

일반논문-04-09-4-07

ATSC 지상파 DTV 시스템의 등화형 디지털 동일 채널 중계기를 위한 디지털 신호 처리 기술

박 성 익^{a)†}, 음 호 민^{a)}, 이 용 태^{a)}, 김 흥 목^{a)}, 서 재 현^{a)}, 김 형 남^{b)}, 김 승 원^{a)}

Digital Signal Processing Techniques for the Equalization Digital On-Channel Repeater in the ATSC Terrestrial DTV System

Sung Ik Park^{a)†}, Homin Eum^{a)}, Yong-Tae Lee^{a)}, Heung Mook Kim^{a)}, Jae Hyun Seo^{a)}
Hyoung-Nam Kim^{b)} and Seung Won Kim^{a)}

요 약

본 논문에서는 ATSC 디지털 TV (DTV) 시스템의 등화형 동일 채널 중계기(Equalization Digital On-Channel Repeater)를 위한 복조, 등화, 그리고 재변조로 구성된 디지털 신호 처리(Digital Signal Processing: DSP) 기술들을 제안한다. EDOCR에서의 신호처리 과정에 의해 발생하는 시스템 지연은 기존 수신기의 수신 성능 저하를 야기할 수 있기 때문에 가능한 그 지연을 최소화 하여야 한다. 본 논문에서 제안한 DSP 기술들은 EDOCR의 성능 저하를 최소화 하면서 시간 지연을 줄일 수 있도록 하였다. 또한, 본 논문에서는 전산 실험을 통해 하드웨어 구현에 적합한 필터의 탭 수를 다양하게 제시한다.

Abstract

In this paper we propose Digital Signal Processing (DSP) techniques for the Equalization Digital On-Channel Repeater (EDOCR) in the ATSC digital TV (DTV) System. DSP techniques consist of demodulation, baseband equalization, and remodulation. Since the time delay caused by signal processing in the EDOCR can seriously affect the performance of ATSC legacy receivers, it is required that the processing time should be minimized as much as possible. To achieve this goal, we focus on the reduction of the EDOCR's time delay with the minimization of its performance degradation. In addition, we present recommended proper parameters for hardware implementation based on extensive simulation result.

Keywords : ATSC, SFN, EDOCR, 복조기, 등화기, 재변조기

I. 서 론

일반적으로 방송 서비스를 위해서는 주변 지형지물에 따

라 그리고 방송사의 방송 구역에 따라 송신기 및 중계기를 배치한다. 현재 ATSC(Advanced Television Systems Committee) 지상파 디지털 TV 방송은 각각의 송신기 혹은 중계기마다 다른 주파수를 할당하여 방송망을 구성하는 복수 주파수 망(Multiple Frequency Network: MFN)을 통해 서비스되고 있다. 그러나 MFN을 통해 방송 신호를 전송하면 동일 주파수 간섭이 없는 원거리 지역을 제외하고

a) 한국전자통신연구원 디지털방송연구단
Digital Broadcasting Research Division, ETRI

b) 부산대학교 전자공학과
Department of Electronics Engineering, Pusan National University

는 같은 주파수를 재사용할 수 없기 때문에 주파수 이용 관점에서 매우 비효율적이다.

그러나, 만약 복수 개의 송신기 및 중계기가 단일 주파수 망(Single Frequency Network: SFN) 구성을 통해 방송 신호를 전송하면 방송 주파수의 이용 효율을 높이고, 방송 구역 내에서 안정적인 전파 세기를 보장할 수 있다.

SFN 구성을 위한 기술은 분산 송신기(Distributed Transmitters: DTX)를 이용하는 방법과 디지털 동일 채널 중계기(Digital On-Channel Repeater: DOCR)를 이용하는 방법으로 나뉘어진다^[1]. ATSC 방식에서는 두 가지 방법 모두 SFN 구성이 가능하나, DTX를 이용하는 방법은 ATSC 표준을 변경해야 한다는 것과 송신기들 사이의 거리가 제약된다는 단점이 있다. 반면 DOCR을 이용하는 방법은 기존에 설치된 송신기와 함께 SFN 구성이 가능하므로 망 구성이 용이하나, 출력 전력이 낮고 출력 신호의 품질이 떨어진다는 단점이 있다. 기존 DOCR이 가지는 그러한 단점을 해결하기 위해 등화형 동일 채널 중계기(Equalization Digital On-Channel Repeater: EDOCR)가 제안되었다^[2].

EDOCR의 도입은 지상파 디지털 TV의 SFN 구현을 가능케 하는 매우 핵심적인 기술로서, 주파수 이용 효율을 높일 수 있는 장점이 있지만, EDOCR 내부에서 발생하는 시간 지연으로 인해 기존 수신기의 수신 성능이 영향을 받을 수 있다는 문제가 제기되었다. 본 논문에서는 이러한 EDOCR을 이용한 SFN 구현에서 야기되는 시간 지연 문제를 해결하기 위해서, 시간 지연을 최소화 할 수 있는 복조, 등화, 그리고 재변조로 구성된 디지털 신호 처리(Digital Signal Processing: DSP) 기술들을 제안한다.

II. EDOCR의 구조 및 특징

DOCR은 그림 1처럼 송신기의 방송 신호가 약하게 수신되는 지역에 설치하여 난시청 지역을 해소하고 송신기 신호의 전송 영역을 넓히는 역할을 한다. 참고 문헌 [2]에서 기존 DOCR이 가지는 단점을 해결한 EDOCR을 제안하였으며, 그 구조는 그림 2와 같다. EDOCR은 Pre-selector, LNA(Low Noise Amplifier), 주파수 하향 변환기, 복조기, 등화기, 변조기, 주파수 상향 변환기, HPA(High Power Amplifier), 그리고 채널 필터로 구성된다. EDOCR의 구조는 FEC(Forward Error Correction) 복호/부호화부를 사용하지 않는 것을 제외하면, baseband decoding DOCR의 구조와 동일하다^[2]. EDOCR이 가지는 특징들은 다음과 같다:

- EDOCR은 FEC 복호 및 부호화부를 사용하지 않기 때문에 DOCR 입력 신호와 출력 신호가 다른, 즉 모호성(ambiguity) 문제를 가지지 않는다.
- EDOCR은 복조부를 사용하기 때문에 수신 신호의 선택성이 우수하다. 즉, 인접 채널 제거 능력이 우수하다.
- EDOCR은 TBD(Trellis Back Depth)가 1인 트렐리스 복호기를 판정 장치(decision device)로 가지는 블라인드(blind) DFE(Decision Feedback Equalizer)를 사용한다^[3]. 이러한 블라인드 DFE는 송신기와 DOCR 사이의 전송로에 의해 야기된 잡음 및 다중경로 신호를 제거할 수 있기 때문에, DOCR 출력 신호 품질을 입력 신호 보다 우수하게 만든다. 또한, DOCR 송/수신 안테나의 낮은 분리도(isolation)로 인해 야기된 피드백 신호를 제거할 수 있기 때문에, DOCR 송신 출력을 높일 수 있다.
- EDOCR은 재변조부를 사용하기 때문에 송신 신호의 RF Spectrum Mask 규격을 만족한다.

