

논문 2008-45TC-2-2

# 상향 링크 케이블 모뎀 시스템을 위한 동기 방법

## (Research of Synchronization Schemes for Uplink Cable Modem System)

김영제\*, 오왕록\*\*, 김환우\*\*\*

(Youngje Kim, Wangrok Oh, and Whanwoo Kim)

### 요약

본 논문에서는 상향 링크 케이블 모뎀 시스템에 대한 동기화 방법에 대하여 제안하였다. 상향 링크의 케이블 모뎀 시스템은 DOCSIS (data over cable service interface specification) 규격에 의해 정해져 있으며, 이에 맞는 동기화 방법에 관하여 연구하였다. 케이블 모뎀은 버스트 모드로 동작하며 시 분할 다중 접속 (time division multiple access, TDMA) 버스트 포맷을 사용한다. 버스트 포맷은 프리앰블과 데이터 구간으로 나뉜다. 본 논문에서는 프리앰블을 이용한 프레임 동기, coarse 타이밍 동기, 반송파 주파수 동기, 반송파 각 동기 방법을 연구하였으며, 프리앰블로 이용할 시퀀스로 correlation 특성이 우수한 CAZAC (constant envelope zero-autocorrelation) 시퀀스를 이용하였다. 또한 타이밍 드리프트가 존재하는 경우와 나머지 주파수 오프셋이 주는 영향을 고려하여 데이터 구간에서 심벌 타이밍 동기방식과 주파수 각 오프셋 추정박식을 채택하여 시스템을 구성하였고, 이를 컴퓨터 실험 결과를 이용하여 성능을 검증하였다.

### Abstract

In uplink cable modem link operated in time-division multiple access mode, it is crucial to employ a suitable preamble pattern enabling frame detection, coarse timing/carrier recovery. Preamble pattern based on the constant envelope zero autocorrelation sequence is proposed for the uplink cable modem compliant to the data over cable service interface specification. Frame detection, coarse/fine timing and carrier recovery algorithms suitable for the proposed preamble pattern are also proposed. We check up the performances using numerical results.

**Keywords:** 상향 링크 케이블 모뎀, 동기 방식, CAZAC 시퀀스, DOCSIS

### I. 서론

우리나라는 1995년 케이블 TV가 도입되어 CATV 시대가 본격적으로 시작되었고 1999년 디지털 케이블 TV 방송 도입이 적극 논의되기 시작했다. 이후 가입자의 정보욕구가 증가함에 따라 광대역 및 쌍방향 통신 기능을 지원하기 위한 기술들이 점진적으로 케이블망에 도입되기 시작하였으며 그 결과 TV 영상은 물론 고속 인터넷서비스 등의 멀티미디어 서비스를 케이블망을 통하여 제공할 수 있도록 진화되어 가고 있다. 최근 IPTV, VoIP, 그리고 IPv6 등 유무선 분야에서 요구하

는 데이터율이 높아짐에 따라 그 기반 기술도 다양하게 발전하고 있다.

2001년 4월 국내 디지털 유선방송 표준으로서 미국방식인 오픈케이블(OpenCable) 방식을 도입하기로 결정하고 방송/통신의 융합 형태 서비스인 디지털대화형방송이 적극 추진되고 있으며, 매체의 특성상 대화용 방송의 가장 적합한 망으로 거론되고 있다.

정보통신부는 오는 2010년까지 광대역 통합 망 구축을 통해 초고속 인터넷 서비스의 속도를 미래 가정의 다양한 통신 서비스 요구 사항에 부합할 수 있도록 50 ~ 100 Mbps 급으로 향상시키고 이를 바탕으로 망 사용자들에게 양방향 방송 서비스 및 초고속 인터넷 서비스, 실시간 VOD 및 VoIP 그리고 고선명 화상 서비스 등을 제공하고자 노력하고 있다.

