 디지털 텔레비전과 케이블 방송의 분배 및 실시간 대화등 다양하게 이용되지만 인공, 자연 장애물에 의한 다중 경로에 의한 페이딩과 부가 잡음등에 의해 정보를 표현하는 신호 전송 측면에서 가장 열악한 매체이다. 최근의 정보 통신 서비스에서는 높은 스펙트럼 효율을 갖는 QAM과 같은 2차원 신호 방식을 적용한 무선 이동 통신 서비스로 변화하는 추세이다<sup>[2][6]</sup>. 실제 무선 전송 시스템에서 QAM 전송의 성공적인 응용 핵심에는 송신기에서 수신기로 신호를 전송할 때 발생하는 신호의 찌그러짐을 최소화할 수 있는 적응 등화기의 사용이 있으며, 고정 등화기를 더욱 복잡하고 복잡한 신호 처리에 의한 연산량의 증가에 의한 복잡도의 성능을 개선시킬 수 있다. 대역 제한 채널과 다중 경로 전파에 의해 발생하는 부호간 간섭을 줄일 수 있는 방법으로 등화기는 송수신기간에 사전 약속된 신호를 약속된 시간동안 학습 과정이 필요하다<sup>[2]</sup>. 그러나 학습열을 보내는 것이 불가능한 경우 등화기는 학습열에 의존하지 않고 부호간 간섭을 보상해야 하며, 이를 블라인드 등화라고 한다. 블라인드 등화를 위한 알고리즘으로는 CMA (Constant Modulus Algorithm), DDA (Decision Directed Algorithm), RCA (Reduced Constellation Algorithm) 등이 있다. CMA는 채널에서 발생하는 진폭만 보상이 가능하며 위상 복원이 불가능하며, DDA는 진폭과 위상의 동시 보상이 가능하지만 constant multilevel modulus 신호에 대해서 초기 수렴이 불확실하지만, 수렴 상태에서는 매우 우수한 성능이 보장되므로 다른 방식과 결합되어 이중 모드 형태로 사용된다<sup>[2][3]</sup>. 그러나 RCA는 CMA와 DDA의 단점을 개선할 수 있지만, 상대적으로 높은 misadjustment에 의한 등화 잡음이 발생되므로 이의 장단점을 절충시키기 위해 CCA (Compact Constellation Algorithm)가 등장했다<sup>[1]</sup>. 논문에서는 CCA 적응 등화기의 스텝 크기를 적응을 위한 비선형 특성을 갖는 오차 신호에 비례하여 조절시키는 VS-CCA에서 varying step 변화 속도에 따른 등화 성능에 대하여 비교하였다. 2 장에서는 적응 등화기를 적용한 시스템 모델을 설명한 후 3 장에서는 CCA 알고리즘과 varying stepsize 개념을 다룬다. 4 장에서는 시물

레이션의 과정 및 결과를 제시한 후 5 장에서는 결론을 내리겠다.

## II. 본 론

### 1. 시스템 모델

그림 1은 2차원 신호를 적용한 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서 16-QAM의 nonconstant modulus를 갖는 복소 형태의 신호  $s_k$ 를 송신하면 대역 제한과 부호간 간섭을 발생하는 임펄스 응답이  $h_k$ 인 채널을 통과하면서 잡음  $n_k$ 가 추가되어 수신된다.

$$r_k = s_k * h_k + n_k \quad (1)$$

식 (1)에서 \*는 convolution을 나타내며, 수신된  $r_k$ 는 응답이  $f_k$ 인 복소 적응 등화기에 입력되어 채널에 의한 부호간 간섭이 보상된  $z_k$ 를 얻는다. 이때 복소 적응 등화기의 탭 계수는 등화기 출력과 constant modulus에 의한 오차 신호와 적응 step size를 하여 얻게 된다. 또한 등화 출력 신호는 결정 장치를 통과하면서 송신 신호  $s_k$ 의 추정치인  $\hat{s}_k$ 를 얻게 된다.

$$z_k = r_k * f_k, \quad \hat{s}_k = \text{decision}(z_k) \quad (2)$$

$s_k \approx \hat{s}_k$ 가 되기 위한 적응 등화기의 응답  $f_k$ 와 채널의 임펄스 응답  $h_k$ 의 convolution은 임펄스 특성의 신호가 되어야 한다. 이를 위하여는  $f_k$ 는  $h_k$ 의 역함수 관계가 되어야 한다.