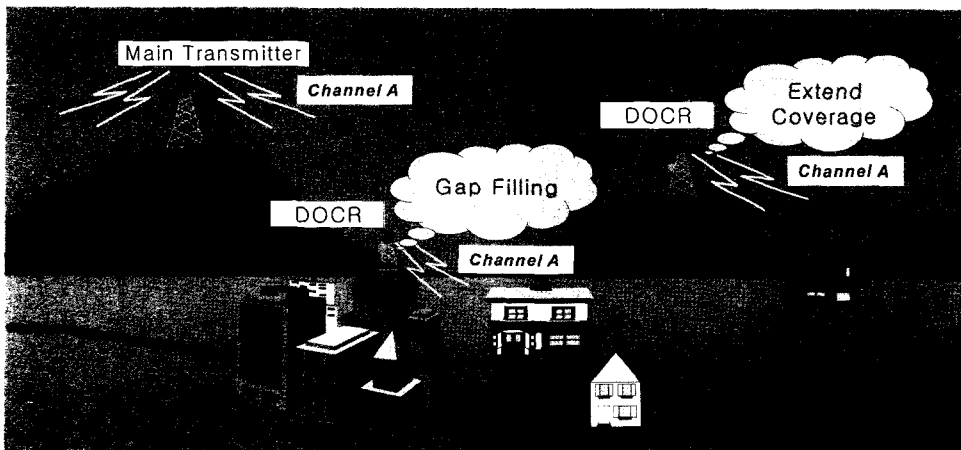


그림 1. DOCR 개념도
Fig. 1. Concept diagram of the DOCR

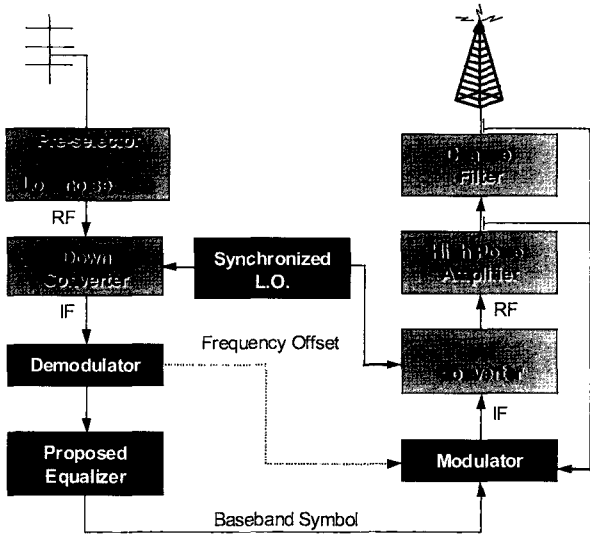


그림 2. EDOCR의 구조
Fig. 2. Structure of the EDOCR

III. EDOCR을 위한 DSP 기술

EDOCR을 위한 DSP 기술은 복조, 등화, 그리고 재변조로 구성된다. 각각의 기술들은 EDOCR의 성능 저하를 최소화 하면서 시간 지연을 줄이는 쪽으로 초점을 맞추어 개발하였다.

1. 복조 기술

1.1 기존의 복조 기술

기존의 VSB(Vestigial Side Bands) 복조 방법은 다음과 같은 3 단계로 구성된다:

- 1 단계: 중심 주파수가 f_{IF} 인 IF 신호는 유사 기저 대역 하향 변환기(Near Baseband Down Converter)에 의해 중심 주파수가 f_{NB} 인 유사 기저 대역 신호로 변환된다.
- 2 단계: 중심 주파수가 f_{NB} 인 신호는 유사 기저 대역 정합 필터(Near Baseband Matched Filter)에 의해 필터링 된다.
- 3 단계: 필터링된 신호는 기저 대역 하향 변환기(Baseband Down Converter)에 의해 중심 주파수가 2.69 MHz에 위치하도록, 즉 파일럿 성분이 0 Hz에 위치하도록 변환되며, LPF(Low Pass Filter)에 의해 하모닉(harmonic) 성분이 제거되어 기저 대역 VSB 신호가 된다.

그림 3은 기존의 복조기 구조를 나타낸다. 기존 복조기는 유사 기저 대역 정합 필터를 통해 신호 대 잡음 비(Signal to Noise Ratio: SNR)를 최대화 시키고, LPF를 통해 하모닉 성분을 제거한다. 따라서, 기존의 복조 방법은 두 개의 시간 지연 소자, 즉 정합 필터와 LPF를 가지며, 두 필터에 의한 시간 지연은 사용되는 필터의 탭 수에 의해 결정된다.

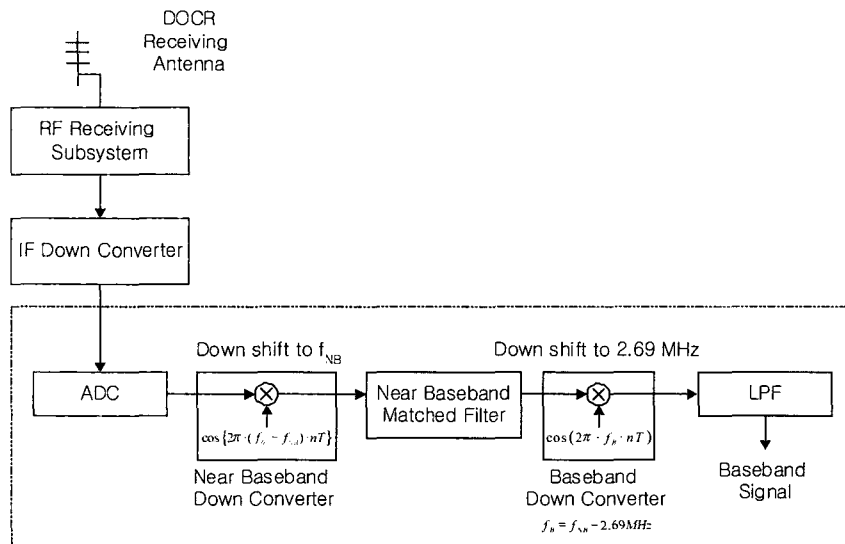


그림 3. 기존 복조기의 구조
Fig. 3. Structure of the conventional demodulator

2. EDOCR을 위해 제안된 복조 기술

EDOCR을 위해 제안된 VSB 복조 방법은 다음과 같은 3 단계로 구성된다:

- 1 단계: 중심 주파수가 f_{IF} 인 IF 신호는 I/Q 하향 변환기에 의해 중심 주파수가 0 Hz인 신호로 변환된다.

- 2 단계: 중심 주파수가 0 Hz인 I와 Q 성분은 기저 대역 정합 필터 쌍(pair)에 의해 필터링 된다.
- 3 단계: 필터링된 I와 Q 성분은 I/Q 상향 변환기에 의해 중심 주파수가 2.69 MHz에 위치하도록, 즉 파일럿 성분이 0 Hz에 위치하도록 변환되며, 기저 대역 VSB 신호를 형성하기 위해 합쳐진다.

