

다중경로 신호에 대한 8-VSB 수신기의 성능 분석

Performance Analysis of 8-VSB Receiver against Multipath Signal

이종주[†], 임현우[†], 김대진[†], 이동두[‡]

[†] 전남대학교 전자공학과 및 RRC

[‡] 한국전자통신연구원 무선방송연구소

Jong Joo Lee[†], Hyun Woo Lim[†], Dae Jin Kim[†], Dong Doo Lee[‡]

[†] Department of Electronics Engineering, Chonnam National University

[‡] Electronics and Telecommunication Research Institute

요약문

본 논문에서는 8VSB 수신기가 다중경로신호에 따른 성능이 나쁜 것에 대한 원인 분석과 나아가 개선책을 제시하기 위해 다중경로 신호가 디지털 지상파 TV의 수신성능에 미치는 영향에 대해 수신단의 STR(Symbol Timing Recovery)과 등화기를 중심으로 분석한다. 첫째 등화기의 성능 분석을 위해 에코의 지연시간이 7.5 μsec 일 때 시불변 환경에서 전산 모의 실험을 하였다. 등화기 수렴후의 에코 레벨에 따른 TOV(Threshold of Visibility) S/N(Signal to Noise)를 구해보면 호주의 실험실 측정과는 달리 0 dB 에서도 S/N 이 26 dB 정도이면 등화기는 안정적으로 수렴한다. 둘째 세그먼트 동기 복원을 세그먼트 싱크 필터(Segment Sync: +1, +1, -1, -1)를 사용했을 때 짧은 시간 지연 에코와 긴 시간 지연 에코에 대해 S 커브를 보면 짧은 시간 지연 에코에서는 심볼 타이밍이 어긋났으며 긴 시간 지연 에코에서는 문제가 없이 타이밍 동기가 된다. 셋째 짧은 시간 지연 에코신호가 있을 때 세그먼트 동기 복원과 등화기를 연동한 전산 모의 실험을 하여 에코의 영향을 분석하고 FSE(Fractionally Spaced Equalizer) 등화기 사용에 따른 장점을 분석한다.

I. 서론

우리나라의 디지털 지상파 TV 전환 계획은 '96년 초에 정부가 지상파 방송 디지털화 계획을 발표하였고, '97년 11월에 미국 방식을 선정하여 '98년 8월에 규격을 확정 지었으며 2000년에 시험 방송을 거쳐 2001년에 본 방송을 개시한다. 또 2010년까지는 아날로그와 DTV(Digital Television)를 동시 방송을 실시하며, 2010년에 기존의 아날로그 방송을 중단할 계획을 가지고 계속 추진중이다. 국내 지상파 디지털 방송 표준으로 결정된 ATSC(Advanced Television Systems Committee) 방식이 초창기 제품으로 테스트한 결과 현재의 아날로그 방식보다 도시

* 본 논문은 한국전자통신연구원의 지원을 받아 수행된 위탁연구 중간 결과입니다.

형 난청 현상이 심할 가능성이 있고 실내 안테나로 수신할 경우 방송수신이 제대로 안 되는 등 예기치 않은 문제가 발생할 가능성이 있는 것으로 지적되고 있다. 미국의 경우 현재 미국 전역에서 59개 방송국을 운영하고 있는 싱글레어 브로드캐스트 그룹이 최근 ATSC 방식 지상파 방송의 수신 상태를 점검한 결과 도심에는 안테나를 정교하게 맞추어야 하고, 안테나 앞으로 차량이 지나가거나 고층 건물이 있을 경우에는 수신에 문제가 있다는 점을 지적하고 있다.

본 논문에서는 II장에서 8-VSB 디지털 지상파 TV의 수신단 STR(Symbol Timing Recovery)과 채널 등화기에 대해 설명하고 III장에서 전산 모의 실험 결과를 호주의 현장시험 결과와 비교 분석한다. 끝으로 IV장에서 결론을 맺고자 한다.

