

# S-DMT 케이블 모뎀을 위한 심볼 타이밍 복원 알고리즘 성능평가

조병학\*

## 요약

잡음환경이 열악하고 대역폭이 부족한 HFC 망 상향채널에서 보다 나은 대칭형 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있는 S-DMT 방식의 상향 채널 케이블모뎀을 위한 심볼 타이밍 복원 알고리즘을 제안하고 그에 대한 성능을 평가하였다. 타이밍 복원 알고리즘은 시간 영역에 PN 시퀀스를 삽입하는 방식을 제안하였으며 AWGN, ISI, 및 임펄스 잡음 환경에서 시뮬레이션을 통해 성능을 평가 하였다. 성능 평가 결과, PN 시퀀스 삽입 알고리즘에 의한 타이밍 복원방식은 잡음 환경에 따라 타이밍 추정 성능이 매우 달라지며, 동일한 샘플링 클럭 오프셋에서 AWGN, ISI, 및 임펄스 잡음이 함께 존재하는 채널일 경우가 임펄스 잡음 채널 경우 보다 타이밍 실패 확률이  $10^{-3}$ 일 때의 Eb/No가 10dB 이상 열화되나 초기부터 샘플링 클럭 오프셋을 보정하여 최적화된 경우 잡음환경에 의한 성능차이가 있으나 비교적 양호한 타이밍 추정 성능을 보임을 확인 하였다.

## Performance Evaluation of Symbol Timing Recovery Algorithm for S-DMT Cable Modem

Byung-Hak Cho\*

## Abstract

In this paper, we propose and evaluate symbol timing recovery algorithm for S-DMT cable modem, which supports more channels and better quality symmetric multimedia services over HFC network. We adopt timing recovery algorithm of PN sequence insertion in time domain and evaluate the performance of it in various noise channel such as AWGN, ISI, impulse. We verified that performance of this algorithm is depends on the channel noise environment and sampling clock offset and that over 10 dB degradation of Eb/No is occurred at the timing failure probability of  $10^{-3}$  in the composite noise channel of AWGN, ISI, and impulse in comparison with impulse noise-alone channel. Finally, we verified that this algorithm showed good timing failure probability in case of sampling clock optimization was performed in advance.

Key words : Symbol timing recovery, PN sequence, Sampling clock offset, Cable Modem, S-DMT, HFC

## 1. 서론

최근 전 세계적으로 초고속 인터넷 확산과 더불어 케이블 모뎀이 널리 보급되고 있으나, 케이블 TV망의 구조적인 특성으로 인한 상향 채널의 잡음 깔대기(Noise Funneling)효과와 가정 내의 각종 전기 기기에서 발생하는 임펄스 잡음, HF 무선통신에 의한 협대역 간섭 등의 영향으로, 화상회의(videoconferencing), VoIP (Voice over IP), 일대일 파일 공유 등, 보다 넓은 대역폭과 QoS를 요구하는 대칭형 멀티미디어 서비스를 제공하는데 어려움이 있어왔다 [1].

이에 따라, CATV 망을 광대역 가입자망으로 활용하여 초고속 인터넷 액세스는 물론, VoIP, 화상회의,

peer-to-peer file sharing 등, 다양한 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있는 새로운 방식의 차세대 케이블 모뎀에 대한 기술 개발이 요구되고 있다[2][3].

지금까지는 5~42MHz 케이블 모뎀 상향 채널에 TDMA 방식을 이용한 QPSK, 16QAM 변조방식이 사용되어 왔다[4]. 그러나 보다 넓은 상향 대역폭을 요구하는 대칭형 멀티미디어 서비스를 위해서는 현재의 방식보다 상향 채널 용량을 증대시킬 수 있고, 잡음 면역성이 강하며 30Mbps 이상의 전송속도가 가능한 변조 기술이 필요하다. 이러한 차세대 케이블 모뎀을 위한 변 복조 기술로는 주파수 대역 확산 효과를 이용하는 S-CDMA(Synchronous CDMA) 방식과, 직교성(orthogonality)을 갖는 여러 개의 부반송파를 이용하여 동

\* 제일저자(First Author) : 조병학  
접수일 : 2005년 2 월 13 일, 완료일 : 2005년 2 월 20 일  
\* 한국정보통신기술대학 방송통신설비과 교수  
chobh@icpc.ac.kr

\* 본 연구는 2005년도 한국정보통신기술대학 학술 연구비 지원으로 수행되었음

시에 전송함으로써 유사한 확산 효과를 얻을 수 있는 S-DMT(Synchronous-Discrete Multi-Tone) 방식이 있다[5]-[7].

