

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.1.109>

IIBC 2016-1-15

## 적응 스텝 크기에 의한 CCA 블라인드 등화 알고리즘의 성능 개선

### Performance Improvement of CCA Blind Equalization Algorithm by Adaptive Step Size

임승각\*

Seung-Gag Lim

**요약** 본 논문은 디지털 무선 전송시 채널에서 발생하는 부호간 간섭과 잡음의 영향을 최소화하기 위한 CCA (Compact Constellation Algorithm) 등화 알고리즘에서 적응 스텝 크기를 적용하여 이의 등화 성능 개선에 관한 것이다. 일반적으로 등화 알고리즘에서 적응을 위한 스텝 크기는 고정적으로 사용하지만, 제안 알고리즘에서는 등화를 위한 스텝 크기를 비선형 함수인 오차 신호에 비례하도록 변화시킨다. 이의 개선된 등화 성능을 보이기 위하여 등화기 출력 정상도, 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 MSE와 SER을 적용하였으며, 이들을 고정 스텝 크기를 갖는 기존 CCA와 비교하였다. 컴퓨터 시뮬레이션의 결과 정상 상태 이후에서는 적응 스텝 방식의 CCA가 고정 스텝 방식의 CCA보다 우월함을 확인하였다.

**Abstract** This paper relates with the performance improvement of CCA (Compact Constellation Algorithm) equalization algorithm by adding the adaptive step size control in order to the minimization of intersymbol interference and additive noise effects that is occurs in the channel for digital radio transmission. In general, the fixed step size was used in order to adaptation in equalizer algorithm. But in proposed algorithm, the variable step size were adapted that is proposional to the nonlinear function of error signal for equalization. In order to show the improved equalization performance, the output signal constellation of equalizer, residual isi, maximum distortion, MSE and SER were used, then it were compared with the present CCA algorithm. As a result of computer simulation, the adaptive step size CCA has more better performance in the every performance index compared to the fixed step size CCA after in the steady state.

**Key Words** : CCA, adaptive step size, residual isi, MSE, maximum distortion

## 1. 서론

최근의 디지털 전송 시스템에서 송수신 단말 시스템에 대해서는 많은 기술적 진보로 이동 통신과 모바일 인

터넷 서비스를 수용할 수 있을 정도로 비약한 발전이 있었다. 그러나 통신 채널, 즉 유선 채널과 무선 채널에서 발생하는 진폭과 위상의 찌그러짐 특성으로 인한 부호간 간섭으로 인하여 전체 통신 시스템의 throughput이

\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학  
접수일자 : 2015년 11월 2일, 수정완료 : 2016년 1월 5일  
게재확정일자 : 2016년 2월 5일

Received: 2 November, 2015 / Revised: 5 January, 2016 /  
Accepted: 5 February, 2016

\*Corresponding Author: [sglim@kongju.ac.kr](mailto:sglim@kongju.ac.kr)