II. 8-VSB 수신기의 STR과 채널 등화기

1. 채널 등화기

그림 1은 8VSB 수신단에서 사용하는 결정 궤환 등화기(DFE: Decision Feedback Equalizer)를 나타낸다. 결정 궤환 등화기는 두 부분으로 되어 있는데 10.762 MHz 심볼 간격으로 LMS(Least Mean Squares) 알고리즘에 의해 계수를 갱신하고 -3 μsec 에서 17.85 μsec 의 지연시간을 갖는 에코를 극복할 수 있다. 전달 필터의 입력은 수신된 신호 $\{V_k\}$ 이고 궤환 필터의 입력은 이전에 검출된 심볼의 결정값과 학습 신호인 필드 동기 세그먼트이다. 필터 탭 계수 갱신은 LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 사용한다. 궤환 필터의 역할은 이전 값으로부터 추정된 결정값에서 ISI를 제거하는 것이다. 등화기의 출력 \hat{I}_k 는 다음 식(1)과 같다.

$$\hat{I}_k = \sum_{j=-k}^0 c_j v_{k-j} + \sum_{j=1}^{k_2} c_j \tilde{I}_{k-j} \quad \text{식(1)}$$

여기서 \hat{I}_k 는 k 번째 정보 심볼의 추정값이고 c_j 는 등화

기 탭의 계수이며 $\hat{\tau}_k$ 는 결정값을 나타낸다. 등화기는 ATSC 에서 사용한 것과 같이 전단에 64 탭과 궤환단에 192 개의 탭을 사용한다. LMS 알고리즘에 의한 계수 갱신은 식(2)와 같다.

$$C_{k+1} = C_k + \mu \varepsilon_k V_k^* \quad \text{식(2)}$$

여기서 C 와 V 는 전단에서는 64 개 원소와 궤환단에서는 192 개의 원소를 가지는 벡터이며 k 는 루프 반복 횟수를 나타낸다. ε_k 는 에러 신호를 나타내고 식 (3)과 같다.

$$\varepsilon_k = \tilde{I}_k - \hat{I}_k \quad \text{식(3)}$$

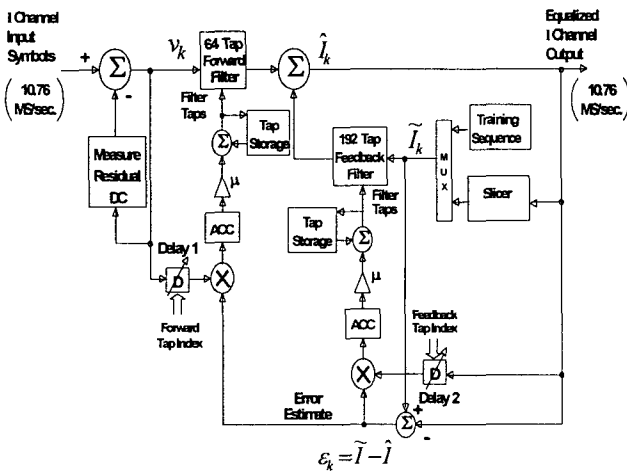


그림 1 8-VSB 수신단 채널 등화기 블록 구조

2. 심볼 타이밍 복원

데이터 세그먼트 동기 검출은 필터 탭 계수가 +1, -1, -1, +1 인 상관 필터(Correlation filter)를 사용하여 필터의 출력이 기준 값 이상 나오는 지점이 데이터 세그먼트 길이의 주기를 가지고 반복되면 그 지점을 데이터 세그먼트 동기 부분으로 한다. 심볼 타이밍 동기는 필터 탭 계수가 +1, +1, -1, -1 인 심볼 타이밍 검출 필터를 사용하여 구현한다.