S-CDMA 방식은 DS-CDMA(Direct Sequence CDMA)기술에 근간을 두고 있으며 태생적으로 협대역 잡음에 강한 특성을 가지고 있어 Cable TV 망 상향 채널의 임펄스 잡음 환경에 대해서도 유리하다고 알려져 있고[1], S-DMT 방식은 ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line) 표준 전송 방식으로 선정되어 이용되고 있는 DMT 방식[9][10]과 원리적으로 동일하나 다대일(multi point-to-point)통신을 위해, 각 단말에서 전송한 데이터들이 수신단에서 동기 되도록 데이터 패킷을 적절히 지연하여 보냄으로써 일대일 통신환경에서의 DMT의 특성이 다대일의 통신환경에서도 그대로 유지될 것이라는 점에 착안하여 제안된 방식이다. 즉, 각각의 송신 단말이 데이터를 전송할 때 Head-End와의 물리적인 거리에 따라 적당히 지연하여 전송함으로써 각각의 보호 구간이 동기 되어 마치 한 개의 송신기에서 데이터를 전송하는 것처럼 함으로써 보호구간을 이용한 심볼간 간섭제거 효과를 얻고자하는 방식이다[8].

케이블 모뎀의 상향 채널 변조 기술로서 DMT 기술에 관심을 갖는 이유는 단일반송파 변조방식의 복잡한 등화기에 비해 단순한 구조의 등화기를 사용하여 채널의 영향을 보상할 수 있다는 점과, 심볼의 길이가 길어져 전송상의 임펄스 잡음, 에코 등에 더 강해지고, 전송 용량을 극대화할 수 있기 때문이다. 따라서 이 기술을 HFC 망에 적용하는 경우, 각 채널 용량에 따라 스펙트럼 효율을 최대화하여 그 채널에서 지원할 수 있는 전송률을 최대화 할 수 있고 잡음 확산효과에 의한 임펄스 잡음 면역성 강화 효과를 활용할 수 있다.

이러한 배경에 따라 본 논문에서는 S-DMT 방식 케이블모뎀 복조기 설계를 위하여 심볼 타이밍 복원(Symbol Timing Recovery) 알고리즘을 제안하고 그에 대한 성능을 평가하였다. S-DMT 방식에 적용 가능한 심볼 타이밍 복원 알고리즘[9]-[11]들을 비교 검토한 후 최적한 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 타이밍 실패확률(Timing Failure Probability)을 구해봄으로써 알고리즘에 대한 성능을 평가하였다. 성능 평가에 있어서 변조방식은 16QAM, 64QAM인 경우로 하였고, 통신 채널 환경은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)과 ISI(Inter-Symbol Interference) 및 케이블 모뎀 상향 채널에서 가장 문제 시 되는 임펄스 잡음 채널 환경을 적용하였다.

## 2. 심볼 타이밍 오프셋의 영향

S-DMT 복조기는 다음 그림 1과 같이 기능상 크게 심볼 타이밍 복원부와 반송파 복원부, 등화기부로 구성되며 이들 각 기능 블록을 Cable TV 망의 상향 채널 특성에 적합한 알고리즘을 선정하여 설계하여야 한

다. 첫 번째로 심볼 타이밍 복원 부를 설계하기에 앞서, 먼저 심볼 타이밍 오프셋이 데이터 복조에 미치는 영향에 대해 알아보려고 한다.

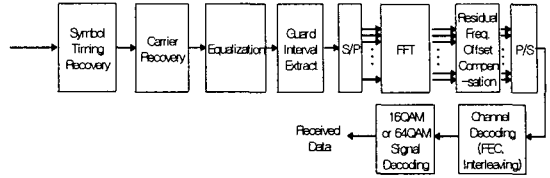


그림 1. S-DMT 방식 복조기 복조과정

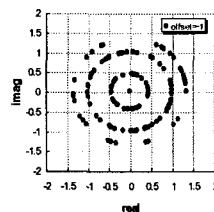
신호의 복조를 위해서는 우선 수신신호의 심볼에 대한 타이밍 즉, 클럭과 프레임의 시작위치를 정확하게 복원해내야 한다. 수신 단에서 심볼 타이밍을 정확하게 추출하지 못하여 원래 송신 측 심볼 타이밍과의 오프셋이 발생하면, 복조된 신호의 정상도에서 위상회전이 일어나게 된다. 심볼 타이밍 복원부는 보상 알고리즘을 통하여 이러한 위상 회전을 최소화시키는 역할을 수행한다.