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

나 통신 품질과 서비스 품질이 저하된다. 최근 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 적응 등화 또는 블라인드 적응 등화를 들 수 있다<sup>[1][2]</sup>. 특히 이동 통신과 같은 대역폭 제한과 송신 전력 제한 특성을 갖는 채널에서 높은 스펙트럼 효율을 갖는 QAM 신호 방식이 필수적으로 사용되며, 또한 채널에서 발생하는 부호간 간섭에 의한 오류를 제어하기 위하여 재송신을 위한 역방향 채널 (reverse channel)의 확보가 어려운 환경에서 이들 등화기의 사용은 필수적이다. 특히 블라인드 적응 방식은 채널의 대역폭 이용률과 throughput을 동시에 높일 수 있으므로, 최근 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 반면 블라인드 방식은 상기의 장점이 있지만 적응 방식에 비해 수렴 속도, 잔류 isi와 최대 찌그림 및 MSE양의 등화 성능이 열화되는 단점도 있으므로, 최근 이런 단점을 개선하기 위한 다양한 방식들이 등장하고 있다<sup>[1][2]</sup>. 블라인드 적응 등화를 위한 알고리즘으로는 CMA (Constant Modulus Algorithm), DDA (Decision Directed Algorithm), RCA (Reduced Constellation Algorithm)등이 있다<sup>[2][7]</sup>. CMA는 채널에서 발생하는 진폭만 보상이 가능하며 위상이 불가능한 가장 기본적인 알고리즘이며, DDA는 진폭과 위상의 동시 보상이 가능하지만 constant multilevel modulus 신호에 대해서 초기 수렴이 불확실하지만, 일단 수렴 상태에 들어가면 우수한 성능이 보장되는 제한성을 가지므로, 다른 방식과 결합된 이중 모드 형태의 등화에 사용된다. 반면 RCA는 CMA와 DDA의 단점을 개선할 수 있어서 널리 사용되지만, 다른 방식들에 비해 상대적으로 misadjustment에 의한 등화 잡음이 발생된다. 이들 3가지 방식의 장점과 단점을 절충시킨 CCA (Compact Constellation Algorithm)가 등장하였다<sup>[3][6]</sup>. 본 논문에서는 CCA 적응 등화기의 스텝 크기를 적응을 위한 비선형 특성을 갖는 오차 신호에 비례하여 조절시킬 수 적응 스텝 크기를 갖는 CCA 알고리즘에 대해 설명한 후, 이의 개선된 등화 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 논문의 구성으로 2장에서는 블라인드 적응 등화기를 사용하는 통신 시스템의 수신기 모델과 CCA 적응 등화 알고리즘 및 적응 스텝 크기에 대하여 설명하고, 3 장에서는 개선된 성능 확인을 위한 시뮬레이션 결과를 제시한 후, 4장에서는 결론을 내리겠다.

## II. 본 론

### 1. 통신 시스템 모델

그림 1은 수신측에서 CCA 알고리즘을 갖는 적응 등화기를 적용한 통신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서 기저 대역 신호  $s(k)$ 를 전송하면 대역 제한과 다중 경로 전파를 나타내는 임펄스 응답이  $h(k)$ 인 채널을 통하여 수신측에 전달되며 이때 채널에서는 일정한 신호대 잡음 전력비를 갖는 잡음  $n(k)$ 이 부가된다. 수신측에서는 임펄스 응답이  $f(k)$ 인 등화기에 인가되며, 이의 전달 함수는 통신 채널 전달 함수의 역관계를 갖는다. 이 과정에서  $s(k)$ 의 대역 제한을 위한 송신 필터와 수신 필터는 이상적으로 간주하여 무시한다.  $s(k)$ 에 채널에서 발생된 부호간 간섭과 잡음이 더해진 수신 신호  $r(k)$ 는 적응 등화기를 통과하면서 이들 영향을 최소화된 후 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치  $\hat{s}(k)$ 를 얻게 된다. 이때 등화기의 필터 계수  $f(k)$ 는 적응 알고리즘부에서 송신 부호의 실수부와 허수부의 constant modulus 인  $R_R, R_I$  및 등화기 출력 신호  $z(k)$ 와  $\hat{s}(k)$ 의 compact화된 성분을 이용하여 오차 신호를 발생하여 새로운 필터 계수  $f(k+1)$ 을 얻게 된다. 이 과정에서 적응을 위한 스텝 크기  $\mu$ 의 값을 고정시키지 않고 오차 신호에 비례도록 변화시킨다.