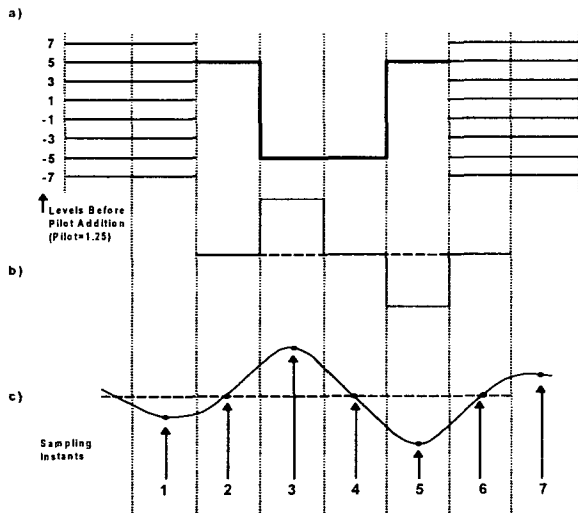


그림 2 데이터 세그먼트 동기 방법

그림 2의 a)는 데이터 세그먼트 싱크를 나타내고 이는 5 V, -5 V, -5 V, 5 V 의 네개의 심볼 구간을 차지하고 있다. 그림 2의 b)는 심볼 타이밍 검출 필터 +1, +1, -1, -1 를 사용했을 때 디지털적으로 한 심볼씩 옮겨 가면서 심볼 타이밍 검출 필터의 출력을 보이는데 2 번째에서 양의 값, 3 번째에서 영, 4 번째에서 음의 값이 나오고 있는 것을 알 수 있다. 실제로는 그림 2a)의 파형이 Raised Cosine 필터로 저역 필터가 되어 있기 때문에 그림 2b)가 c)처럼 나타난다. 그림 2c)는 4 의 위치에서 영점교차가 되는 전형적인 PLL 의 S 커브를 나타내며 4 번 위치로 수렴이 되도록 PLL 를 작동시킨다.

III. 전산모의 실험

8-VSB 송 수신기를 구현하고 성능을 평가하기 위해 케 이던스 사의 SPW(Signal Processing Worksystem) 툴을 사용하여 다중경로가 존재할 때 에코의 크기에 따른 임계 SN 을 구하는 모의 실험을 하였다.

1. 등화기

먼저 캐리어 동기와 심볼 타이밍 동기가 완벽하다 가정 하고 시뮬변 환경에서 부동소수점 전산모의 실험을 하였다. 등화기의 스텝 크기(step size)는 0.00001 이며 각각의 에코 레벨에 대해 10,000 심볼 이내에서 수렴을 하였으며, 수렴 후의 시스템 TOV SN 을 구하였다. SN 을 구하는데 있어서 신호 전력은 직접 신호와 에코 신호의 합한 것으로 계산되었다.

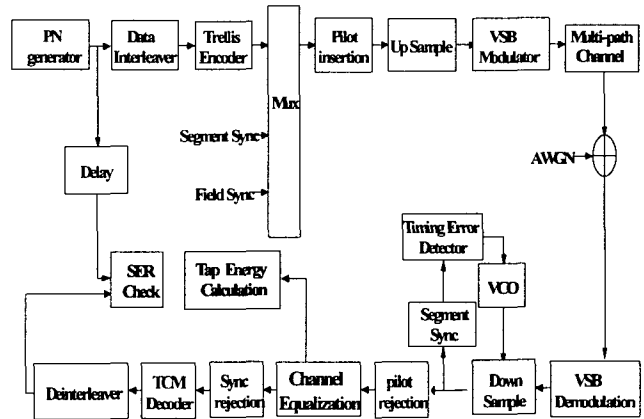


그림 3 8-VSB 송수신기 전산 모의 실험 구성도

그림 3은 전산모의 실험을 위한 8-VSB 송 수신기 시스템의 블록도이며, 그림 4는 호주에서 실시된 실험실 측정의 등 화기 에코 레벨에 따른 임계 C/N 의 관계를 나타내는데 8VSB 의 경우 에코레벨이 -3dB 이상이면 수신이 불가능한 것으로 보인다. 그림 5는 8-VSB 송수신 시스템에서 7.5 μ sec 에코에 대한 등화기 성능을 테스트한 결과이다. 결과에서 보듯이 등화기 의 성능만을 살펴본다면 0 dB 에코에서도 수렴하고 TOV SN

이 26 dB 임을 알 수 있다. 호주의 측정 결과와 차이가 나는 이유는 본 논문은 등화기만을 실험한 것이고 호주에서는 수신기 전체의 성능을 테스트한 것이기 때문이다. 위 결과를 볼 때 원리적으로 에코가 큰 경우 채널 등화가 안 되는 것으로 수신기 성능을 향상시키면 큰 에코 레벨에서도 타이밍 어려가 없다면 어려 없이 수신할 수 있다는 것을 알 수 있다.