우선 FFT 윈도우 오프셋이 데이터 복조에 미치는 영향을 알아보면 다음과 같다. FFT 윈도우 오프셋이 심할 경우에는 FFT 결과를 이용하기 어려우나 오프셋이 그다지 크지 않을 경우에는 그 영향이 해당 심볼에 대한 시간 천이로 나타나며 주파수 축 상에서는 위상회전으로 나타난다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

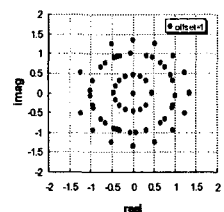
$$y_n = x_{n-m} \leftrightarrow Y_k = F[y_n] = X_k e^{j2\pi \frac{m}{N} k} \quad (1)$$

$$\phi_k = 2\pi \frac{m}{N} k \quad (2)$$

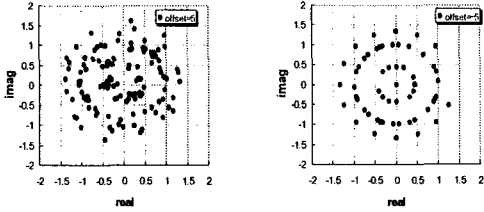
여기서 N은 FFT 입 출력단의 수가 된다[9]. 그림 1의 FFT 블록을 통과한 신호에 오프셋이 존재할 경우 16QAM의 정상도에 위상 회전이 발생하게 된다. 그림 2에서 오프셋이 ±1로 비교적 작은 경우와, -5인 경우와 같이 음의 오프셋일 경우에는 위상의 회전에 의한 변화만 생기지만, 오프셋이 양의 방향으로 5 이상 일 경우에는 정상도에 나타나는 신호에 에러가 발생함을 알 수 있다.



(a) Offset = 1일 경우



(b) Offset = -1일 경우



(c) Offset = 5일 경우 (d) Offset = -5일 경우  
 그림 2. 16QAM S-DMT에 있어서의 FFT 윈도우  
 오프셋 크기에 따른 정상도

수신 단에서 에러 없이 데이터를 복조해 내려면 정  
 술한 FFT 윈도우 오프셋보상도 중요하지만, 전송 신호  
 샘플에 대한 송신과 수신 시의 샘플링 클럭도 동기되어  
 야 한다. 수신 단에서는 수신신호로부터 최적한 샘플링  
 클럭 위치를 찾아내야 하므로, 샘플링 클럭 오프셋이  
 존재하게 된다. 샘플링 클럭 오프셋이란 송수신기 간의  
 샘플링 타이밍이 어긋난 정도를 의미하며, 최적 샘플링  
 지점으로부터 얼마만큼 벗어났는가를 나타낸다. 이러한  
 샘플링 클럭 오프셋은 복조된 신호의 정상도에서 위상  
 회전을 일으키게 된다.

S-DMT 시스템에서의 샘플링 클럭 오프셋은 S-DMT  
 T 심볼 유효 데이터 내의 첫 번째 샘플의 최적 샘플링  
 지점과 실제 샘플링 타이밍과의 차이,  $\Delta t$ 로 정의할 수  
 있는데, 정상적인 샘플링 클럭 주기를  $T_N$  이라 하면  
 샘플링 클럭 오프셋  $\Delta t$ 에 의한  $k$ 번째 부반송파에 발생  
 하는 위상회전은 다음 식(3)과 같다.

$$\phi_k = 2\pi \frac{\Delta t}{T_N} k \quad (3)$$

## 2. 심볼 타이밍 복원 알고리즘

### 2.1 Short training 심볼 이용 방식

송수신 측 상호간에 short training 심볼을 정하고 이  
 를 이용하여 상관 값을 구함으로써, 심볼 타이밍 오프  
 셋을 추정하고 보상하는 방법으로 IEEE 802.11a 무선  
 LAN에서 이용하는 방법이기도 하다 [10][11].

본 논문에서 이용한 short training 심볼은 아래 그림  
 3과 같이 16개의 샘플이 8번 반복되는 구조를 가진다.  
 그림 3에서 마름모형 표시는 실수 값이고, 사각형 표시  
 는 허수 값이다.

수신기가 그림 4 와 같은 short training 심볼의 자기  
 상관도 알고 있을 때, 이를 이용하여 수신된 short  
 training 심볼과의 상관 값을 구하면 그림 5 와 같이 8  
 개의 첨두치의 크기가 점점 감소하는 형태를 갖는다.