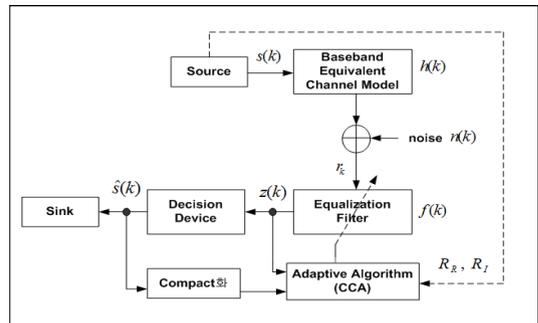


그림 1. 통신 시스템 모델

Fig. 1. Communication system model

### 2. Compact Constellation Algorithm

CCA는 DDA의 초기 수렴 불확실성을 개선하고, RCA의 등화 잡음의 원인이 되는 오차항의 분산값을 줄이기 위하여 등장하였다. 이를 위하여 독립적인 통계 심볼을 송신 심볼의 constellation에 각각 할당하는데, 통계 심볼

은 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  $s(\widehat{k})$ 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.

$$\begin{aligned} F(k) &= [f(0) f(1) f(2) \dots f(N-1)] \\ R(k) &= [r(k) r(k-1) r(k-2) \dots r(k-N+1)] \end{aligned} \quad (1)$$

이를 이용하면 등화기의 출력 신호는 다음과 같다.

$$z(k) = F(k)^T R(k) \quad (2)$$

그림의 CCA 등화기 구조에서 결정 장치 출력을 이용한 통계 심볼  $R_R |S_R(\widehat{k})|^c \cdot \text{sgn}(z_R(k))$ 와  $R_I |S_I(\widehat{k})|^c \cdot \text{sgn}(z_I(k))$ 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 계수를 유지하면서 이들을 일정한 modulus 범위 내에서 compact시키기 때문에 CCA 이름이 사용된다. CCA의 비용 함수  $J_{CCA}$ 와 탭 계수 갱신식을 다음의 식(3)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} J_{CCA} &= E[(z_R(k) - R_R |S_R(\widehat{k})|^c \cdot \text{sgn}(z_R(k))^2 \\ &\quad + (z_I(k) - R_I |S_I(\widehat{k})|^c \cdot \text{sgn}(z_I(k))^2)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$F(k+1) = F(k) + \mu [(R_R |S_R(\widehat{k})|^c \cdot \text{sgn}(z_R(k)) - z_R(k) + j (R_I |S_I(\widehat{k})|^c \cdot \text{sgn}(z_I(k)) - z_I(k))] R^*(k)$$

탭 갱신식에서 오차의 실수와 허수부를 각각 나타내는  $R_R |S_R(\widehat{k})|^c \cdot \text{sgn}(z_R(k)) - z_R(k)$ ,  $(R_I |S_I(\widehat{k})|^c \cdot \text{sgn}(z_I(k)) - z_I(k))$

는 DDA와 RCA의 오차를 포함하고 있다. 이와 같이 결정 장치의 출력을 탭 계수 갱신식에 반영하므로써 등화기 출력  $z_k$ 가 가장 인접한 심볼로부터의 거리 정보로 이용하므로 정상 상태에서 탭 계수의 misadjustment에 의한 등화 잡음을 경감시킬 수 있다<sup>[3][6][7]</sup>. CCA의 경우 주어진 가중치  $c$ 의 값을 이용하여 modulus는 다음과 같이 계산되어진다.

$$R_R = \frac{E[S_R(k)]^2}{E[S_R(k)]^{(1+c)}}, R_I = \frac{E[S_I(k)]^2}{E[S_I(k)]^{(1+c)}} \quad (4)$$

### 3. Adaptive Step Size Concept

적용 스텝은 식(3)의 CCA 알고리즘에서 고정 스텝  $\mu$  값을 적응적으로 변화시킬 수 있는 능력을 갖는다. 적용 등화 알고리즘이 수렴한 후에도 만약 강한 채널의 interference가 존재한다면 인위적으로 오차 신호는 커질 수 있는 단점이 있으므로, 이를 방지하기 위하여 오차 신호를 적절한 변환 과정을 거쳐 비선형 함수를 이용한 step size 제어에 사용하므로써 적용 스텝 크기에 의한 CCA의 SER 성능 열화를 방지할 수 있게 된다. 제안 방식인 적용 스텝 크기에서는 고정 step size  $\mu$ 를 다음과 같은 비선형 함수인 지수 함수를 이용한다.