$$f_k * h_k = \delta_k \quad (3)$$

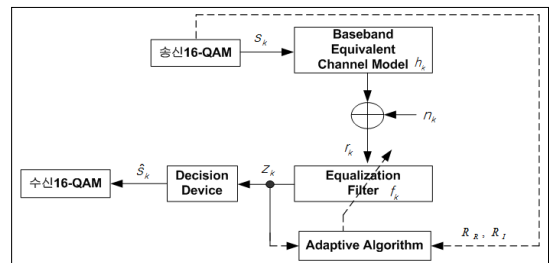


그림 1. 통신 시스템 모델

Fig. 1. Communication system model

### 2. CCA 알고리즘

CCA는 DDA의 초기 수렴 불확실성을 개선하고,

RCA의 등화 잡음의 원인이 되는 misadjustment 오차 항의 분산값을 줄이기 위하여 등장하였다. 이를 위하여 독립적인 통계 심볼을 송신 심볼의 constellation에 각각 할당하는데, 통계 심볼은 실제 송신 심볼의 subset은 아니다. multi 레벨의 수가 증가할수록 등화 잡음의 감소는 현저해지며, 통계 심볼은 dispersion constant  $R_R, R_I$  및 결정 장치의 출력  $\hat{s}_k$ 에 의해 결정되어진다. 그림 1의 기저 대역 통신 시스템 모델에서 송신 신호를  $s_k$ , 채널에서 부가되는 잡음을  $n_k$ , 등화기 입력 신호를  $r_k$ , 등화기의 필터 계수를  $f_k$ , 등화기 출력 신호를  $z_k$ 라고 하자. 등화기 필터의 차수를  $N$  이라고 하면 필터 계수 벡터와 등화기 입력 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_k &= [f_0 \ f_1 \ f_2 \ \dots \ f_{N-1}] \\ R_k &= [r_k \ r_{k-1} \ r_{k-2} \ \dots \ r_{k-N+1}] \end{aligned} \quad (4)$$

이를 이용하면 등화기의 출력 신호는 다음과 같다.

$$z_k = F_k^T R_k \quad (5)$$

그림의 CCA 등화기 구조에서 결정 장치 출력을 이용한 통계 심볼  $R_R |\widehat{S}_{Rk}|^c \cdot \text{sgn}(z_{Rk})$ 와  $R_I |\widehat{S}_{Ik}|^c \cdot \text{sgn}(z_{Ik})$ 를 구하는데, 여기서  $c$ 는 0 과 1 사이의 compact slice 가중치이며, 심볼은 RCA의  $(R_R, R_I), (R_R, -R_I), (-R_R, R_I)$ 와

$(-R_R, -R_I)$ 의 4개로 축소시키는 것이 아니라 원래의 심볼 개수를 유지하면서 이들을 일정한 modulus 범위 내에서 compact시키기 때문에 CCA 이름이 사용된다. CCA의 비용 함수  $J_{CCA}$ 와 탭 계수 갱신식을 다음의 식에 나타내었다.

$$J_{CCA} = E[(z_{Rk} - R_R |\widehat{S}_{Rk}|^c \cdot \text{sgn}(z_{Rk}) + (z_{Ik} - R_I |\widehat{S}_{Ik}|^c \cdot \text{sgn}(z_{Ik}))^2] \quad (6)$$

$$F_{k+1} = F_k + \mu_k [(R_R |\widehat{S}_{Rk}|^c \cdot \text{sgn}(z_{Rk}) - z_{Rk} + j (R_I |\widehat{S}_{Ik}|^c \cdot \text{sgn}(z_{Ik}) - z_{Ik})] R_k^*$$

탭 갱신식에서 오차의 실수와 허수부를 각각 나타내는  $R_R |\widehat{S}_{Rk}|^c \cdot \text{sgn}(z_{Rk}) - z_{Rk}$ ,  $(R_I |\widehat{S}_{Ik}|^c \cdot \text{sgn}(z_{Ik}) - z_{Ik})$ 는 DDA와 RCA의 오차를 포함하고 있다. CCA의 경우 주어진 가중치  $c$ 의 값을 이용하여 modulus는 다음과 같이 계산되어진다.