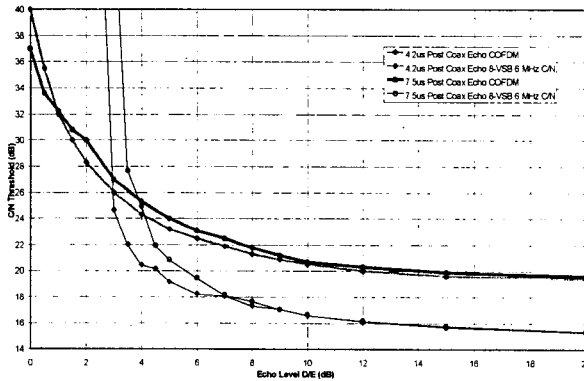


그림 4 호주에서 실시한 에코레벨에 따른 C/N 임계값

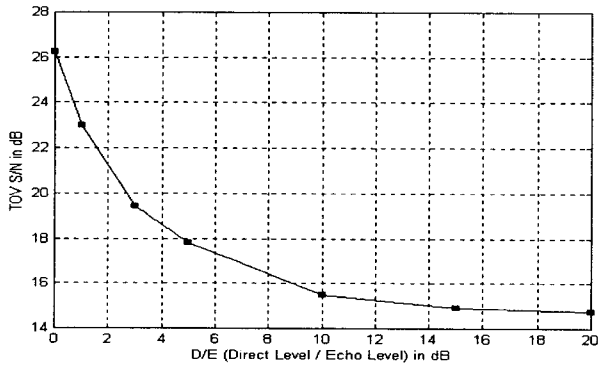


그림 5 7.5 μsec 에코에 대한 등화기 성능

2. 심볼 타이밍 복원

그림 6과 그림 7은 STR의 궤환을 끊고 출력단의 에러값을 평균해서 구한 S 커브이다. 그림 6는 직접 신호 레벨 대비 에코 레벨(E/D)이 -3 dB 일 때 각각의 지연시간에 대한 타이밍 위상 에러를 나타낸 것이고 이때 세그먼트 동기 복원은 세그먼트 싱크 필터(+1, +1, -1, -1) 통과 후 타이밍 에러를 검출하여 평균을 취한 값이 0가 되도록 맞추어진다. 짧은 지연 에코와 긴 지연 에코에 대해 S 커브를 보면 1.2 심볼 지연 에코에 대해서는 타이밍이 -40% 정도 어긋났으며 지연이 길어지면 다시 감소하여 1.8 심볼 지연 에코에서는 +30% 정도 어긋나고 지연 시간이 길어지면 문제 없이 타이밍이 동기 된다. 그래서 실내 수신에서는 짧은 에코가 많이 있어 심볼 타이밍이 잘 안될 경우 수신기가 제대로 동작이 안될 수 있다.

그림 7은 에코 지연 시간이 0.6 심볼 만큼 있을 경우의

에코 레벨(E/D)에 따른 S 커브를 나타낸다. 그림 7에서 타이밍 에러는 에코의 크기에 비례 하여 증가 하는 것을 알 수 있다.