$$\mu(k) = \beta [1 - \exp(-\alpha |e(k)|)] \quad (5)$$

여기서  $\beta$ 는 proportionality factor이며 적용 스텝  $\mu(k)$  값을 제어하는데 사용된다.  $0 \leq 1 - \exp(-\alpha |e(k)|) \leq 1$ 의 범위 내에서  $\mu(k)$  값은  $0 \leq \mu(k) \leq \beta$ 의 값을 갖게 되며, 알고리즘의 안정된 동작을 보장하기 위하여 다음의 조건을 만족시키야 한다.

$$0 \leq \mu(k) \leq 0.66 \text{ tr}(R_k) \quad (6)$$

$R_k$ 는 등화기의 입력 신호  $r(k)$ 의 자동 상관 행렬을 나타낸다. 그림 2는  $\beta$ 값에 따른 적용 스텝 크기를  $\alpha = 2, 4, 8$  인 경우 나타낸 것으로 오차 신호가 0일수록 최소 스텝 크기를 갖는다<sup>[5]</sup>.

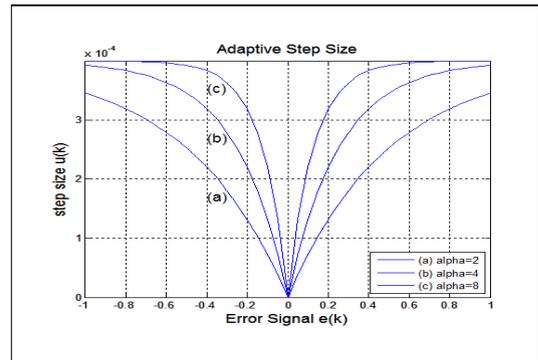
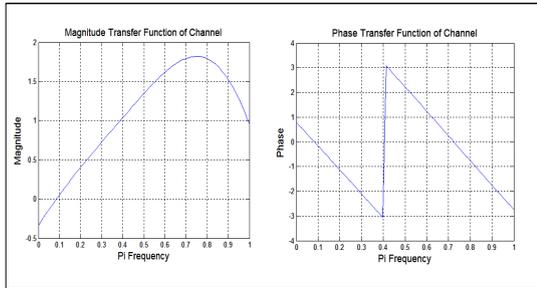


그림 2. 오차 신호와 적응 스텝 크기  
 Fig. 2. Error signal and adaptive step size

### III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

적용 스텝 크기를 적용하는 CCA 적응 등화 알고리즘의 성능 분석을 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 기존 CCA 알고리즘과 비교하였다. 이를 위한 시뮬레이션을 위한 알고리즘의 파라미터로는 신호대 잡음비를 30dB, 고정 스텝 크기  $\mu=0.0004$ , compact 가중치  $c=0.6$ , 등화 필터로는 FIR, 동일한 시분산 채널을 적용하였으며 이의 진폭 전달 함수와 위상 전달 함수를 그림 3에 나타내었다. 채널을 통과한 신호를 대상으로 고정 스텝과 적응 스텝을 갖는 CCA 알고리즘을 적용하여 성능을 비교하며, 그림 4는 시뮬레이션을 위한 전체 신호 흐름도를 나타낸 것이다.