그림 4와 5는 제안된 복조기의 구조 및 주파수 영역에서의 복조 과정을 나타낸다. 제안된 복조기의 기저 대역 정합

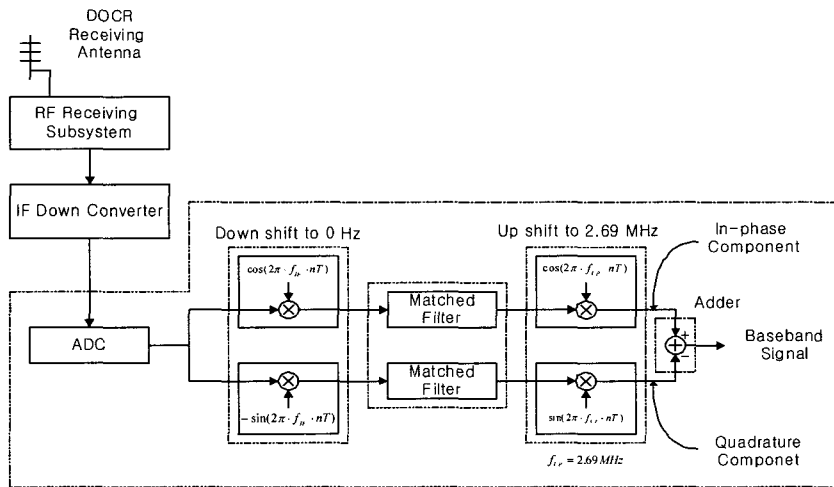


그림 4. 제안된 복조기의 구조
Fig. 4. Structure of the proposed demodulator

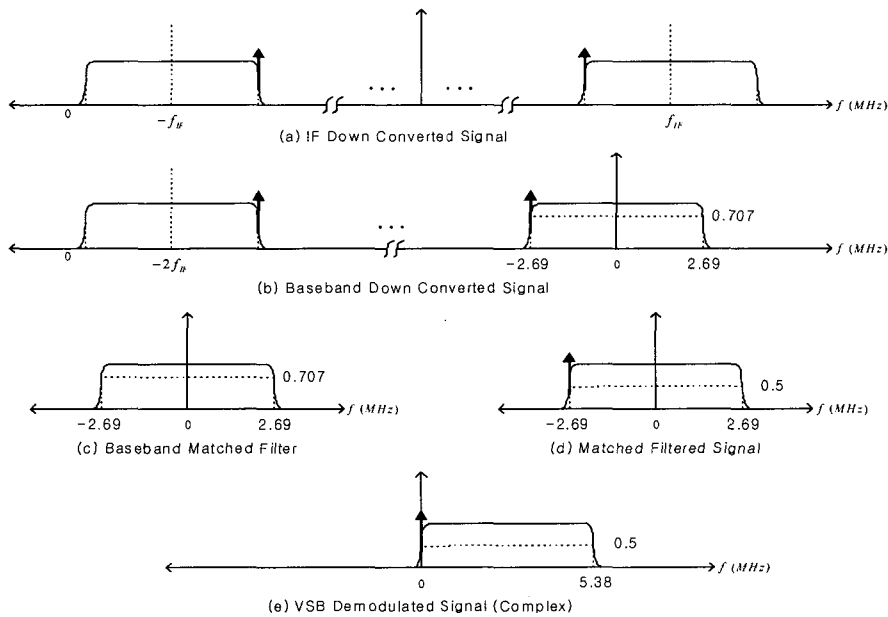


그림 5. 주파수 영역에서의 복조 과정
Fig. 5. Demodulation process in frequency domain

필터는 수신 SNR을 최대화 시킬 뿐만 아니라 LPF 역할을 함께 수행한다. 따라서, 제안된 복조기는 하모닉 성분을 제거하기 위한 부가적인 LPF가 필요하지 않기 때문에 시간 지연 소자가 1개로 줄어들게 되어 2개인 기존 방식보다 시간 지연이 줄어들게 된다.

일반적으로 정합 필터는 SRRC(Square Root Raised Cosine) 필터를 사용한다. 이론적으로 ISI(Inter-Symbol Interference)를 완벽히 제거하기 위해서는 무한대의 SRRC 필터 탭 수가 요구된다. 하지만, 실제로는 수 백 탭의 SRRC 필터만으로도 ISI를 충분히 제거할 수 있다. SRRC 필터 탭 수가 증가하면, SNR은 향상되지만 시간 지연이 증가한다. 따라서, SRRC 필터의 탭 수는 SNR 성능과 시간 지연을 고려하여 결정되어야 한다. EDOCR 시스템에서는 등화기가 수신 신호의 SNR을 향상시키고 짧은 탭의 정합 필터로 인해 야기된 왜곡들을 보상하기 때문에, SRRC 필터의 탭 수를 감소시켜 시간 지연을 줄이는 것이 바람직하다.

심볼들이 ATSC 시스템 심볼 레이트(symbol rate)의 4배 만큼 오버 샘플링(over-sampling)되었다고 가정하였을 때,

정합 필터의 탭 수는 31~61 정도가 적절한 것으로 나타났다. 이러한 탭 수는 다양한 탭 수를 가지는 SRRC 필터에 대한 성능 분석의 결과를 바탕으로 하여 결정되었다. 실험 결과는 표 1과 그림 6에 나타내었으며, 표 1은 정합 필터의 탭 수와 시간 지연에 따른 SNR을, 그림 6은 정합 필터의 탭 수가 481, 121, 61, 31일 때 신호의 성상을 보여주고 있다. 전산 실험을 위해 송신기 SRRC 필터의 탭 수는 521로 두었으며, 다중경로와 잡음 신호가 없는 이상적인 채널을 가정하였다. 표 1에 의하면 SRRC 필터의 탭 수가 31일 때 SNR은 18.6 dB이지만, 복조기 후단의 등화기로 인해 SNR은 향상된다.

표 1. 정합 필터의 탭 수와 시간 지연에 따른 SNR

Fig. 1. The SNR values verse the number of taps of the matched filter

| Delay introduced (micro seconds) | 5.575 | 2.788 | 1.394 | 0.697 | 0.348 | 0.232 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Matched-filter output SNR (dB) | 58.1 | 50.8 | 42.3 | 25.7 | 18.6 | 17.1 |

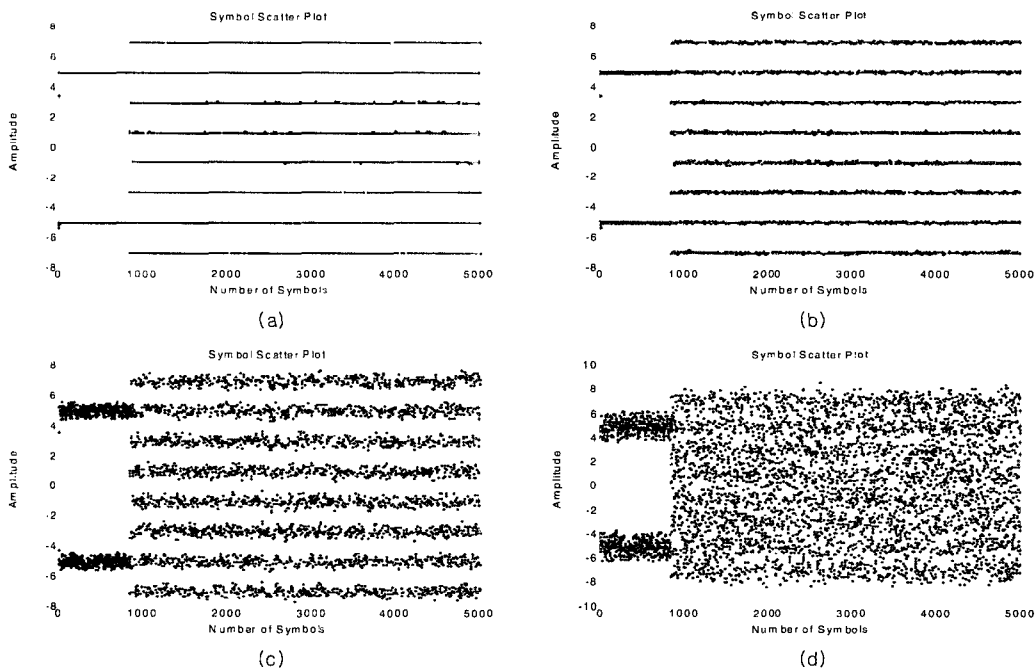


그림 6. SRRC 필터 탭 수에 따른 정합 필터링된 신호의 성상. (a) 정합 필터의 탭 수: 481, (b) 정합 필터의 탭 수: 121, (c) 정합 필터의 탭 수: 61, (d) 정합 필터의 탭 수: 31.

Fig. 6. Symbol scatter plot of the matched filtered signal by a SRRC filter under the ideal channel. (a) the number of taps of matched filter: 481, (b) the number of taps of matched filter: 121, (c) the number of taps of matched filter: 61, (d) the number of taps of matched filter: 31.

2. 트렐리스 복호기를 판정 장치로 사용하는 등화 기술

EDOCR에서 사용되는 등화기(Blind DFE)는 그림 7 (a) 처럼 FF(Feed-Forward: FIR) 필터부, FB(Feed-Back: IIR) 필터부, 그리고 intelligent 양자화기(trace-back depth 가 1인 트렐리스 복호기)로 구성된다^[3]. 등화기는 다양한 형태의 선형 왜곡, 즉 다중경로 왜곡에 의한 수신 신호의 ISI, 낮은 송/수신 안테나 분리도에 의한 궤환(feedback) 신호, 인접 채널 간섭, 짧은 탭 정합 필터의 사용으로 인해 야기된 왜곡 등을 보상하기 위해 사용된다. 또한, intelligent 양자화기는 오류 정정 능력을 가지고 있기 때문에, SNR 대비 BER(Bit Error Ratio) 성능을 향상시킨다. 그러나, 이러한 EDOCR에서의 등화기의 도입은 불가피하게 시간 지연을 발생시켜 EDOCR의 시스템 시간 지연을 증가시키는 원인이 된다.