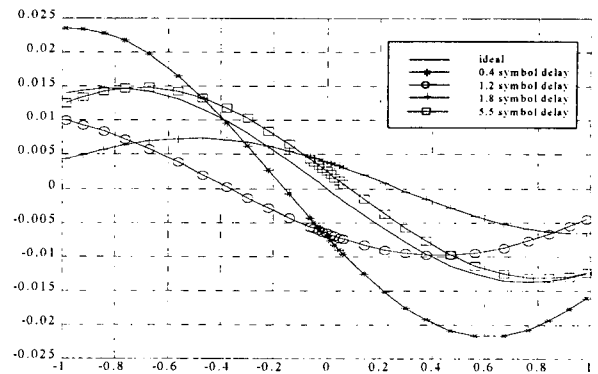


그림 6 에코레벨(E/D)이 -3 dB 인 경우의 S 커브

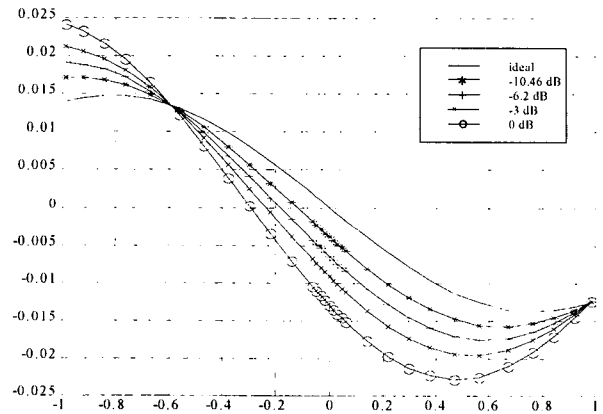


그림 7 에코레벨(E/D)에 따른 S 커브 변화(0.6T)

3. 심볼 타이밍 동기와 등화기를 연동한 전산 모의 실험

짧은 지연 에코에 의한 타이밍 에러의 영향을 분석하기 위해 1.2 심볼 지연 시간을 갖는 에코에 대해 각각의 레벨에 따른 TOV SN을 구해 보았다. 그림 8에서 알 수 있듯이 기존의 결정 궤환 등화기는 에코 레벨이 -5 dB 이상이면 아무리 SN을 증가 시켜도 TOV SER(Symbol Error Rate)을 만족 할 수 없다. 이의 해결 방안으로 본 논문에서는 FeedForward 영역에서는 FSE(Fractionally Spaced Equalizer) 사용을 제안 한다. 그림 1의 채널 등화기의 전단 필터 탭을 두 배로 늘려서 T/2 시간 간격을 가지는 FSE(Fractionally Spaced Equalizer)를 사용하고 Feedback 부분은 똑같은 DFE를 사용한다. 심볼 간격을 가지는 결정 궤환 등화기의 입력을 주파수 도메인에서 보면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_T(f) = \frac{1}{T} \sum_n X(f - \frac{n}{T}) e^{j2\pi(f - \frac{n}{T})\tau_0} \quad \text{식(4)}$$

그림 9은 심볼 간격으로 샘플링한 등화기 입력의 주파수 도메인 스펙트럼이다. Folded 스펙트럼에서 겹치는 부분의 위상

이 서로 달라서 직교 성분에서 서로 상쇄되는 현상이 일어나 나이퀴스트 조건을 만족하지 못해 ISI(Inter Symbol Interference)가 생긴다. 그러나 FSE를 사용하면 입력을 보통 T/2로 샘플링하기 때문에 스펙트럼 오버랩에 의한 aliasing이 없어 등화기에서 타이밍 에러에 의한 지연을 보상할 수 있다. 그림 8에서 알 수 있듯이 FSE는 1.2 심볼 지연 에코에 대해 에코레벨이 큰 경우에는 결정 궤환 등화기 보다 현저하게 우수한 성능을 보여 주고 있다.