(a) 진폭 전달 함수 (b) 위상 전달 함수

그림 3. 채널의 주파수 전달 함수  
Fig. 3. Frequency transfer function of channel

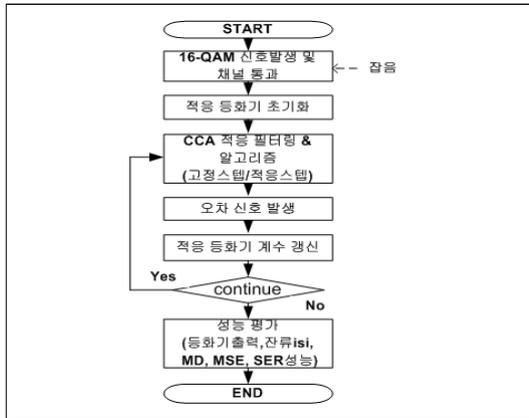


그림 4. 신호 처리 흐름도  
Fig. 4. Signal processing flowdiagram

첫 번째 성능을 정량적인 성능 비교를 위하여 이들 알고리즘을 적용할 때 적응 등화기의 출력 신호 성상도를 그림 5에 나타내었다. 출력 성상도에서는 신호점의 폭이 좁고 신호점간의 간격이 클수록 등화 성능이 우수하게

되는데, 그림에서 고정 스텝 크기보다는 적응 스텝 크기를 적용하는 CCA 알고리즘이 신호점의 폭과 다른 신호점간의 거리도 멀어져서 error 발생 가능성이 줄어들음을 알 수 있으므로 우월한 등화 성능을 가짐을 알 수 있다.

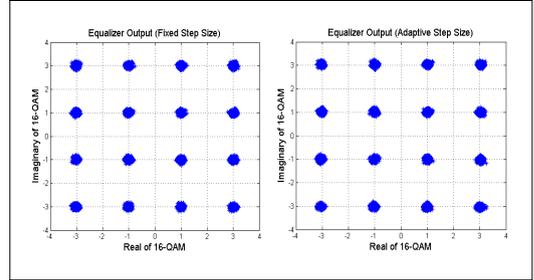


그림 5. 등화기 출력 신호 성상도  
Fig. 5. Output signal constellation of equalizer

두 번째 수렴 성능을 비교하기 위한 성능 지수로 잔류 ISI, 최대 찌그러짐과 MSE의 learning 곡선을 사용하였다. 이들 곡선에서 얻을 수 있는 것은 초기의 과도 과정을 지나 특정한 레벨의 정상 상태 (stable state)에 도달할 때까지의 수렴 속도를 나타내는 iteration수와 그 이후의 양이다. 잔류 ISI는 통신 채널과 적응 등화기가 완전 등화 상태에서는 시간 영역에서는 임펄스 특성을 가져야 한다. 이는 이론적인 관계이며 실제적으로는 완전 임펄스 특성을 갖지 못하고 잔류 성분들이 존재하게 되므로 이 잔류 성분들의 크기를 의미한다. 그림 6은 블라인드 적응 등화기의 가장 중요한 성능 지수인 잔류 ISI 성능을 나타낸 것으로서 -30dB를 정상 상태로 설정할 때 고정 스텝의 경우 4502회, 적응 스텝의 경우 4411회에 달성하므로 적응 스텝의 CCA가 고정 스텝 CCA보다 조금 빠르지만 수렴 속도에서는 이들이 비슷해짐을 알 수 있다.

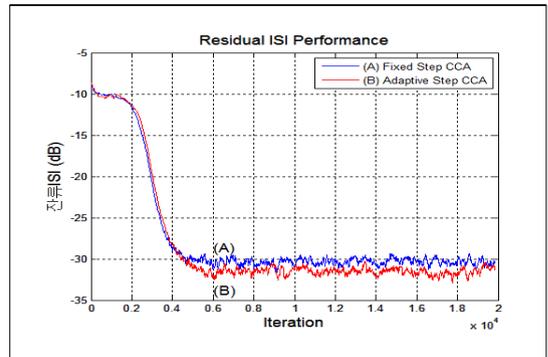


그림 6. 잔류 ISI 성능  
Fig. 6. Residual ISI performance

그림 7은 최대 찌그러짐 (MD) 성능을 나타낸 것으로 그림 6의 잔류 isi 성분을 전력이 아닌 전압 성분을 의미한다. 여기서도 그림 7과 유사하게 적응 스텝의 CCA 성능이 고정 스텝의 CCA 성능보다 적어짐을 알 수 있다.