\* 학생회원, \*\* 정회원, \*\*\* 평생회원, 충남대학교  
(Department of Electronics and Computer  
Engineering, Chungnam National University)

접수일자: 2007년9월17일, 수정완료일: 2008년2월18일

케이블 TV 망은 동축 케이블 (Coaxial cable) 혹은 HFC (Hybrid Fiber Coax)를 통해 헤드엔드 (Head-end) 로부터 각각의 사용자에게 전송 및 분배하는 형태로 구성되어 있다. 현재 국내 케이블망의 주파수는 상향 5 MHz~42 MHz, 하향 54 MHz~750 MHz 대역을 이용하고 있다<sup>[1]</sup>.

케이블 모뎀 역시 상향 100 Mbps, 하향 1 Gbps 급 케이블 모뎀을 2007년 초 발표된 DOCSIS 3.0 규격을 기반으로 하여 현재 다양한 분야에서 연구 개발 중이다. 이러한 고속의 데이터 율을 제공하는 디지털 케이블 모뎀의 개발을 위해서는 다양한 선행 기술의 연구 개발이 필수적이다. 특히 고속의 데이터 율을 제공하는 케이블 모뎀의 구현을 위해서는 이에 적합한 동기 알고리즘들의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 프리앰블 설계를 고려한 coarse 타이밍 동기 및 주파수 동기 방식과 데이터 페이로드 구간을 이용한 미세 동기 추적 방식을 고려한 상향 링크 케이블 모뎀의 동기에 관하여 성능을 분석할 것이다.

## II. 본 론

### 1. 시스템 개요

상향 링크 케이블 모뎀 시스템은 그림 1과 같이 구성된다. DOCSIS 규격에서, 시스템 송신기의 구성은 Reed-Solomon (RS) 복호기, 스크램블러, 인터리버, 프리앰블 합해주는 구간, 심벌 매핑, 전송 전치 등화기, 전송 필터 등으로 구성 된다<sup>[2]</sup>.

프리앰블 패턴은 DOCSIS 규격에는 정해져 있지 않으며, 그 길이가 최대 1536 bits로 제한되어 있다. QPSK를 기본으로 사용하며 (DOCSIS 2.0 과 3.0 규격), 16 QAM은 (DOCSIS 1.1 규격) 옵션으로 두게 된다. 그러므로 DOCSIS 3.0에서는 최대 사용 가능한 심벌의 길이는 768 QPSK 심벌이다<sup>[3]</sup>.

상향링크 케이블 모뎀의 데이터 심벌은 QPSK에서 64-QAM까지 심벌 매핑하며, 이렇게 발생된 심벌들을 전송 전치 등화기를 거치게 하여 채널에서 겪을 ISI (inter-symbol interference)와 위상 왜곡을 선 등화함으로써, 채널을 보상해주게 된다. 전송 필터는 roll-off 계수가 0.25인 제곱근 올림 코사인 필터 (root raised-cosine filter)를 사용한다. 상향 링크 케이블 모뎀의 수신기는 정합 필터 (matched filter)의 출력을 이용하여 동기를 잡아주는 과정과 채널 등화를 거쳐 송신 시스템의 역방향으로 진행이 된다.

본 논문에서는 채널에 대한 영향이 없다고 가정하였고, 이에 따라 등화기를 고려하지 않았다. 그러므로 오직 백색 가우시안 잡음에 (white Gaussian noise) 대하여만 고려하였다.

### 2. 프리앰블 설계

DOCSIS 규격에서는 프리앰블에 관하여 고정된 패턴을 이용하지 않는다. 그러므로 엔지니어가 다양하게 설계할 수 있도록 하고 있다. 프리앰블은 최대 768 QPSK 심벌 이하로 사용 가능한데, 본 논문에서는 일정 길이의 CAZAC 시퀀스를 연결하여 사용하였다.