EDOCR의 시스템 지연은 기존 ATSC 수신기의 수신 성능에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로, EDOCR을 통한 SFN 구현을 위해서는 등화기에서 발생하는 시간 지연을 최소화 하여야 한다. 이를 위해, 등화기의 두 부분을 다음과 같이 고려하였다.

- 필터 탭 할당: 필터에 의한 시간 지연은 FF 필터를 causal 부분과 anti-causal 부분으로 양분하는 reference 탭의 위치에 의해 결정된다. 시간 지연을 최소화하기 위해서는 reference 탭의 위치를 최대한 왼쪽에 두어야 한다. 하지만, reference 탭의 위치는 등화기 성능에 영향을 미치기 때문에, 등화기의 성능과 시간 지연의 trade-off를 고려해서 결정되어야 한다.
- Intelligent 양자화기: 판정 장치의 시간 지연을 없애기 위해, TBD(Trellis Back Depth)가 1인 트렐리스 복호기를 사용한다. 여기서, 트렐리스 복호기의 출력은 8-VSB 심볼(일반적인 ATSC 기존 수신기의 트렐리스 복호과정에 의해 결정된 2-비트 데이터가 아님)이며, 동시에 등화기의 출력이다. 따라서, 트렐리스 복호기에 의한 복호 지연은 없다. 또한, 등화기의 출력이 8-VSB 심볼이기 때문에, EDOCR 송/수신 신호가 다른 모호성 문제도 없다.

그림 7과 8은 intelligent 양자화기를 판정 장치로 가지는 등화기의 신호 정상 및 SER(Symbol Error Rate) 성능을 나타낸다. 그림 7 (a)는 제안된 등화기의 구조를, 그림 7 (b)는 등화기 입력 신호의 정상상을 각각 나타낸다. 다중경로 신호 및 잡음 등으로 인해 등화기 입력 신호의 눈(eye)은 닫혀 있지만, 등화 후 등화기 출력 신호(original output)는 그림 7 (c)처럼 눈이 열리게 된다. 그림 7 (c)에 의하면, 다중경로 신호는 등화기에 의해 제거되지만 잡음 성분은 여전히 남아 있다. 하지만, 판정 장치

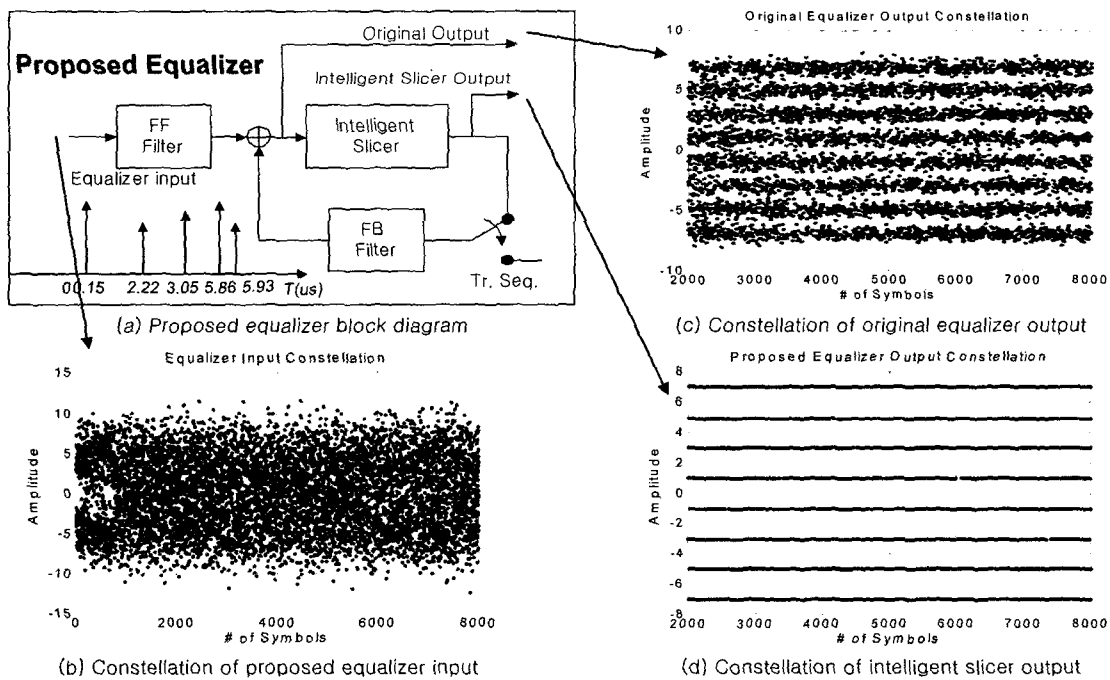
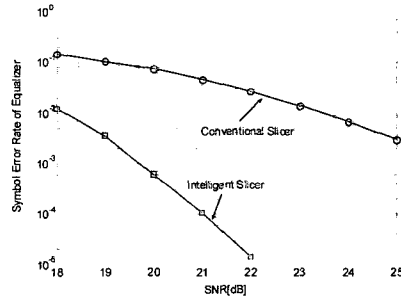


그림 7. Intelligent 양자화기를 사용하는 제안된 등화기의 구조 및 신호 정상
 Fig. 7. Structure and signal constellation of the proposed equalizer by using intelligent slicer

| | Time Delay [us] | Attenuation [dB] | Phase |
|---------------|-----------------|------------------|-------|
| Main Signal | 0 | 0 | 0 |
| Multi-path #1 | 0.15 | -13.8 | 0 |
| Multi-path #2 | 2.22 | -16.2 | 0 |
| Multi-path #3 | 3.05 | -14.9 | 0 |
| Multi-path #4 | 5.86 | -13.6 | 0 |
| Multi-path #5 | 5.93 | -16.4 | 0 |

(a) Brazil A channel profile



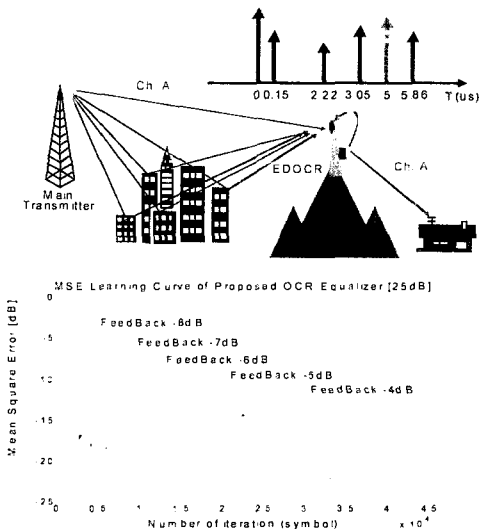
(b) SER performance of proposed equalizer

그림 8. 브라질 A 채널 프로파일 및 intelligent 양자화기의 SER 성능

Fig. 8. Brazil A channel profile and SER performance of the intelligent slicer

로 사용된 intelligent 양자화기는 오류 정정 능력을 가지고 있기 때문에, 등화 후 잔존하는 잡음 성분을 제거할 수 있고, 그 출력 신호는 그림 7(d)와 같다. 그림 8(b)는 그림 8(a)와 같은 브라질 A 채널에서의 intelligent 양자화기와 기존 양자화기의 SER 성능을 나타낸다. 그림 8(b)에 의하면, intelligent 양자화기는 기존 양자화기에 비해 SER 성능이 5dB 이상 우수하며, 수신 SNR이 23dB 이상이면 error-free이다. 일반적으로 DOCR이 설치되는 곳에서는 충분히 높은 SNR이 확보되기 때문에, 송신기와 DOCR 사이의 전송로에 의해 야기된 잡음 및 다중경로 신호는 쉽게 제거된다.