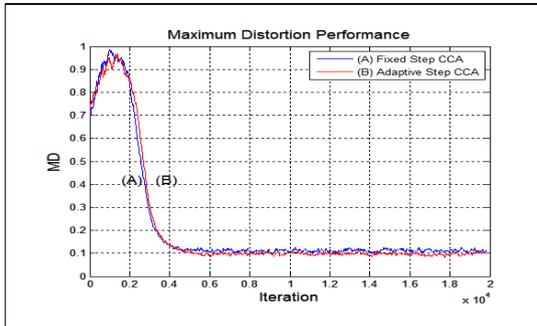


그림 7. 최대 찌그러짐 성능  
 Fig. 7. Maximum distortion performance

그림 8은 송신 신호점과 등화기 출력 신호점간의 자승 오차 성분을 의미하는 MSE 성능을 나타낸 것이다. MSE 성능에서 -19dB를 정상 상태로 고려할 때 고정 스텝의 CCA는 4575회, 적응 스텝의 CCA에서는 4437회로 필요하게되어 정상 상태에 도달하는 수렴 속도에서 적응 스텝이 고정 스텝보다 조금 빠르며, 정상 상태 이후의 그 양에서도 적응을 알 수 있다.

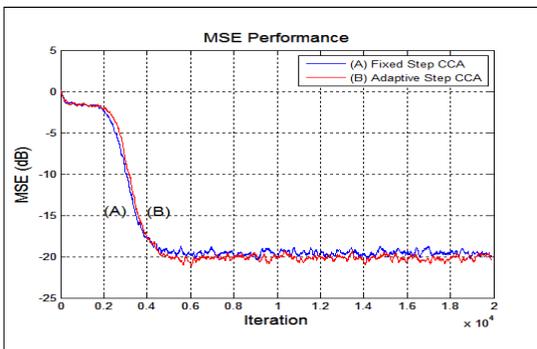


그림 8. MSE 성능  
 Fig. 8. MSE performance

표 1은 그림 6, 7, 8에 대한 정상 상태 이후의 잔류 isi, 최대 찌그러짐, MSE에 대한 정량적 평균값을 나타낸 것이며, 모든 지수에서 적응 스텝을 적용하는 CCA가 고정 스텝의 CCA보다 적어서 성능의 우월성을 알 수 있다.

표 1. 성능 지수의 통계치

Table 1. Statistics of performance index

	고정스텝CCA	적응스텝CCAA
잔류 isi [dB]	-30.31	-31.43
MD [dB]	-19.02	-20.15
MSE [dB]	-19.55	-20.14

마지막 성능 지수로는 이들 적응 등화 알고리즘의 채널에서 부가되는 잡음에 대한 강인성 (Robustness)을 알 수 있는 심볼 오류율 (SER) 성능을 그림 9에 나타냈다. 채널에서 부가되는 신호대 잡음비를 0 ~ 10dB 까지 2dB 단위로 변화시키면서 20,000개의 심볼을 5회 montecarlo simulation할 때 적응 등화기를 통과한 후 결정 장치가 심볼을 복원한 후 이를 송신 심볼과의 차이인 오류율을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과 신호대 잡음비가 낮은 0 ~ 6dB의 범위내에서는 고정 스텝의 CCA가 적응 스텝의 CCA보다 미소하나마 우월했지만, 그 이상의 신호대 잡음비에서는 적응 스텝의 CCA가 고정 스텝 CCA보다 오울 성능이 서서히 개선됨을 알 수 있다. 심볼 오류율 성능에서 적응 스텝 방식이 고정 스텝 방식보다 성능이 우월해지려면 어느 정도의 신호대 잡음비 이상에서 얻어짐을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다.