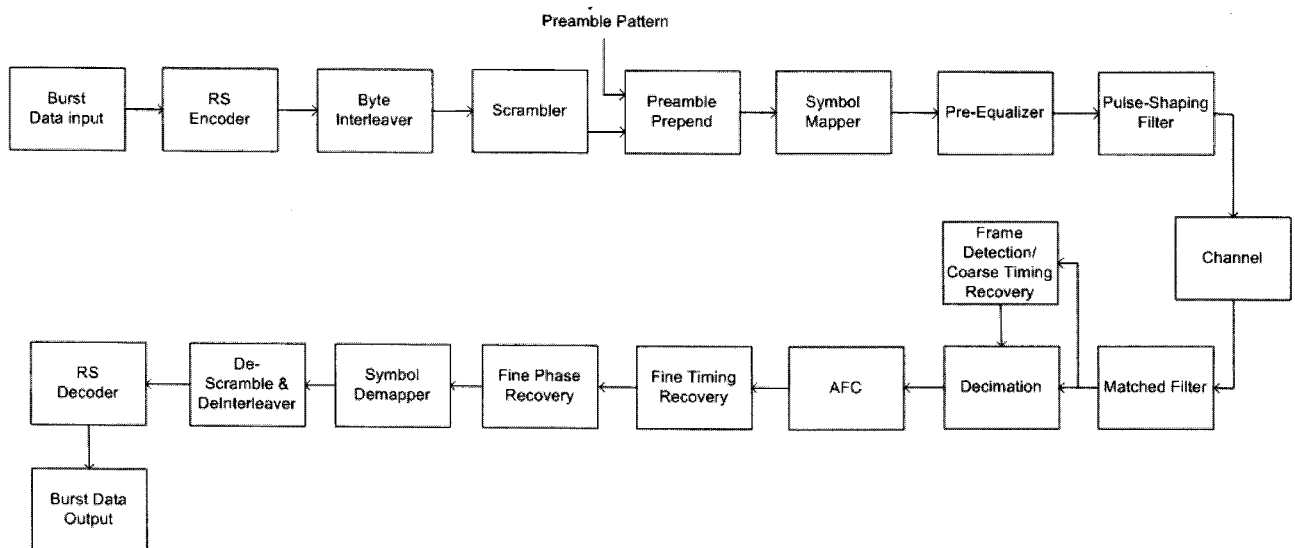


그림 1. 상향 링크 케이블 모뎀 블록 다이어그램.  
Fig. 1. Block diagram of uplink cable modem.

CAZAC 시퀀스는 상관관계 특성이 우수한 시퀀스로 빠르게 프레임 동기를 잡는데 적합하다. 이 시퀀스는 다음과 같이 행렬로 구성된 테이블을 이용하여 발생할 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$\begin{matrix}
 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\
 1 & \xi_1 & \xi_1^2 & \cdots & \xi_1^{p-1} \\
 1 & \xi_2 & \xi_2^2 & \cdots & \xi_2^{p-1} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 1 & \xi_{p-1} & \xi_{p-1}^2 & \cdots & \xi_{p-1}^{p-1}
 \end{matrix} \quad (1)$$

시퀀스를 발생하는 방식은 식 (1)과 같이 행렬을 만들고 각각  $\xi$ 에 매칭 되는 값들을 각각 넣고,  $p-1$  제곱까지 만들어 주고 각각의 행 방향으로 읽어주면 된다. 이 경우 발생하는 시퀀스는 식 (2)와 같다.

$$c_n = [1, 1, 1, \dots, 1, 1, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{p-1}, 1, \xi_1^2, \xi_2^2, \dots, \xi_{p-1}^2, \dots, 1, \xi_1^{p-1}, \xi_2^{p-1}, \dots, \xi_{p-1}^{p-1}] \quad (2)$$

케이블 모뎀은 QPSK를 프리앰블로 사용하므로  $\xi$  값을  $j, -1, j$ 로 두고, 45도 회전 시켜주면 규격에 맞는 형태의 QPSK 심벌을 얻을 수 있다. 이렇게 발생된 심벌 시퀀스는 16 심벌로 구성이 되며, 이는 다음 식 (3)과 같다.

$$c_{16} = [1, 1, 1, 1, 1, j, -1, -j, 1, -1, 1, -1, 1, -j, -1, j] \quad (3)$$

본 논문에서는 식 (3)과 같이 구성된 16 심벌 CAZAC 시퀀스를  $\pi/4$  만큼 회전 시킨 후 직렬로 연결하여 프리앰블을 구성하였고, 이를 바탕으로 각각의 동기 알고리즘에 적용하였다. 식 (3)에서  $\pi/4$  만큼 회전한 프리앰블은 QPSK에 정상도가 위치한다.