$$R_R = \frac{E[S_{Rk}]^2}{E[S_{Rk}]^{(1+c)}}, \quad R_I = \frac{E[S_{Ik}]^2}{E[S_{Ik}]^{(1+c)}} \quad (7)$$

### 3. Varying Step Size

Varying step은 식(6)의 CCA 알고리즘에서 고정 스텝

$\mu$ 값을 적응적으로 변화시킬 수 있는 능력을 갖는다. 적응 등화 알고리즘에서 오차 신호를 직접 이용하여 step size를 제어하면 첫째로 수렴전에는 수렴 속도를 개선시키기 위하여 가변 step size의 step 크기를 크게 한다. 이렇게 하면 초기에 큰 오차일수록 수렴 속도가 빨라지지만, 수렴이 진행되면서 오차가 급격히 감소되어도 step size의 크기는 이에 비례하여 급격히 감소되지 않으므로 residual 오차라는 새로운 문제가 발생할 수 있으며, 이는 interference에 매우 민감하다. 만약 적응 등화 알고리즘이 수렴한 후에도 강한 채널의 interference가 존재하면 인위적으로 오차 신호는 커질 수 있는 단점이 있으므로, 이를 방지하기 위하여 오차 신호를 적절한 변환 과정을 거쳐 비선형 함수를 이용한 step size 제어에 사용하므로서 적응 스텝 크기에 의한 CCA의 SER 성능 열화를 방지할 수 있게 된다. 제안 방식인 적응 스텝 크기에서는 고정 step size  $\mu$ 를 다음과 같은 비선형 함수인 지수 함수를 이용한다.

$$\mu_k = \beta [1 - \exp(-\alpha |e_k|)] \quad (8)$$

여기서  $\beta$ 는 적응 스텝  $\mu_k$ 의 범위를 결정하는 scale factor를 나타내며,  $\alpha$ 는 step의 변화 속도를 나타낸다.

VS-CCA 알고리즘의 적응 등화 성능은 식(8)에서  $\beta$ 와  $\alpha$ 에 의하여 상이해진다. 본 논문에서는  $\alpha$ 의 값에 따른 VS-CCA 알고리즘의 성능을 비교하며,  $\alpha = 0.5, 1, 1.5$ 을 대상으로 하였다. 그림 2는  $\beta = 0.0004$ 일 때  $\alpha$ 값에 따른 적응 스텝 크기를 나타낸 것으로  $\alpha$ 의 값이 클수록 stepsize의 기울기가 커짐을 알 수 있다.

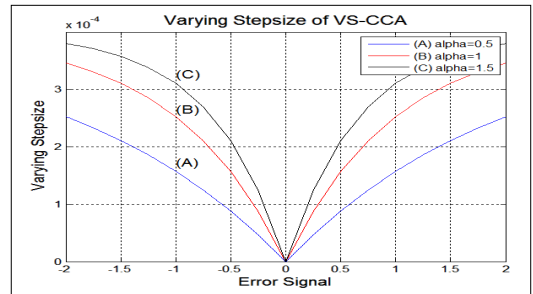


그림 2. 오차 신호와 적응 스텝 크기  
 Fig. 2. Error signal and adaptive step size

### III. 컴퓨터 시뮬레이션

VS-CCA 알고리즘에서 varying step을 위한 변화 속

도값에 따른 적응 등화 알고리즘의 등화 성능을 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위한 지수로는 신호대 잡음비를 30dB, VS-CCA의 scale factor  $\beta = 0.0004$ , compact slice 가중치  $c = 0.5$ , step 변화 속도값  $\alpha = 0.5, 1, 1.5$  및 등화기 차수는 15차 FIR로 설정하였고, 송신 신호로는 스펙트럼 효율이 높은 16-QAM nonconstant modulus를 이용하였다. 송신 신호는 부호간 간섭을 발생시키는 그림 3의 복소 채널을 통과한 후 원하는 신호대 잡음비를 갖는 잡음  $n_k$ 를 부가하여 수신 신호  $r_k$ 를 얻었으며, 그림 4는 전체적인 시뮬레이션을 위한 신호 처리 흐름도를 나타낸 것이다.