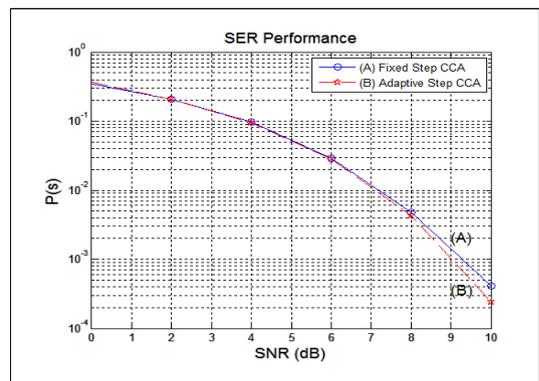


그림 9. SER 성능  
 Fig. 9. SER performance

## V. 결론

논문에서는 통신 채널에서 발생하는 찌그러짐에 의한 부호간 간섭을 경감할 수 있는 블라인드 적응 등화 알고리즘인 CCA에서 기존의 고정 스텝을 대신 적응 스텝 크기를 적용하였다. 고정 스텝 크기를 적용하는 기존 알고

리즘에서 오차 신호의 변환을 이용한 비선형 함수를 이용하는 적응 스텝으로 대체하므로써 정상 상태에서 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 MSE, SER의 성능 지수에서 개선되었다. 그림 7, 8, 9의 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 MSE 성능 곡선에서 이들 방식들이 정상 상태에 도달할때까지의 수렴 곡선 기울기에서 거의 유사하지만, 정상 상태 이후에는 적응 방식이 고정 방식보다 우월하였으며, 정량적으로는 평균 -1dB 정도 개선되었다. 또한 SER 성능에서는 신호대 잡음비가 6dB 이상의 범위에서는 적응 스텝 방식이 우월함을 확인하였다. 이와 같은 개선된 성능을 갖는 적응 스텝 크기의 CCA 알고리즘은 신호대 잡음비가 6dB 이상 확보되는 통신 채널 환경에서 기존 고정 스텝 크기의 CCA보다 우수한 등화 특성을 얻을 수 있으므로 홈 네트워크와 같은 응용에서 다양한 트래픽 전송할 때 전송 시스템의 throughput을 향상시킬 수 있을 것이다.

## References

- [1] Godard D.N., "Recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems", IEEE Trans. Com., COM-28, pp.1867~1875, Nov. 1980
- [2] Z.Liyi et. al., "Variable Step-size CMA Blind Equalization based on Non-linear Function of Error Signal", Proc. Int. Conf. on Com. and Mobile Computing, pp.396~399, 2009.
- [3] S.Abrar, "Compact Constellation Algorithm for Blind Equalization of QAM Signals", Int. Network-ing & Communication Conf. 2004, pp.170~174, 2004.
- [4] M. Amin, Lin He, C. Reed, Jr, R. Malkemes, "A Modified Constant Modulus Algorithm for Adaptive Channel Equalization for QAM Signals", IEEE Proc. of 11th Singal Processing, pp.563~566, 2001
- [5] R.Mitra, T.Choubisa, "A Variable Step Size Square Contour Algorithm Based on a Novel Non-Linear Function of Error Signal", ICom and Signal Pro., pp.336~338, 2011.
- [6] S.G.Lim, "The Performance Analysis of CCA Adap-equalization Algorithm for 16-QAM Signal", Jour. of I.I.B.C., Vol.13, No.1, pp.27~34, Feb. 2013.
- [7] D. S. Kang, "Performance Comparison of the CCA Adaptive Equalization Algorithm based on Compact Slice Weighting Values in 16-QAM", Jour. of I.I.B.C., Vol.13, No. 4, pp.127~133, Aug. 2013.
- [8] G.Malik, A.S.Sappal, "Adaptive Equalization Algorithms : An Overview", Int. Jour. of Advanced Computer Science and Application, pp.62~67, Vol.2, No.3, March 2011

## 저자 소개

### 임 승 각(정회원)



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

<주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신>