EDOCR에서 사용되는 등화기는 송/수신 안테나의 낮은 분리도로 인해 야기된 궤환 신호를 제거할 수 있기 때문에, 상대적으로 높은 분리도가 확보되어 DOCR 시스템 구현에 있어서 가장 어려운 문제에 대한 해결책을 제시해 준다. 그림 9는 5 μs의 지연(EDOCR 시스템 지연에 대응)을 갖는 궤환 신호의 크기가 -4 dB부터 -8 dB까지 변화하고, EDOCR 수신 신호의 SNR이 25dB이며, 다중경로 신호 및 인접 채널이 존재할 때 등화기의 MSE(Mean Square Error) 및 SER 성능을 나타낸다. 그림 9에 의하면 궤환 신호의 크기가 -4 dB보다 작을 때, 등화기는 궤환 신호를 완벽히 제거한다.



(b) MSE convergence of the proposed equalizer

| | Time Delay [us] | Attenuation [dB] | Phase |
|----------------|-----------------|------------------|-------|
| Main Signal | 0 | 0 | 0 |
| Multi-path | 0.15 | -13.8 | 0 |
| Multi-path | 2.22 | -16.2 | 0 |
| Multi-path | 3.05 | -14.9 | 0 |
| EDOCR feedback | 5 | -4~-8 | 0 |
| Multi-path | 5.86 | -13.6 | 0 |

(a) Received signal profile with feedback coupling

| | Original Output SER | Proposed Output SER |
|------------------|---------------------|---------------------|
| Feed back [-8dB] | 3.24e-003 | 0 |
| Feed back [-7dB] | 3.57e-003 | 0 |
| Feed back [-6dB] | 4.13e-003 | 0 |
| Feed back [-5dB] | 4.98e-003 | 0 |
| Feed back [-4dB] | 5.78e-003 | 0 |

(c) SER performance of equalizer output with feedback coupling

그림 9. Intelligent 양자화기를 사용하는 제안된 등화기의 성능

Fig. 9. Performance of the proposed equalizer by using intelligent slicer

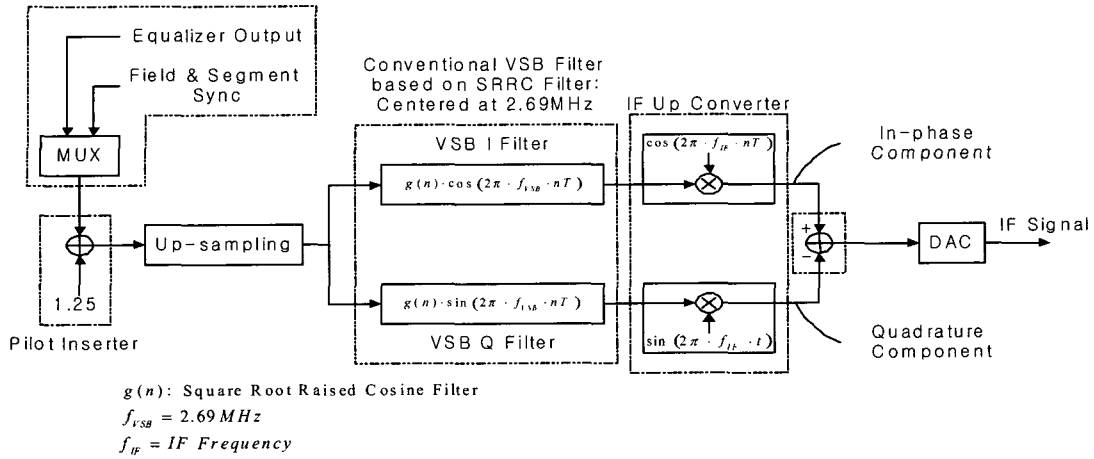


그림 10. 기존 재변조기의 구조
 Fig. 10. Structure of the conventional remodulator

3. 재변조 기술

3.1. 기존의 재변조 기술

기존의 VSB 재변조 방법은 다음과 같은 3 단계로 구성된다.

- 1 단계: 등화기 출력 신호, 필드(field) 및 세그먼트(segment) 동기 신호로 구성된 프레임(frame) 신호는 파일럿(pilot) 신호가 삽입되고, 업 샘플링(up-sampling) 된다.
- 2 단계: 업 샘플링된 프레임 신호는 SRRC 필터를 기반으로 한

VSB I/Q 필터에 의해 필터링 된다.

- 3 단계: 중심 주파수가 2.69 MHz인 VSB 필터링된 I와 Q 성분은 I/Q 상향 변환기에 의해 중심 주파수가 f_{if} 에 위치하도록 변환되며, IF 대역의 디지털 VSB 신호를 형성하기 위해 합쳐진다.

그림 10은 기존 재변조기의 구조를 나타낸다. 재변조기에 의한 시간 지연은 VSB 필터링을 위해 사용된 필터의 탭 수에 의해 결정된다.

일반적으로 VSB 필터에 의해 생성된 신호는 그림 11과 같은 RF Spectrum Mask 규격을 만족해야 한다. 심볼들이

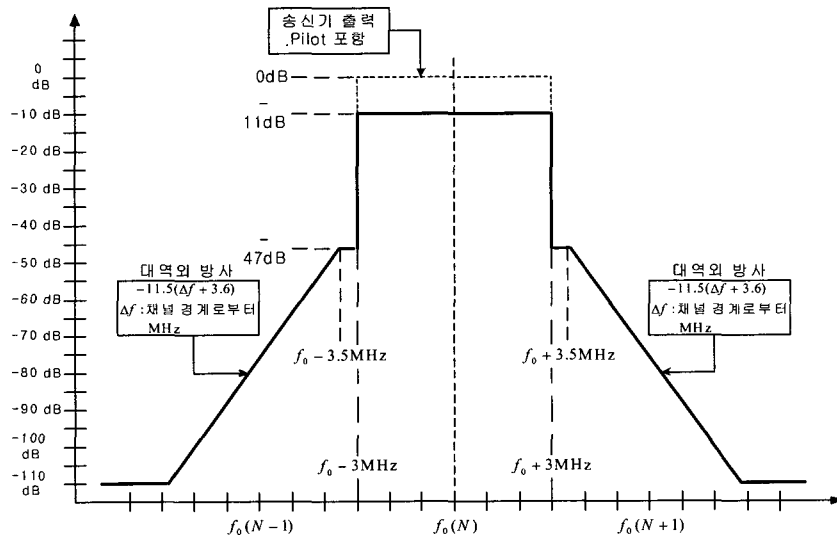


그림 11. RF 스펙트럼 마스크
 Fig. 11. RF Spectrum Mask

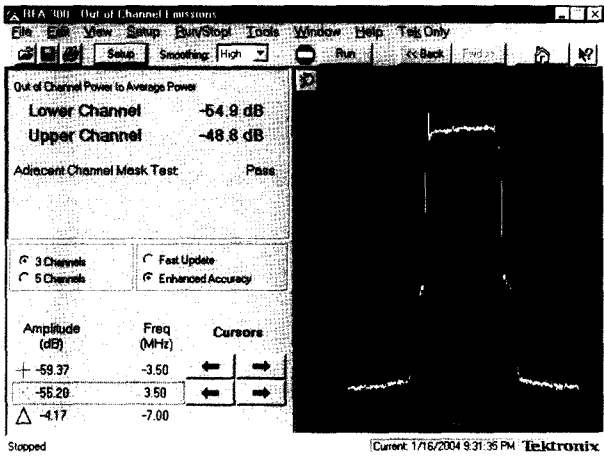


그림 12. 521 탭의 SRRC 필터와 RF 채널 필터에 의해 필터링된 VSB 신호의 송신 Spectrum
 Fig. 12. Transmission spectrum of the VSB signal which is filtered by the SRRC filter with 521 taps and channel filter

ATSC 시스템 심볼 레이트의 4배만큼 업 샘플링 되었다고 가정하였을 때, SRRC 필터를 사용하여 생성된 VSB 필터부는 500 탭 이상을 사용해야 RF Spectrum Mask 규격을 만족한다고 알려져 있다. 그림 12는 업 샘플링 비율이 4일 때, 521 탭의 SRRC 필터와 RF 채널 필터에 의해 필터링된 VSB 신호의 송신 스펙트럼을 RFA 300 장비로 측정한 결과를 나타낸 것이다. 그림 12에 의하면, 521 탭의 SRRC

필터로 구성된 VSB 필터는 RF Spectrum Mask 규격을 만족하고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 500 탭 이상의 SRRC 필터를 사용하는 VSB 재변조부는 약 5.8us 이상의 시간 지연을 가지기 때문에, 상대적으로 긴 시간 지연이 허용되는 송신기에서는 사용할 수 있지만, 짧은 시간 지연이 요구되는 EDOCR에서는 부적합하다.