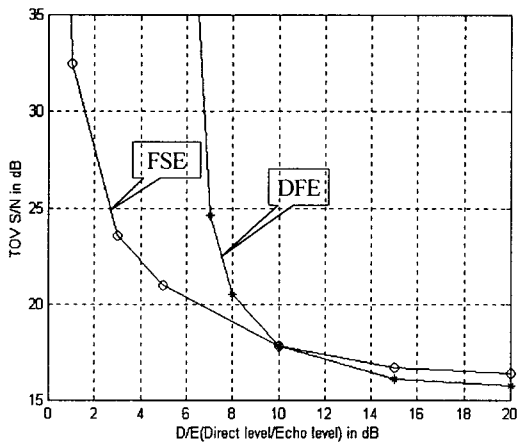


그림 8 에코레벨에 따른 시스템 TOV S/N

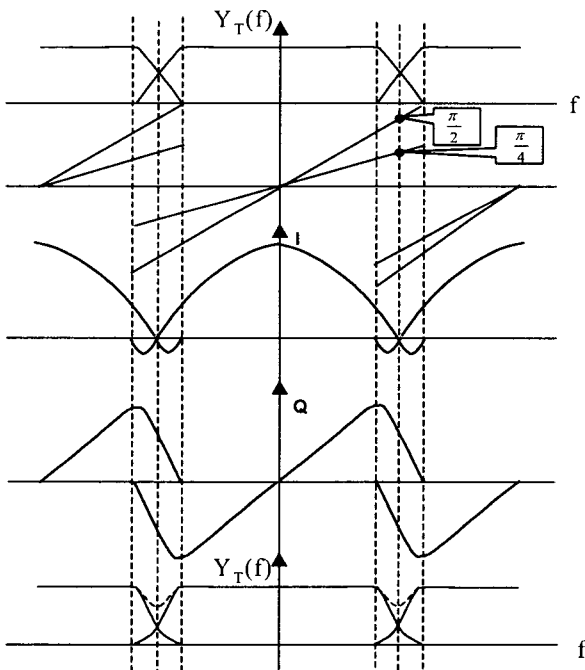


그림 9 심볼 간격 등화기의 입력 스펙트럼

그림 10은 1.2 심볼 지연을 갖는 에코의 크기에 따른 타이밍 위상 에러를 나타내는데 DFE는 에코 레벨이 -7dB 이상이면 타이밍 에러가 25% 이상 되어 채널 등화기가 제대로 동작하지 않는다.

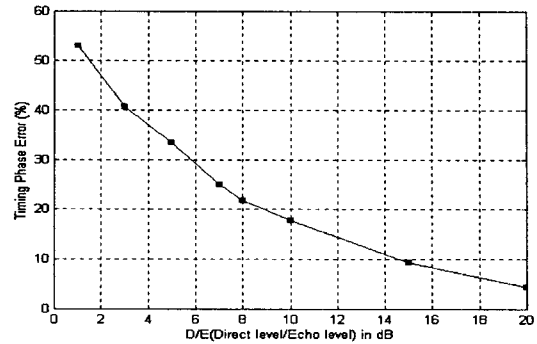


그림 10 에코레벨에 따른 Timing Phase error (%)

IV. 결론

본 논문에서는 8-VSB 디지털 지상파 TV의 수신성능을 저하시키는 요인이 되고 있는 다중경로에 의한 수신 성능을 분석하기 위해 채널 등화기와 STR 중심으로 전산 모의 실험하였다. 타이밍이 완벽하게 맞았다고 가정하고 등화기만을 고려할 때는 0 dB 에코레벨에서도 시스템 S/N이 26dB 정도면 TOV를 만족하였다. 그리고 STR과 연동하여 모의 실험을 할 경우 에코에 의한 타이밍 위상 에러를 살펴 보기 위해 S 곡선을 구해 보았다. 한 심볼 내외의 지연시간을 갖는 에코에서 타이밍이 가장 많이 어긋났으며 긴 지연 에코는 문제가 없었다. 기존의 DFE를 사용할 경우 한 심볼 내외의 짧은 지연 에코는 실내 수신에서 크게 문제가 될 수 있음을 알 수 있다. 1.2 심볼 지연 시간을 갖는 에코레벨에 대해 전산 모의 실험한 결과 기존의 결정 궤환 등화기를 이용할 경우 -7dB 이상에서는 수신 불가능함을 알 수 있다. 이를 극복하기 위해 본 논문에서는 Feedforward 부분은 FSE를 사용하는 DFE 사용을 제안하고 전산 모의 실험한 결과 에코레벨 -1dB까지 극복할 수 있음을 확인하였다. FSE는 탭수가 늘어나서 하드웨어가 복잡해지는 단점이 있지만 타이밍 위상 에러를 극복하는데 탁월한 성능을 보이기 때문에 짧은 지연 에코가 많이 있는 실내 수신에서 유용할 것이다.

참고문헌

- [1] ATSC Digital Television Standard, ATSC Doc. A/53, 1995.
- [2] ATSC, Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard, ATSC Doc. A/54, 1995.
- [3] N. Pickford, Laboratory testing of DTTB modulation systems, Laboratory Report 98/01, Australia Department of Communication and Arts, June 1998.
- [4] John G. Proakis, Digital Communications, McGRAW-HILL International Edition, 1995.