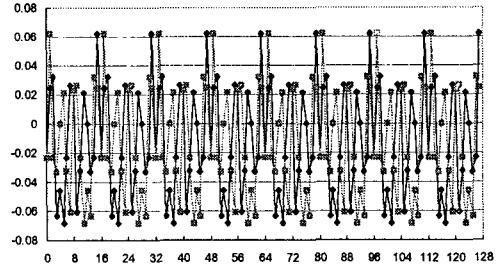


그림 3. 128 short training 심볼

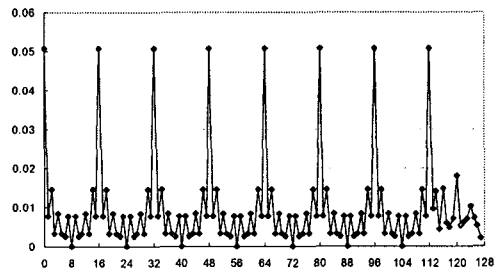


그림 4. 128 short training 심볼 자기상관도

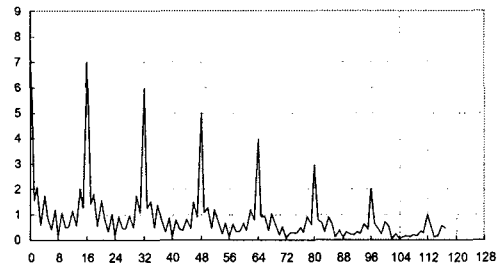


그림 5. 128 short training 심볼의 상관도

따라서 이러한 short training 심볼의 상관 값을 이용  
 하면 최대의 피크 값이 나타나는 지점을 시작 지점으로  
 삼아 오프셋을 추정하는 것이 가능하다. 최대의 피크  
 값 위치를 찾아내는 것은 연속적으로 1 샘플씩 이동하  
 면서 상승 적분 값을 구하고 그 값들을 비교하여 가장  
 큰 값이 나타날 때의 샘플 번호를 알아냄으로써 가능하  
 며 이를 통해 오프셋 값을 추정하여 그 만큼 이동해 주  
 는 것이다.

그림 6 은 시작점이 10번째 샘플이고 오프셋이 전혀  
 없는 경우의 상관도를 나타낸 것이다. 그러나, 그림 7  
 (a)에서처럼 오프셋 크기가 5일 경우에는 15번째 샘플  
 에 최대 피크치가 생기게 되며 그림 7 (b)에서처럼 오프  
 셋 크기가 -5일 경우에는 5번째 샘플에 최대 피크치  
 가 생기게 된다. 따라서 오프셋에 따라서 최대 피크치  
 샘플이 오프셋 만큼의 천이함을 알 수 있다.

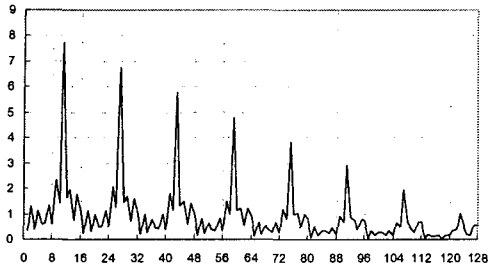
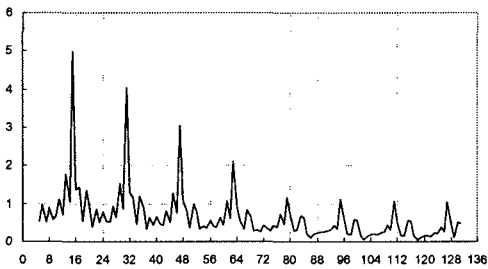
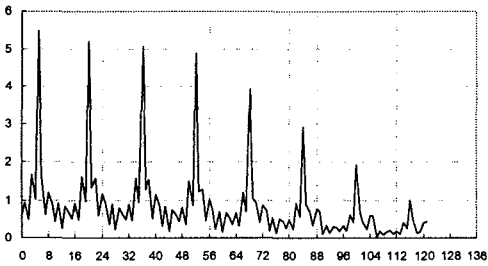


그림 6. 오프셋이 없을 경우의 128 short training 심볼의 상관도



(a) 오프셋 크기가 5일 경우



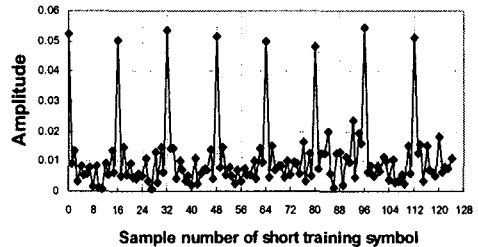
(b) 오프셋 크기가 -5일 경우

그림 7. 오프셋이 존재하는 경우의 short training 심볼의 상관도

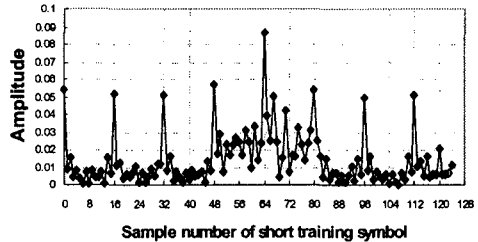
그림 4 와 같이 반복패턴을 갖는 short training 심볼을 이용하여 타이밍을 복원하는 알고리즘은 매우 간단하고도 편리하여 신속한 타이밍 동기를 요구하는 시스템에 적합한 방법이긴 하지만, 수신된 신호와 short training 심볼과의 상관도는 채널의 임펄스 잡음에 따라 심하게 영향을 받는 약점이 있다. 따라서 이러한 채널의 임펄스 잡음이 심볼 타이밍 복원에 미치는 영향을 알아보기 위해 임펄스 구간  $\epsilon = 0.1$ , 잡음 전력비  $\gamma^2 = 10, 100, 1000$  인 경우에 대해서 알고리즘을 시뮬레이션 해보았다. 그림 6.2.10은 각 경우의 short training 심볼 상관도이다. 그림 8 (a)에서 처럼 임펄스 잡음 전력비가 10 일 경우에는 상관 값에 거의 영향을 주지 않지만, 임펄스 잡음 전력비가 100, 1000으로 증가할수록 임펄스 잡음의 영향으로 인해 그림 8 (b), (c)에서처럼