3.2. EDOCR을 위해 제안된 재변조 기술

EDOCR을 위해 제안된 VSB 복조 방법은 다음과 같은 3 단계로 구성된다:

- 1 단계: 등화기 출력 신호, 필드(field) 및 세그먼트(segment) 동기 신호로 구성된 프레임(frame) 신호는 파일럿(pilot) 신호가 삽입되고, 업 샘플링(up-sampling) 된다.
- 2 단계: 업 샘플링된 프레임 신호는 ER(Equi-Ripple) 필터를 기반으로 한 Windowed VSB I/Q 필터에 의해 필터링 된다.
- 3 단계: 중심 주파수가 2.69 MHz인 VSB 필터링된 I와 Q 성분은 I/Q 상향 변환기에 의해 중심 주파수가 f_{IF} 에 위치하도록 변환되며, IF 대역의 디지털 VSB 신호를 형성하기 위해 합쳐진다.

그림 13과 14는 EDOCR을 위해 제안된 재변조기 구조 및 주파수 영역에서의 재변조 과정을 보여주고 있다. 제안된 재변조기는 SRRC 필터 대신 ER 필터를 기반으로 한 Windowed VSB 필터를 사용하기 때문에, 적은 탭 수만으로 RF Spectrum Mask를 만족할 수 있다. 한 예로, 기존의

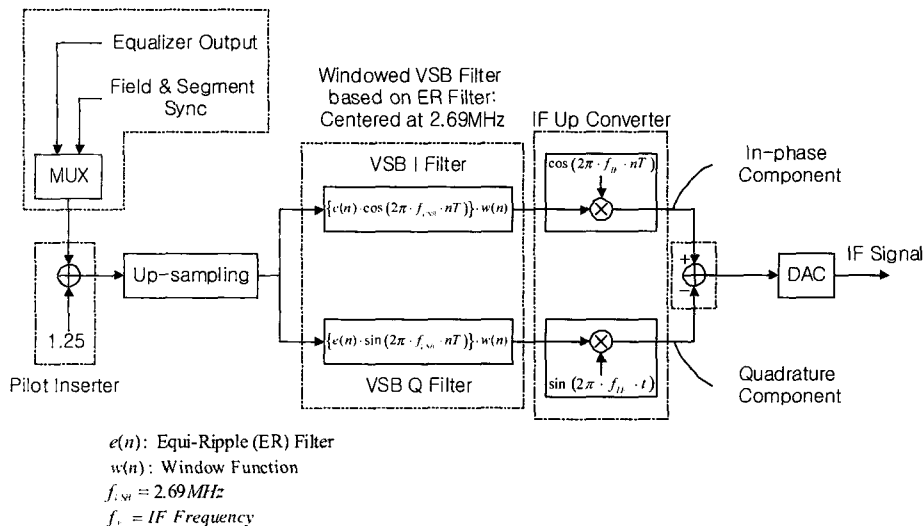


그림 13. 제안된 재변조기의 구조
 Fig. 13. Structure of the proposed remodulator

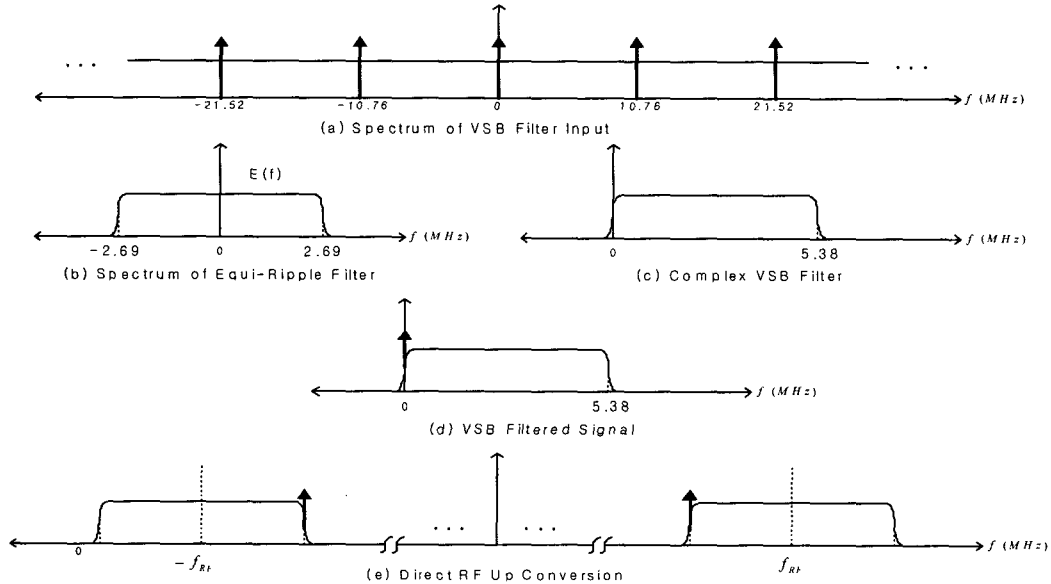


그림 14. 주파수 영역에서의 재변조 과정
Fig. 14. Remodulation process in frequency domain

VSB 필터부는 업 샘플링 비율이 4일 때, 500 탭 이상의 SRRC 필터를 사용해야 Spectrum Mask 규격을 만족하지만, 제안된 Windowed VSB 필터부는 100 탭 이상의 ER 필터만으로 RF Spectrum Mask 규격을 만족할 수 있다. 그림 15는 업 샘플링 비율이 4일 때, 141 탭의 ER 필터를

기반으로 한 Windowed VSB 필터와 RF 채널 필터에 의해 필터링된 VSB 신호의 송신 스펙트럼을 RFA 300 장비로 측정한 결과를 나타낸 것이다. 그림 14에 의하면, ER 필터로 만들어진 Windowed VSB 필터는 141 탭으로도 RF Spectrum Mask 규격을 충분히 만족시키고 있음을 볼 수 있다. 이 경우에, VSB 필터에서 발생하는 시간 지연은 1.6 μ s로서 521 탭의 SRRC 필터를 사용할 때 발생하는 5.8 μ s 보다 훨씬 줄어들게 된다.

