

SC-FDMA 시스템을 위한 최적 판정궤환 등화기

*이수경, **박용현, ***서보석

충북대학교

*sukyong1218@nate.com

An Optimum Decision Feedback Equalizer for SC-FDMA Systems

*Su-Kyoung Lee, **Yong-Hyun Park, ***Bo-Seok Seo

Chungbuk National University

요약

SC-FDMA(Single Carrier Frequency Division Multiple Access) 방식은 다중경로의 영향을 제거할 수 있는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식의 장점을 유지하면서 OFDM의 단점인 높은 PAPR(Peak to Average Power Ratio) 문제를 해결할 수 있어 차세대 멀티미디어용 이동통신 시스템인 3GPP LTE(3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution)의 상향링크 전송방식으로 채택되었다. 또한 SC-FDMA 수신기는 주파수 영역에서 채널등화기를 구현함으로써 OFDM 수신기와 마찬가지로 기존의 단일반송파 방식에 비해 등화기의 복잡도를 크게 감소시킬 수 있다. 한편 주파수 영역 채널등화기와 더불어 시간영역의 판정궤환 등화기를 같이 사용하여 수신기의 성능을 향상시킬 수 있다.

이 논문에서는 예측형 판정궤환 등화기 구조를 적용하여 채널등화기의 성능을 더 향상시킬 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 또 모의실험을 통해 제안된 방법의 성능을 확인한다.

1. 서론

최근 고속 통신에 대한 수요가 증가하면서 3GPP-LTE(3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution)에서는 하향링크에서 100Mbps, 상향링크에서 50Mbps의 전송률 지원을 목표로, 하향링크에선 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access), 상향링크에서는 SC-FDMA(Single Carrier Frequency Division Multiple Access) 전송방식을 표준 방식으로 채택하였다 [1].

OFDMA는 주파수 영역에서 다수의 부반송파에 대응된 심볼을 동시에 전송하는 시스템으로, 주파수 선택적 채널을 통과하더라도 수신 신호와 주파수 응답의 곱으로 이루어진 간단한 1탭 등화기로 보상이 가능한 장점이 있다. 그러나 OFDMA는 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)가 높아서 선형성이 매우 큰 전력증폭기를 필요로 한다. 이것은 단말기의 구현비용이 상승하고 송신전력의 감소에 따른 유효셀 반경이 감소하는 문제를 발생시킨다.

SC-FDMA는 OFDM의 변복조 방식과 유사하지만 송신단에서 다수의 부반송파로 나누기 전에 DFT(Discrete Fourier Transform) 단계를 추가로 거친다. 결과적으로 OFDM 변조를 하지만 정보 심볼을 시간영역에서 변조한 단일 반송파 시스템과 유사한 형태가 되어 낮은 PAPR을 갖게 되는 장점이 있다.

한편 OFDMA와 SC-FDMA 방식은 주파수영역 선형 등화기(frequency domain linear equalizer, FD-LE)를 이용하여 채널 등화기를 비교적 간단하게 구현할 수 있다. 그러나 FD-LE는 선형 등화기이므로 잡음 증폭(noise enhancement)이 발생한다. 잡음증폭의 문제는 판정궤환 등화기(decision feedback equalizer, DFE)를 사용하여 제거할 수 있다 [2][3][4]. 그러나 [4]에서 제시된 SC-FDMA 수신기용 판

정 궤환 등화기는 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 먼저 FD-LE는 선형 등화기로 최적 판정궤환 등화기의 순방향 필터(feedforward filter, FFF)와는 다르다. 최적 판정궤환 등화기의 FFF는 선형 등화기와 잡음 백색화 필터(noise whitening filter, NWF)로 직렬 연결로 이루어진다. 또 다른 문제는 판정궤환 등화를 위한 시간영역 신호를 만들어 낼 때 채널을 통과할 때(즉 다중화된 형태)의 신호와는 다른 구조의 신호를 이용한다. 따라서 채널의 영향을 정확하게 반영하지 못하게 된다. 또한 IDFT(Inverse Discrete Fourier Transform) 처리 후 시간영역의 판정궤환 등화기에서 SC-FDMA 신호의 보호구간을 사용하지 않고 있다. 이것은 채널을 통과할 때와 다른 구조의 신호를 사용하게 되어 마찬가지로 채널의 영향을 정확하게 반영하지 못한다.

이 논문에서는 위와 같은 문제를 해결하기 위해 우선 FD-LE 다음에 NWF를 연결하여 예측형 판정궤환 등화기의 구조가 되도록 하였다. 또 판정궤환 등화를 위한 시간영역 신호를 만들 때, 다중화기와 같은 크기의 IDFT를 적용하고 보호구간을 재생함으로써 채널을 통과할 때와 동일한 구조가 되도록 하였다.