신호가 왜곡된다. 그림 9 는 short training 심볼의 상관 값을 이용하여 오프셋을 추정하는 알고리즘에 대한 심볼 타이밍 복원 실패 확률을 나타낸 그림이다.

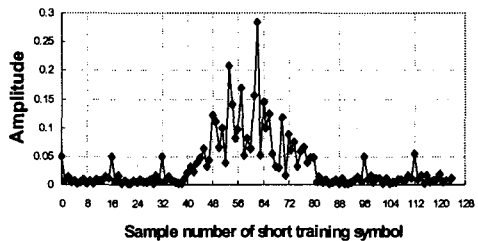
그림 9 (a)는 임펄스 잡음 전력비를 10으로 했을 경우의 타이밍 실패 확률을 나타낸 것으로  $E_b/N_0$  값에 따라 확률이 감소하는 waterfall 형태의 곡선을 유지하며 AWGN 환경에 비해서는 성능이 떨어지지만 에러 플로어가 발생하지는 않는다. 그림 9 (b)는 임펄스 잡음 전력비가 100일 경우의 타이밍 실패확률인데 12dB까지는 임펄스 잡음 채널일 경우에 AWGN과의 성능 차이가 없지만 그 이후에는 에러 플로어 현상이 나타난다. 따라서, short training 심볼을 이용하는 알고리즘의 경우, 임펄스 잡음 전력비 크기에 매우 민감하다는 것을 알 수 있다.



(a) 임펄스 잡음 전력비가 10일 경우

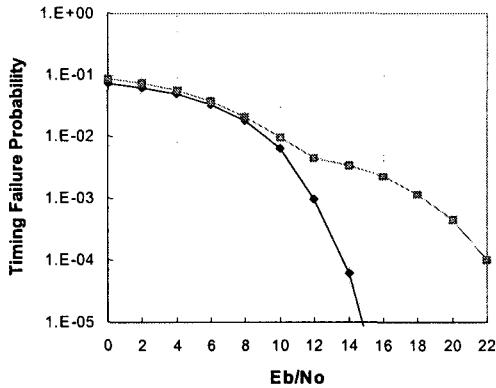


(b) 임펄스 잡음 전력비가 100일 경우

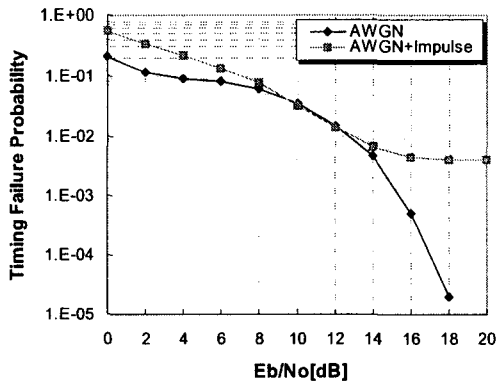


(c) 임펄스 잡음 전력비가 1000일 경우

그림 8. 채널 임펄스 잡음 전력비에 따른 128 short training 심볼의 상관도



(a) 임펄스 잡음 전력비가 10일 경우



(b) 임펄스 잡음 전력비가 100일 경우

그림 9. 채널 임펄스 잡음 전력비에 따른 타이밍 실패 확률

2.2 PN sequence 시간영역 삽입 방식

PN 시퀀스를 이용한 심볼 타이밍 복원 방법은 다음 그림 10 과 같다. 여기서 사용되는 PN 시퀀스는 소프트웨어를 통해 얻어낸 것으로 127개의 샘플열을 갖는 유사 잡음 시퀀스이다.

그림 10 에서처럼 소스 데이터를 IFFT 한 후 위와 같은 PN 시퀀스를 삽입하여 D/A 변환기를 거쳐 채널을 통해 수신기로 전송하면, 수신 단에서는 약속된 PN 시퀀스를 이용하여 심볼 타이밍을 찾아내는 방식으로, A/D 변환기를 거친 후, I채널과 Q채널 값의 샘플 값을 이용하여 수신신호 전력을 구하고, 이때 얻어진 각 샘플 열들의 전력에 대해 미리 주어진 임계 값(Th1)을 기준으로 1과 0을 판정한다. 이후 판정된 값들을 한 샘플씩 이동하면서 수신 단에서 미리 알고 있는 PN 시퀀스 값과 비교하여 같으면 1 다르면 -1을 취하는 연산을 수행함으로써 상관도를 구하여 또 다른 임계 값인 Th2를 넘은 때를 데이터 시작점으로 간주하는 방법이다.