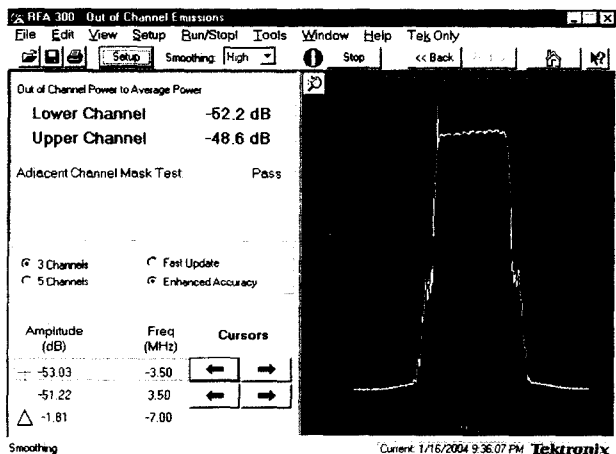


그림 15. 141 탭의 ER 필터를 기반으로 한 Windowed VSB 필터와 RF 채널 필터에 의해 필터링된 VSB 신호의 송신 Spectrum
Fig. 15 Transmission spectrum of the VSB signal which is filtered by the ER filter with 141 taps and channel filter

그러나, ER 필터를 기반으로 한 Windowed VSB 필터는 이상적인 Nyquist PSF(Pulse Shaping Filter)가 아니기 때문에, 시간 지연을 줄이기 위해 필터의 탭 수를 줄이게 되면 재전송되는 신호의 SNR이 감소한다. 그림 16 (a)와 (b)는 VSB 필터에 따른 재전송된 신호의 SNR 성능을 나타낸다. VSB 필터에 따른 SNR 성능을 비교하기 위해 재전송 채널은 이상적인 채널로 가정하였으며, 기존 ATSC 수신기의 정합 필터 (SRRC 필터)의 탭 수는 121로 두었다. 521 탭의 SRRC 필터에 의해 생성된 재전송 신호에 대한 복조 신호의 SNR은 42.3 dB이고, 141 탭의 ER 필터로 구성된 Windowed VSB 필터에 대응되는 SNR은 30.6dB이다. 약 12 dB의 SNR 감소가 존재하지만, 이는 전치 등화기 (pre-equalizer)에서 보상될 수 있다. 즉, 전치 등화기는 채널 필터에 의한 왜곡을 보상할 뿐만 아니라 이상적이지 못

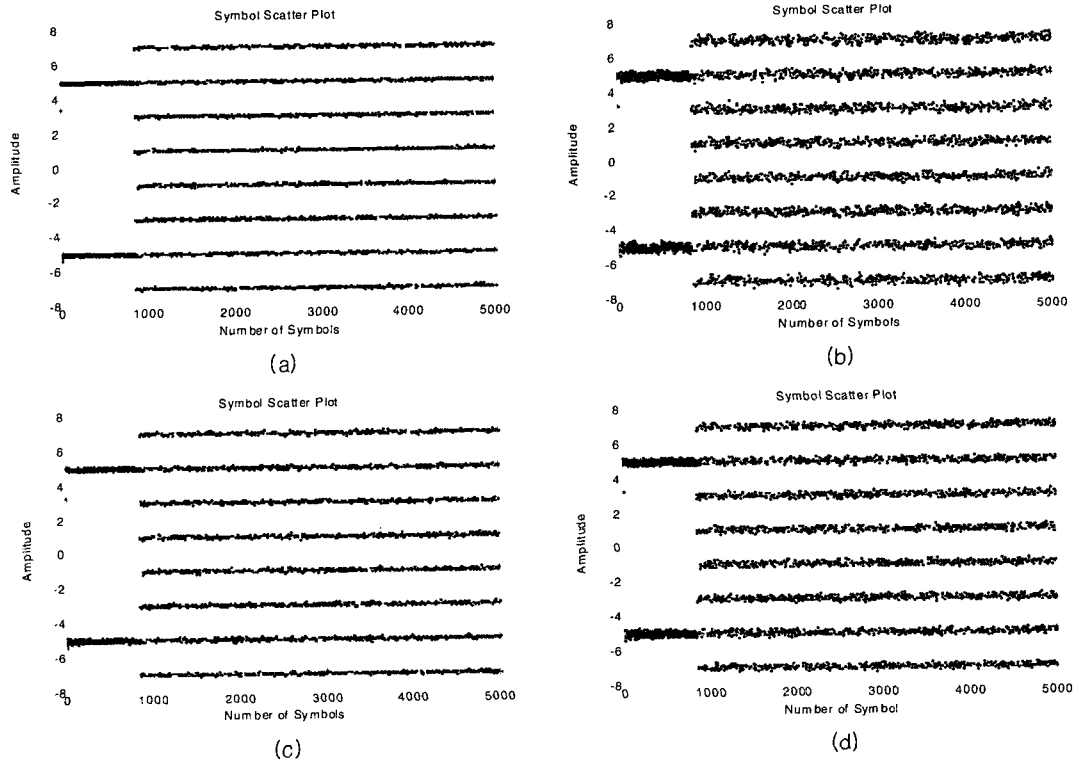


그림 16. VSB 필터에 따른 재전송된 신호의 성상 및 전치 등화기의 성능. (a) 521 탭의 SRRC 필터, SNR = 42.3dB, (b) 전치 등화기를 사용하지 않은 141 탭의 ER 필터, SNR = 30.6dB, (c) Reference 탭의 위치가 20인 101 탭의 전치 등화기를 가지는 141 탭의 ER 필터, SNR = 41.5 dB, (d) Reference 탭의 위치가 10인 101 탭의 전치 등화기를 가지는 141 탭의 ER 필터, SNR = 33.7 dB

Fig. 16. Symbol scatter plot of the retransmitted VSB signal according to VSB filter and performance of the pre-equalizer. (a) SRRC filter with 521 taps. SNR = 42.3dB, (b) ER filter with 141 taps without the pre-equalizer, SNR = 30.6dB, (c) ER filter with 141 taps and the 101-tap pre-equalizer (center tap: 20), SNR = 41.5dB, (d) ER filter with 141 taps and 101-tap pre-equalizer (center tap: 10), SNR = 33.7dB

한 PSF로 인해 야기되는 SNR 감소를 보상할 수 있다. 그림 16 (c)와 (d)는 ER 필터로 인한 SNR 감소를 보상하기 위해 reference 탭의 위치가 10과 20인 101 탭 전치 등화기

의 성능을 나타낸다. 표 2는 reference 탭의 위치에 따른 전치 등화기의 성능 및 재변조부의 시간 지연을 나타낸다. 재전송되는 신호의 SNR이 27dB 이상이면 ATSC 시스템 송신 규격을 만족하기 때문에, 재전송을 위한 경우라면 reference 탭의 위치가 10인 101 탭의 전치 등화기 정도면 충분하다.

| Output SNR [dB] | 33.7 | 33.8 | 41.5 |
|---|-------|-------|-------|
| Pre-equalization delay [μ s] | 0.836 | 1.301 | 1.765 |
| 141 windowing VSB filter delay [μ s] | 1.626 | 1.626 | 1.626 |
| Total re-modulation delay [μ s] | 2.462 | 2.927 | 3.392 |

표 2. Reference 탭의 위치에 따른 재전송되는 신호의 SNR 및 재변조부의 시간 지연
Fig. 2. The SNR values and time delay of remodulator verse the position of the reference tap of the pre-equalizer

IV. EDOCR의 시스템 지연

본 절에서는 EDOCR의 전체 시스템 지연에 관하여 살펴본다. EDOCR의 시스템 지연은 아날로그 소자에 의한 지연, 실제 구현 시 발생하는 clock의 mismatch로 인한 지연, 그리고 디지털 소자에 의한 지연으로 나누어진다. 아날로그

소자에 의한 시간 지연은 주파수 상/하 향 변환 시 생기는 하모닉 성분을 제거하기 위한 다양한 필터들과 FCC 마스크를 위한 채널 필터 등에 의해 주로 발생한다. 아날로그 소자에 의한 시간 지연은 상대적으로 낮으며, 그 시간 지연은 약 $0.45 \mu\text{s}$ 정도이다. 또한, 실제 구현시 발생하는 clock의 mismatch로 인한 시간 지연은 아주 작으며, 약 $0.2 \mu\text{s}$ 정도이다.

디지털 소자에 의한 시간 지연은 ADC(Analog to Digital Converter), DAC(Digital to Analog Converter), 복조, 등화, 그리고 재변조에 의해 발생한다. ADC/DAC는 사용하는 칩에 따라 시간 지연이 다양하지만, 일반적으로 ADC는 약 $0.2 \mu\text{s}$, DAC는 약 $0.5 \mu\text{s}$ 의 시간 지연을 각각 가진다.