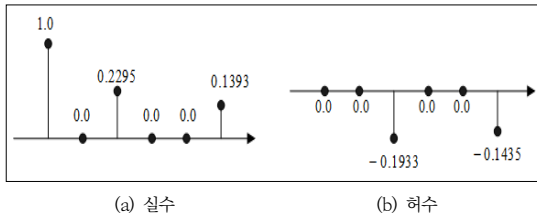


그림 3. 채널의 복소 계수  
Fig. 3. Complex coefficient of channel

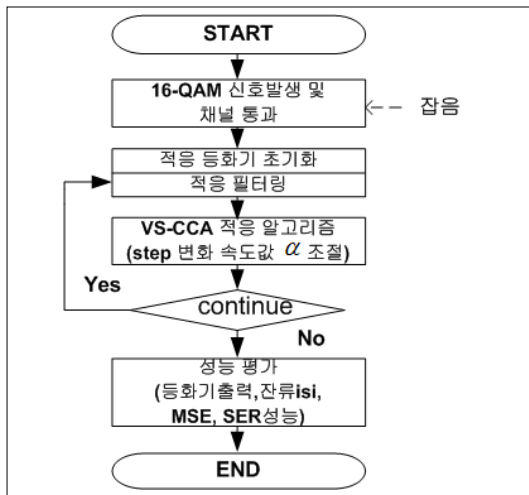


그림 4. 전체 신호 처리도  
Fig. 4. Overall signal processing flowgram

그림 5는 정상 상태에서 step 변화 속도값  $\alpha$ 에 따른 첫 번째 성능 지수인 등화기 출력 신호의 성상도를 나타낸 것이다. 성상도에서 송신 신호점의 16개를 명확하게 알 수 있으며, 각 신호점의 폭  $w$ 가 적고 신호점간의 거리  $d$ 가 커수록 심볼을 결정할 때 오류 발생 가능성을 줄일 수 있어서 우수한 등화 능력을 갖는다. VS-CCA에서

$\alpha = 0.5$ 일 때  $d=1.9964$ ,  $w=0.856$ 이었다. 또한  $\alpha = 1$ 일 때  $d=1.9947$ ,  $w=0.939$ 이었으며,  $\alpha = 1.5$ 일 때  $d=1.9938$ ,  $w=0.948$ 가 되었으므로, step 변화 속도의 기울기가 적을수록 복원 정상도에서 등화 능력이 개선된다.