그림 11은 임펄스 채널을 통과시킨 뒤 수신 측에서  $I^2 + Q^2$ 과정을 거친 출력 샘플 열에 대해 신호 전력을 정규화한 결과이다. 임펄스 잡음 채널을 통과시킨 결과로 신호가 왜곡되었음을 확인 할 수 있다. 그림 12는 이와 같은 샘플 열들에 대해 미리 주어진 임계 값(Th1)을 기준으로 1과 0을 판정하고 난 후 미리 알고 있는 PN 시퀀스와의 상관도를 위한 결과인데 특정 샘플 번호에서 피크가 발생함을 볼 수 있으며 그 값이 정해진 임계 값(Th2) 이상일 경우, 해당 샘플번호를 데이터의 시작점으로 간주한다.

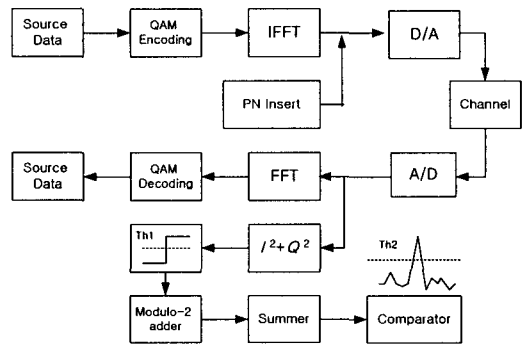


그림 10. PN 시퀀스를 이용한 심볼 타이밍 복원 알고리즘 블록도

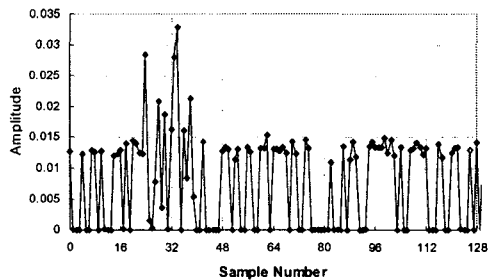


그림 11. 정규화된 수신 신호 샘플열

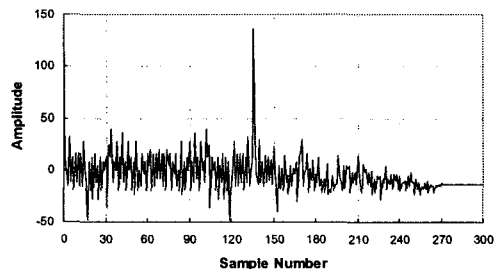


그림 12. PN 시퀀스와의 상관 과정 후의 수신 신호 샘플열

### 3. 심볼 타이밍 복원 알고리즘 성능 평가

상술한 2개의 심볼 타이밍 알고리즘에 대해 임펄스 잡음 채널에서 시뮬레이션 해 본 결과, PN sequence 시간영역 삽입 방식의 경우가 보다 나은 성능을 나타내어, 본 논문의 성능평가에서는 후자의 방법을 선택하였다.

시간영역에 PN 시퀀스를 넣는 심볼 타이밍 복원 알고리즘에 대해 임펄스 잡음 채널, ISI와 AWGN 채널, 그리고 이들 세 가지 잡음이 혼재하는 채널에서의 성능을 평가하였다. 심볼 내의 128 샘플들의 샘플 간을 8배로 오버 샘플링 하는 것으로 하여, 샘플링 클럭 오프셋이 최적화 되었을 경우와, 1, 2, 3, 4 샘플링 클럭 오프셋일 경우에 대해 Eb/No 에 따른 타이밍 오프셋 추정 성능, 즉 타이밍 실패 확률(timing failure probability)을 평가하였다. 임펄스 잡음 채널의 경우 임펄스 잡음 발생 구간  $\epsilon = 0.1$ , 잡음 전력비  $\gamma^2 = 100$ 으로 하였고, 임계 값 Th1과 Th2는 각각 0.001, 80으로 하였다. ISI 채널의 경우는 여러 가지 임계 값에 대한 시뮬레이션을 통해, 최적의 성능이 얻어지는 0.001 과 75로 선택하였다.