2. 시스템 모델

SC-FDMA 시스템의 블록도는 그림 1 과 같다. 송신 데이터 심볼을 M점 DFT를 통하여 주파수 영역으로 변환한 후, 집중(localized) 또는 분산(distributed) 다중화 방식을 적용하여 N점 IDFT를 위한 부반송파에 대응시킨다. 대응된 심볼을 IDFT를 통하여 시간영역으로 다시 변환시키고, 보호구간(cyclic prefix, CP)을 삽입한 후 채널을 통해 전송한다[4].

수신기에서는 송신기와 역의 과정으로 수행한다. 채널등화는

DFT 후 주로 주파수 영역 선형등화기를 사용하며, 등화성능을 향상시키기 위해 시간 영역 판정제한 등화기를 추가로 사용한다.

판정제한 등화기는 FFF와 역방향 필터(feedback filter, FBF)로 구성된다. 수신 신호에서 precursor ISI(Intersymbol Interference)를 제거하는 FFF는 주파수 영역의 필터로 구현되며, FBF는 이전에 판정된 심볼값을 입력으로 하여 postcursor ISI를 제거해 준다. 즉, 현재 심볼값 이전에 발생한 ISI는 FFF를 통해 제거하고, 이후에 발생하는 ISI는 FBF를 거쳐 제거한다.

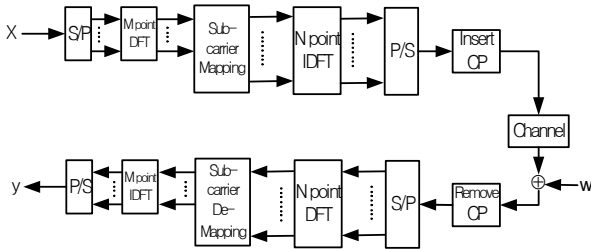


그림 1 SC-FDMA 시스템의 블록 다이어그램

따라서 현재 심볼을 정확하게 판정하였다고 가정하면 postcursor ISI를 효과적으로 제거 할 수 있다[5][6][7].

주파수 영역 등화를 위한 판정제한 등화기는 선형 등화기보다 더 우수하지만 구조가 복잡하기 때문에 사용이 제한되었다. 이와 같은 이유로 SC-FDMA에서는 일반적으로 주파수 영역에서 간단한 선형등화기를 사용하고 시간영역에서 추가로 FBF 필터를 사용한다[3][8].

3. 제안한 시간영역 DFE 구조

기존의 SC-FDMA 수신기에 사용하는 판정제한 등화기는 채널을 통과할 때와 다른 구조의 신호를 사용한다. 채널의 영향을 정확하게 반영하기 위해서는 판정제한 등화를 위한 시간영역 신호를 만들 때 채널을 통과할 때와 동일한 구조가 될 수 있도록 해야 한다. 즉 주파수 영역에서 등화된 신호를 시간영역으로 변환할 때 채널을 통과할 때와 동일한 구조가 되도록 N점(N>M) IDFT를 한다. IDFT 처리 후 보호구간 재생기를 통해 OFDM 심볼의 마지막 Ng 개의 표본을 앞으로 복사

하여 전체 (Ng + N) 개의 표본으로 이루어진 신호를 만든다. 그 다음 그림 2와 같이 전달함수가 V(z) 인 선형 필터(FFF)를 통과 시킨다. 이 선형필터의 전달함수에서 1을 제외한 부분이 동시에 FBF의 전달함수가 된다. 그림 3은 단일반송파 변조방식을 고려했을 때의 최적 판정제한 등화기의 구조를 나타낸다. SC-FDMA의 경우 선형등화기는 주파수 영역 등화기가 된다.

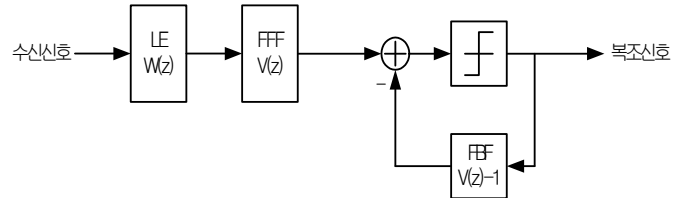


그림 3 최적 판정제한 등화기의 구조

그림 3에서 W(z)는 ZF(Zero Forcing) 또는 MMSE(Minimum Mean Squared Error) 기준의 최적 선형등화기를 의미한다. SC-FDMA의 경우 주파수 영역에서 주로 ZF 기준을 적용하므로, 이 논문에서는 ZF 기준 등화기를 적용한다. 이 경우 선형 등화기와 채널은 다음과 같은 관계가 있다.

$$W(f) = \frac{1}{H(f)} \quad (1)$$

ZF 기준 선형등화기는 채널의 응답이 0에 가까워질수록 선형등화기에 의해 신호성분뿐만 아니라 채널에서 유입된 잡음이 크게 증폭되는 현상이 발생하여 오류율을 증가시키게 된다. 케환필터와 연동된 순방향 필터는 이와 같이 증폭된 잡음을 다시 약화시키는 기능을 한다. 케환필터의 전달 함수는 다음과 같다.