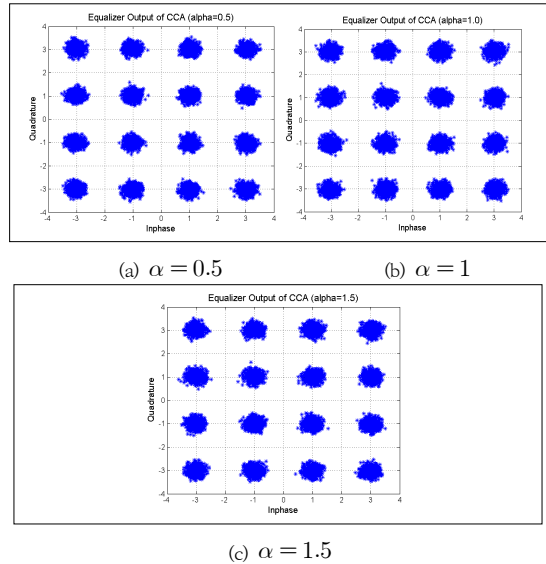


그림 5. 등화기 출력 신호 성상도  
Fig. 5. Equalizer Output signal constellation

적용 등화기의 성능을 나타내는 내부 지수로 잔류 isi (residual isi)와 MSE를 사용하였다. 이들 지수는 정해진 정상 상태까지 도달하는데 (채널 추적 능력) 소요되는 수렴 속도와 정상 상태 이후부터의 잔류량을 알 수 있으며, 이들은 적응 등화기의 중요한 성능 지표이다. 잔류 isi는 통신 채널  $h_k$ 와 등화 필터 계수  $f_k$ 의 종합 특성은 정상 상태에서는 이론적으로는 임펄스 신호가 된다. 그러나 완전 임펄스는 불가능해 되어 이와 근사한 성능이 얻어지는데 최대 성분을 제외한 나머지 잔류 성분들의 전력 크기를 나타낸다. 또한 MSE는 결정 장치의 출력과 송신 신호와의 자승 차이를 나타내면 송신 신호점을 중심으로 진폭의 흔들림 또는 jitter 크기를 나타낸다. 그림 6은 잔류 isi 성능을 나타낸 것으로서 잔류 isi에서 -20dB의 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도에서는 step 변화 속도가 클수록 빠름을 알 수 있지만, 정상 상태 이후부터의 잔류 isi 성분의 크기에서는 변화 속도에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 VS-CCA 적응 등화 알고리즘에서는 수렴 속도와 정상 상태 이후의 잔여량에서는 상호 tradeoff 관계가 성립됨을 알 수 있다. 또한 그림 7은 MSE 성능을 나타낸 것이다. 여기서도 그림 6과 같이 수

렴 속도와 정상 상태 이후의 MSE간에는 tradeoff 관계가 성립됨을 알 수 있다.

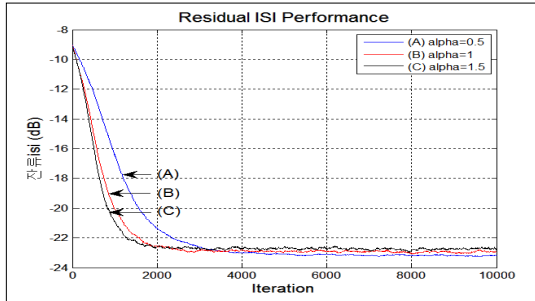


그림 6. 잔류 isi 성능  
 Fig. 6. Residual isi performance

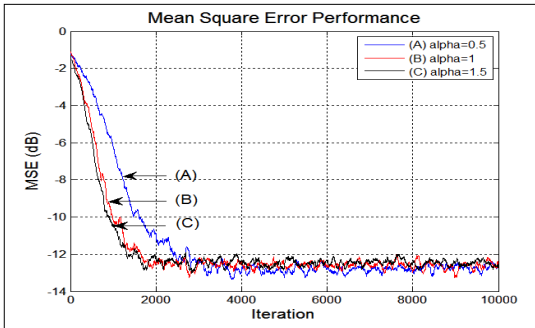


그림 7. MSE 성능  
 Fig. 7. MSE performance

표 1은 그림 6, 7에서 제시된 정성적인 성능 지수에 대하여 정상 상태 이후의 정량적인 평균과 분산값을 나타낸 것이다. 모든 지수에서  $\alpha$ 의 값이 적을수록 등화 성능지수의 평균값이 적어서 성능이 개선됨을 알 수 있다.

표 1. 성능 지수의 통계값  
 Table 1. Statistics of performance index

	$\alpha$	평균 (dB)	분산
잔류isi	0.5	-23.148	4.402e-9
	1	-22.922	3.479e-9
	1.5	-22.736	5.396e-9
MSE	0.5	-12.79	4.297e-6
	1	-12.58	5.265e-6
	1.5	-12.47	4.480e-6

그림 8은 VS-CCA 적응 등화 알고리즘의 외부 부가 잡음에 대한 강인성을 나타내는 SER 성능을 나타낸 것이다. 신호대 잡음비는 0~10dB 까지 2dB 단위로 변화시

키면서 20,000개의 16-QAM 신호에 대하여 5회 반복 전송할때의 평균 심볼 오류율을 계산한 것으로, 신호대 잡음비가 낮은 구간에서는 step 변화 속도와는 거의 무관함을 알 수 있지만, 신호대 잡음비가 6dB 이상에서는 step 변화 속도값  $\alpha$ 가 적을수록 SER 성능이 개선되고  $\alpha$ 가 클수록 SER 성능이 열화됨을 알 수 있다.