그림 13 은 임펄스 채널에서의 샘플링 클럭 오프셋에 따른 타이밍 실패 확률을 나타낸 것이다. 그림 13에서 3 샘플링 클럭 오프셋을 주었을 경우에도 성능이 양호함을 알 수 있다. 4 샘플링 클럭 오프셋의 경우를 제외하고는 전반적으로 타이밍 실패 확률 성능이 양호함을 확인할 수 있다. 그림 14 는 ISI 와 AWGN 채널 상에서의 타이밍 실패 확률을 나타낸 것이다. 그림 13과 비교할 때, 3 샘플링 클럭 오프셋일 경우에 성능의 열화가 나타나고 최적화 되었을 경우에도 2dB 정도의 성능의 열화가 있음을 확인할 수 있다. 그림 15 는 AWGN+ISI+임펄스 잡음 채널일 경우의 타이밍 추정 성능으로, 이 경우는 최적화 되었을 경우와 1 샘플 클럭 오프셋일 경우에만 어느 정도의 성능을 유지함을 알 수 있다. 그림 13 의 임펄스 잡음 채널 경우와 비교하면 타이밍 실패 확률이  $10^{-3}$ 일 때의 Eb/No가 약 10dB 이상 열화 됨을 알 수 있다.

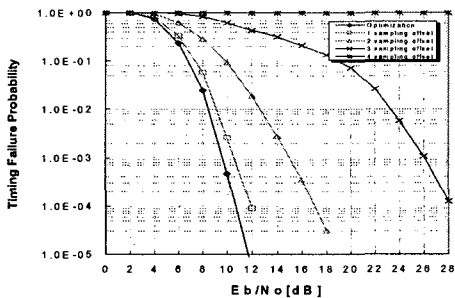


그림 13. 임펄스 잡음 채널에서의 샘플링 클럭 오프셋에 따른 타이밍 실패 확률

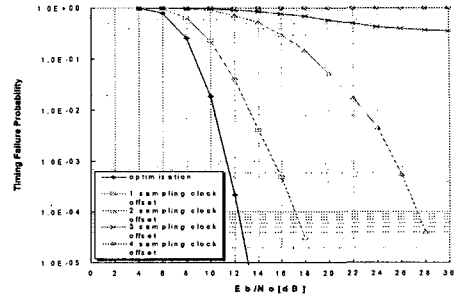


그림 14. AWGN + ISI 채널에서의 샘플링 클럭 오프셋에 따른 타이밍 실패 확률

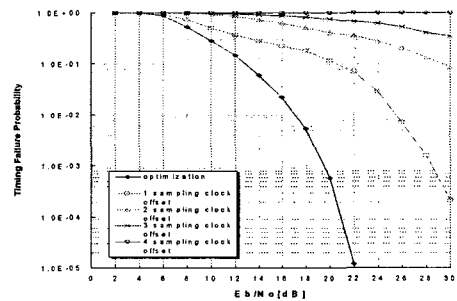


그림 15. AWGN + ISI + 임펄스 잡음 채널에서의 샘플링 클럭 오프셋에 따른 타이밍 실패 확률

PN 시퀀스 삽입 알고리즘에 의한 타이밍 복원방식은 여러 가지 잡음채널에서 샘플링 위상 클럭 오프셋에 따라 타이밍 추정 성능이 매우 달라짐을 알 수 있다. 따라서 샘플링 위상 클럭 오프셋에 대한 고려가 필요하다. 이러한 샘플링 위상 클럭 오프셋을 극복하는 방법으로는, 연속되는 두개의 프레임을 이용하여 프레임 동기를 수행하되 첫 번째 프레임에서 신호처리 과정을 거쳐 피크 값이 검출되지 않을 경우에는 그 다음 프레임에서 4 샘플링 클럭 오프셋만큼 샘플링 클럭을 천이시켜 프레임 동기를 수행하는 방법, 2배 오버 샘플링을 함과 동시에 상관을 취해 나가는 방법, 그리고, 타이밍 에러 검출 알고리즘을 도입하여 초기에 샘플링 클럭을 복원하는 방법으로 아예 초기부터 샘플링 클럭의 위상 오프셋을 보정한 다음 상관을 취하는 방법 등이 있다. 본 설계에서는 구현성을 고려하여 비교적 간단한 첫 번째 방법을 채택하였다.

그림 16 은 최적 지점 샘플링이 된 경우, 각 채널에서의 타이밍 추정 성능을 구한 것이다. 임펄스 잡음 발생 구간은 0.1, 잡음 전력비는 100으로 하였고 두 개의 임계 값 Th1과 Th2는 최적의 성능을 보이는 값으로 선택하였으며, 임펄스 채널의 경우 각각 0.001과 80으로, ISI 채널의 경우 각각 0.001, 75로 하였다. 시뮬레이션 결과, 어느 경우에도 에러 플로어 현상은 없으며, AWGN+Impulse+ISI 채널의 경우 나머지 채널의 경우보다 성능 차이가 비교적 크나 전체적으로 양호한 타이

밍 추정 성능을 보이고 있다.