$$V(f) = H_{\min}(f)H_{\max}^*(f) \quad (2)$$

여기서 $H_{\min}(f)$, $H_{\max}(f)$ 는 각각 채널 응답 $H(f)$ 의 최소위상성분, 최대위상성분으로 다음과 같은 관계가 있다.

$$|H(f)|^2 = H_{\min}(f)H_{\max}(f)H_{\min}^*(f)H_{\max}^*(f) \quad (3)$$

한편 판정제한 등화기 내부의 판정기는 전송된 심볼을 판정하는 역할

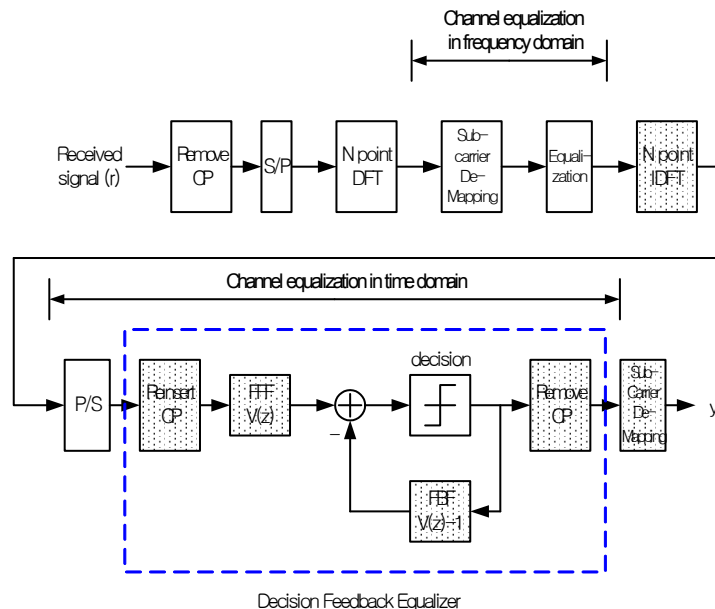


그림 2 제안한 SC-FDMA 수신기의 등화기 구조

을 한다. 이 경우 잡음성분은 제거되고, 신호성분만 통과된다고 볼 수 있다. 따라서 잡음과 신호관점에서 본 전달함수는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

잡음에 대한 전달함수 :

$$W(f) V(f) = \frac{1}{H(f)} \sqrt{|H(f)|^2} = 1 \quad (4)$$

신호에 대한 전달함수 :

$$W(f) V(f) \frac{1}{1+\{V(f)-1\}} = \frac{1}{H(f)} V(f) \frac{1}{V(f)} = \frac{1}{H(f)} \quad (5)$$

이와 같은 DFE 구조는 예측기의 구조로서, FFF는 주파수 영역에서 채널의 역이 곱해진 형태의 잡음 스펙트럼을 평탄하게 하는 잡음 백색화(noise whitening) 역할을 한다. 이 결과는 잡음증폭이 없는 상태에서 판정기가 최적으로 동작하도록 만든다.

4. 결론

이 논문에서는 SC-FDMA 수신기에서 사용하는 판정제한 등화기의 성능을 개선하기 위하여 예측형 구조의 판정제한 등화기를 적용하였다. 판정제한 등화기의 입력이 채널을 통과할 때와 동일한 구조가 되도록 함으로써 정확하게 채널의 영향을 제거할 수 있도록 하였다. 또한 시간영역 예측형 판정제한 등화기를 적용하려 판정기 입력에서 잡음이 백색화되도록 함으로써 최적의 등화기가 되도록 설계하였다.

참고문헌

- [1] 3GPP, "Technical Specification Group Radio Access Network; Physical Layer Aspects for Evolved UTRA," TR 25.814 v.1.1.1, 2006. 2."
- [2] H. G. Myung, J. Lim, and D. J. Goodman, "Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 1, no. 3, pp. 30-38, Sept. 2006.
- [3] D. Falconer, S. L. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar, and B. Eidson, "Frequency Domain Equalization for Single-Carrier Broadband Wireless Systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, pp.58-66, Apr. 2002.
- [4] G. Huang, A. Nix, and S. Armour, "Decision Feedback Equalization in SC-FDMA," *IEEE 19th PIMRC*, Sept. 2008.
- [5] John R. Barry, Edward A. Lee, and David G. Messerschmitt, *Digital communication*, KAP, Third Ed. 2004.
- [6] John G. Proakis and M. Salehi, *Digital communications*, Mc Graw Hill, Fifth Ed. 2008.
- [7] C. Belfiore and J. Park, "Decision Feedback Equalization," *Proc. IEEE*, vol. 67, pp.1143-1156, Aug. 1979
- [8] N. Benvenuto and S. Tomasin, "On the Comparison Between OFDM and Single Carrier Modulation With a DFE Using a Frequency-Domain Feedforward Filter," *IEEE Trans. Commun.*, in vol. 50, no. 6, pp.947-955, June. 2002.