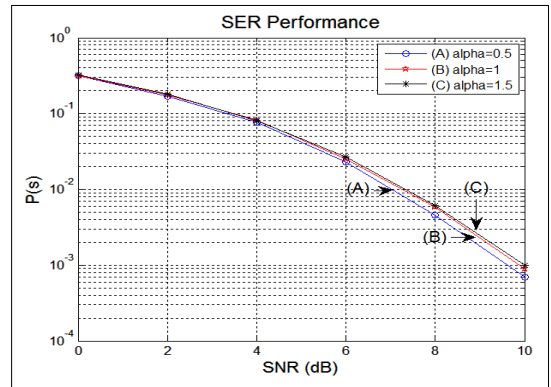


그림 8. SER 성능  
 Fig. 8. SER Performance

#### IV. 결 론

논문에서는 채널에서 발생하는 부호간 간섭을 줄일 수 있는 VS-CCA 적응 등화 알고리즘에서 등화기의 탭 계수를 적응하기 위한 varying stepsize에서 오차 신호의 비선형 함수를 이용한 변화 속도값에 따른 성능을 비교하였다. CCA 알고리즘은 CMA의 위상 복원 불가능 능력과 DDA의 초기 수렴 불확실이라는 단점과 RCA의 높은 misadjustment에 의해 발생하는 등화 잡음을 개선하기 위하여 등장하였으나, 상대적으로 등화 능력이 열화된다. 이를 개선하기 위하여 varying step을 적용한 VS-CCA에서는 오차 신호의 비선형 함수를 이용하며, 이때 varying step 변화 속도에 따라 상이한 성능을 얻을 수 있다. VS-CCA에서 step 가변 속도값을 0.5, 1.0, 1.5로 변화시킬 때의 적응 등화 성능을 비교하기 위하여 등화기 출력 정상도와 잔류 isi, MSE 및 SER을 적용하였다.

시뮬레이션 결과 step 가변 속도값이 1.0보다 적어서 기울기가 완만할수록 1.0보다 큰 기울기가 급격한 경우보다 모든 성능 지수에서 우월함을 얻을 수 있었는데, 이는 비선형 함수를 이용하는 경우 정상 상태에서 기울기가 완만할수록 스텝 크기가 적어지기 때문이다. 따라서 수렴 속도 또는 정상 상태에서 오차 신호 또는 잔여량중

에서 어느 것이 중요한가의 통신 채널 환경에 따라 가변 속도값 크기가 선택적으로 사용되어 최적 성능으로 디지털 전송이 가능하게 됨을 확인하였다.

## References

- [1] Shafayat Abrar, "Compact Constellation Algorithm for Blind Equalization of QAM Signals", International Networking & Communication Conf. 2004, pp.170~174, 2004.  
DOI : <https://doi.org/10.1109/INCC.2004.1366599>
- [2] A.Ozen et. al., "Variable Step-Size Constant Modulus Algorithm Employing Fuzzy Logic Controller", Wireless Pers. Commun. 54, pp.237~249, 2010.
- [3] R.Mitra, T.Choubisa, "A Variable Step Size Square Contour Algorithm based on a Novel Non-Linear Function of Error Signal", Int. Conf. on Com. and Signal Processing, pp.336~338, 2011.  
DOI : <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2011.5739332>
- [4] Z.Shenkui et al., "Modified LMS and NLMS Algorithms with a New Variable Step Size", Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, 2006.  
DOI : <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2006.345344>
- [5] R.Hamzehyan, R.Dianat, N.C.Shirazi, "New Variable Step-Size Blind Equalization Based on Modified Constant Modulus Algorithm", Int. Jour. of Machine Learning and Computing, Vol.2, No.1, pp.30~34, Feb. 2012.
- [6] S.G.Lim, "A Performance Evaluation of VSS-MMA Adaptive Equalization Algorithm using the Non-Linear Function of Error Signal for QAM System", Jour. of I.W.I.T., Vol.15, No.2, pp.131~137, Feb. 2015.
- [7] K.N.Oh, "An Algorithm for Variable Step-Size Improving Steady-State Performance of Blind Equalization", Jour. of K.I.I.T., Vol. 9, No. 10, pp.43~48, Oct. 2011.
- [8] M.A.Demir, A.Ozen, "A Novel Variable Step Size Adjustment Method Based on Autocorrelation of Error Signal for the Constant Modulus Blind Equalization Algorithm", Radio Engineering, Vol.21, No.1, pp.37~45, April 2012.

## 저 자 소개

임 승 각(정회원)



- 1983년 숭실대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1997년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2005년 현재 공주대학교 정보통신공

학부 교수.

• 주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신