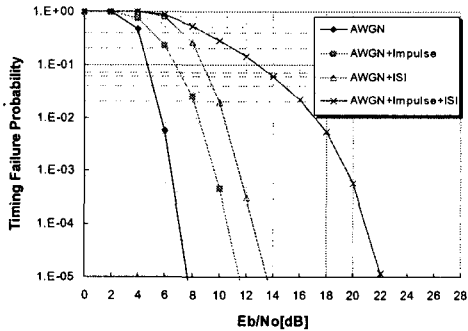


그림 16. 각 잡음 채널에 따른 타이밍 실패 확률 (샘플링 클럭 오프셋 최적화 시)

#### 4. 결론

S-DMT 방식 케이블모뎀 복조기 설계를 위한 심볼 타이밍 복원 알고리즘으로 시간 영역에 PN 시퀀스를 삽입하는 방식을 제안하였으며 AWGN, ISI, 및 임펄스 잡음 환경에서 제안한 알고리즘에 대한 타이밍실패확률을 구하여 성능을 평가해본 결과, 잡음 환경에 따라 타이밍 추정 성능이 매우 달라지나, 어느 경우에도 에러 플로어 현상은 없으며, 동일한 샘플링 클럭 오프셋에서 AWGN, ISI, 및 임펄스 잡음이 함께 존재하는 채널일 경우가 임펄스 잡음 채널 경우보다 타이밍 실패 확률이  $10^{-3}$ 일 때의  $E_b/N_0$ 가 10dB 이상 열화되나 초기부터 샘플링 클럭 오프셋을 보정하여 최적화한 경우, 잡음 환경에 의한 성능차이가 있기는 하나, S-DMT 방식의 케이블 모뎀 수신기에 적용 가능한 양호한 타이밍 추정 성능을 보임을 확인 하였다

#### 참고 문헌

- [1] Yvo L. C. de Jong, Robert P. C. Wolters, Henrie P. A. van den Boom. "A CDMA Based Bidirectional Communication System for Hybrid Fiber-Coax CATV Networks," IEEE Trans. Broadcasting, vol. 43, no. 2, pp. 127-135, Jun. 1997.
- [2] [http://www.cablelabs.com/news\\_room/PR/01\\_pr\\_adv\\_phy\\_083101.html](http://www.cablelabs.com/news_room/PR/01_pr_adv_phy_083101.html).
- [3] Terayon DOCSIS 2.0 White Paper, "Enabling MSOs To Offer Broader Upstream Bandwidths and Powerful New Networking Services," 2002.
- [4] Data-Over-Cable Service Interface Specifications, "Radio Frequency Interface Specification," SP-RFI-102-9710

08, pp. 21-37, Oct. 1997.

- [5] Krista S. Jacobsen, "Synchronized Discrete Multi-Tone(SDMT) Modulation for Cable Modems: Making the Most the Scarce Reverse Channel Bandwidth," IEEE Conference Proceedings, Wescon 97, pp. 374-380, Apr. 1997.
- [6] J.A.C. Bingham and K. Jacobsen, "CATV Reverse Channel Transmission Using Synchronized DMT, Part 1. Overview: Network, Data Rates and Services, Protocol," IEEE 802.14 Working Group Contribution number 9 5-001, Boston, MA, Jan. 1995.
- [7] Albert A. Azzam, High-Speed Cable Modems; including IEEE802.14 standards, McGraw-Hill, 1997.
- [8] J. M. Cioffi, "Discrete Multi-Tone Data Transmission System Using an Overhead Bus for Synchronizing Multiple Remote Unit," US Patent 5,625,651, Apr. 1997.
- [9] S. U. Zaman and K. W. Yates, "Multitone Synchronization for Fading Channel," Proc. of ICC'94, pp. 946-949, 1994.
- [10] IEEE 802.11, IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications, Sept. 1999.
- [11] R. Van Nee, "A New OFDM Standard for High Rate Wireless LAN in the 5GHz Band," Proc. IEEE VTC'99 Fall, Amsterdam, Netherlands, vol. 1, pp. 258-262, Sept. 1999.

### 조 병 학



1981년 서울대학교 전자공학과졸업  
1988년 서울대학교 전자공학과  
석사 졸업(공학석사)  
2002년 성균관대학교  
전기전자컴퓨터공학과 졸업  
(공학박사)

1981년 ~ 1986년 동양정밀 공업(주) 중앙연구소

1988년 ~ 1990년 LG전자 디지털미디어연구소  
선임연구원

1992년 ~ 2001년 전자부품연구원 수석연구원

2001년 ~ 2002년 이스텔시스템즈(주)  
인터넷 미디어연구소장

2002년 ~ 2003년 (주)정소프트 연구소장

2004년 ~ 현 재 한국정보통신기능대학  
방송통신설비과 교수

관심분야 : 디지털 변복조, MAC, 케이블 모뎀,  
RFID/USN, VoD 등