3.1 절에서 살펴본 것처럼, 기존의 복조부는 2개의 시간 지연 소자(정합 필터와 LPF)를 가지며, 제안된 복조부는 하나의 시간 지연 소자(정합 필터)만을 가진다. 심볼들이 ATSC 시스템 심볼 레이트의 4배만큼 오버 샘플링되었다고 가정하였을 때, 일반적으로 기존의 복조부는 121 탭 ($1.394 \mu\text{s}$) 이상의 정합 필터와 101 탭 ($1.161 \mu\text{s}$) 이상의 LPF를 가지며, 제안된 복조부는 61 탭 ($0.697 \mu\text{s}$)의 정합 필터만을 가진다.

3.2 절에 의하면, 등화부 시간 지연은 FF 필터의 reference 탭의 위치에 의해 결정된다. 기존 ATSC 수신기 등화부는 40 탭 이상의 FF 필터를 사용하며, reference 탭의 위치는 20 ($1.765 \mu\text{s}$) 이상이다. 하지만, 중계기가 위치하는 곳은 상대적으로 높은 곳이며 LOS (Line Of Sight)가 확보되어 pre-ghost가 거의 존재하지 않기 때문에, 중계기용 등화기는 FF 필터의 reference 탭의 위치를 상대적으로 줄일 수 있다. 다양한 전산 실험에 의하면, FF 탭 수가 40 일 때, reference 탭의 위치는 6 ($0.465 \mu\text{s}$)이 적당한 것으로 나타났다.

3.3 절에 의하면, 재변조부의 시간 지연은 VSB 필터의 종류에 따라 다양하다. 심볼들이 ATSC 시스템 심볼 레이트의 4배만큼 업 샘플링되었다고 가정하였을 때, 일반적으로 SRRC 필터를 사용하는 기존의 재변조부는 521 탭 ($6.039 \mu\text{s}$) 이상을 가져야 RF Spectrum 마스크를 만족한다. 하지만, ER 필터를 사용하는 제안된 VSB 필터부는 141 탭 ($1.626 \mu\text{s}$)만으로 RF Spectrum 마스크를 만족할 수 있다. 또한 기존의 재변조부는 채널 필터에 의한 선형 왜곡을 보상하기 위해 reference 탭의 위치가 20 ($1.765 \mu\text{s}$) 이상인 100 탭 이상의 전치 등화기를 사용하지만, 제안된 재변조부는 reference 탭의 위치가 10 ($0.836 \mu\text{s}$)인

101 탭의 전치 등화기를 사용한다. 표 3은 기존의 DSP 기술과 제안된 DSP 기술에 따른 EDOCR의 총 시간 지연을 나타낸다.

표 3. EDOCR의 총 시간 지연

Table 3. Total time delay of the EDOCR

| Subsystem | Delay Time [μs] | |
|----------------|------------------------------|----------|
| | Conventional | Proposed |
| Demodulator | 2.555 | 0.697 |
| Equalizer | 1.765 | 0.465 |
| Modulator | 7.804 | 2.462 |
| A/D | 0.200 | 0.200 |
| D/A | 0.500 | 0.500 |
| Analog Part | 0.450 | 0.450 |
| Implementation | 0.200 | 0.200 |
| Total Delay | 13.474 | 4.974 |

V. 결론 및 향후 전망

ATSC 지상파 DTV 시스템에서 EDOCR 기술은 SFN 구현을 가능케 하는 매우 핵심적인 기술로서, 주파수 이용 효율을 높일 수 있는 장점이 있지만, EDOCR 내부에서 발생하는 시간 지연으로 인해 기존 수신기의 수신 성능이 영향을 받을 수 있다는 문제가 있다. 본 논문에서는 EDOCR 내부에서 발생하는 시간 지연을 최소화하기 위한 복조, 등화, 그리고 재변조로 구성된 DSP 기술들을 제안하였다. 제안된 복조 기술은 기저 대역 정합 필터를 사용하여 수신 SNR의 최대화와 LPF 과정을 수행하였으며, 하모닉 성분을 제거하기 위한 부가적인 LPF가 필요하지 않기 때문에 시간 지연이 줄어들었다. 제안된 등화기는 다양한 형태의 선형 왜곡을 보상하기 위해 FF 필터부, FB 필터부, 그리고 intelligent 양자화기로 구성되며, 오류 정정 능력을 가지고 있기 때문에 SNR 대비 BER 성능을 향상시켰다. 제안된 재변조기는 SRRC 필터 대신 ER 필터를 기반으로 한 Windowed VSB 필터를 사용하기 때문에, 적은 탭 수만으로 RF Spectrum Mask를 만족할 수 있었다. 또한, 본 논문에서는 하드웨어 구현에 도움이 될 수 있도록, 광범위한 전산 실험을 통해 적합한 필터의 탭 수를 다양하게 제시하였다.

참 고 문 헌

[1] ATSC Recommended Practice: Design Of Synchronized Multiple Transmitter Networks, Doc. A/111, Sept. 2004.

[2] Y. T. Lee, S. I. Park, H. M. Eum, H. N. Kim, S. W. Kim, and S. I. Lee, "A Novel Digital On-Channel Repeater for Single Frequency Network in ATSC System," NAB Broadcast Engineering Conference Proceedings, pp. 128~133, 2004.

[3] H.-N. Kim, S. I. Park, and S. W. Kim, "Performance Analysis of Error Propagation Effects in the DFE for ATSC DTV Receivers," IEEE Trans. on Broadcasting, Vol. 49, pp. 249~257, Sept. 2003.

저 자 소 개



박 성 익

- 1996년 3월~2000년 2월 : 한양대학교 전자전기공학부 (공학사)
- 2000년 3월~2002년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
- 2002년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 방송시스템연구그룹 연구원
- 주관심분야 : 채널코딩, 디지털 신호처리, DTV 전송시스템



음 호 민

- 1992년 3월~1998년 2월 : 고려대학교 전파공학과 (공학사)
- 1998년 3월~2000년 2월 : 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2000년 5월~현재 : 한국전자통신연구원 방송시스템연구그룹 연구원
- 주관심분야 : 영상 신호처리, DTV 전송시스템



이 용 태

- 1989년 3월~1993년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
- 1993년 8월~1995년 8월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
- 2002년 8월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
- 1995년 8월~현재 : 한국전자통신연구원 방송시스템연구그룹 선임연구원
- 주관심분야 : RF 신호처리, 디지털 신호처리, DTV 전송시스템



김 흥 목

- 1989년 3월~1993년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
- 1993년 2월~1995년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
- 1995년 3월~2001년 12월 : 포스코 기술연구소 근무
- 2002년 1월~2003년 10월 : (주)맥스웨이브 연구개발팀 팀장
- 2004년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 방송시스템연구그룹 선임연구원
- 주관심분야 : RF 신호처리, 디지털 신호처리, DTV 전송시스템

 저 자 소 개



서 재 현

- 1993년 3월~1999년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1999년 3월~2001년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2001년 1월~현재 : 한국전자통신연구원 방송시스템연구그룹 연구원
- 주관심분야 : 디지털 방송시스템, 디지털 신호처리



김 형 남

- 1989년 3월~1993년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
- 1993년 3월~1995년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
- 1995년 3월~2000년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
- 2000년 3월~2000년 4월 : 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 박사후 연구원
- 2000년 5월~2003년 2월 : 한국전자통신연구원 방송시스템연구부 선임연구원
- 2003년 3월~현재 : 부산대학교 전자공학과 조교수
- 주관심분야 : 적응 신호처리, 채널등화, DTV 전송시스템



김 승 원

- 1982년 3월~1986년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
- 1986년 3월~1988년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1993년 8월~1999년 2월 : Florida University ECE (Electrical & Computer Engineering) (공학박사)
- 1989년 6월~현재 : 한국전자통신연구원 DTV 시스템연구팀 팀장
- 주관심분야 : 디지털 신호처리, DTV 전송시스템