3. 거친 (coarse) 및 미세 동기 추적 방식

본 논문에서는 프리앰블을 이용하여 프레임, 타이밍, 주파수 동기를 포착하고, 데이터 페이로드 부분을 이용하여 미세 동기를 추적하는 방식을 채택하였다.

거친 동기 포착 방식과 미세 동기 추적 방식은 다음과 같은 과정으로 이루어진다.

가. 프레임 동기

통신 시스템에서 데이터의 유무 확인은 필수 과정이며, 이에 관하여 다양한 알고리즘이 존재한다. 이 절에서는 상관기를 이용한 복잡도가 낮으며 효과적인 프레임 동기를 포착하는 방법에 관하여 설명한다.

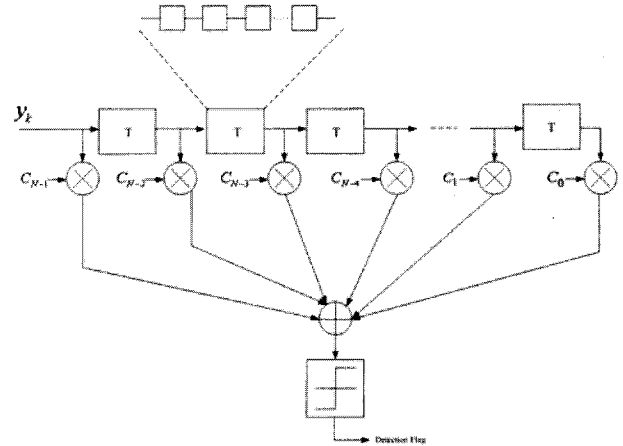


그림 2. 프레임 동기 블록 다이어그램.  
Fig. 2. Block diagram of frame detection.

상관기를 이용한 프레임 동기 방식은 CAZAC 시퀀스의 상관관계의 결과 값이 임계값 이상일 경우 프레임 동기를 포착했다는 것으로, 이 결과를 검출 깃발 (detection flag)을 이용하여 다음 블록에 알려주는 방식이다.

식 (4)는 프레임 동기 방식에 대한 수식이다.

$$\frac{R_{rc}(n)}{\sum_{n=0}^{K-1} |y(n)|} > V_{th} \quad (4)$$

여기에서  $y(n)$ 은 상관기의 입력 신호를 나타내며  $R_{rc}(n)$ 은 상관기의  $n$ -번째 출력 값이고,  $V_{th}$ 는 임계값이다.

프레임 동기를 위한 상관기의 구조는 다음과 같다. 오버샘플링 기법을 이용하므로, 약속된 오버샘플링 율에 따라 적절한 시간 딜레이를 이용하여 상관기를 구성한다. 상관기의 계수 값( $c_k$ )들은 모두 프리앰블에서 알고 있는 값이므로 이 값들을 넣어주게 된다. 그림 3은 프레임 동기를 위한 상관기의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다.

그림 2에서 시간 지연 블록 T는 내부에 오버샘플링 율을 고려한 시간 지연 블록이 존재한다.

나. 거친 타이밍 동기

프레임이 포착 되었다는 검출 깃발이 넘어오면 타이밍 블록은 거친 타이밍 동기를 잡는 과정을 시작한다. 이 과정 역시 상관기의 출력 값을 이용하는데, 상관기는 출력 값을 메모리에 순차적으로 저장해 두었다가 반복되는 CAZAC 시퀀스 상관값의 주기 단위로 메모리의 열 방향으로 저장한 후, 메모리의 행 방향으로 더해준다.

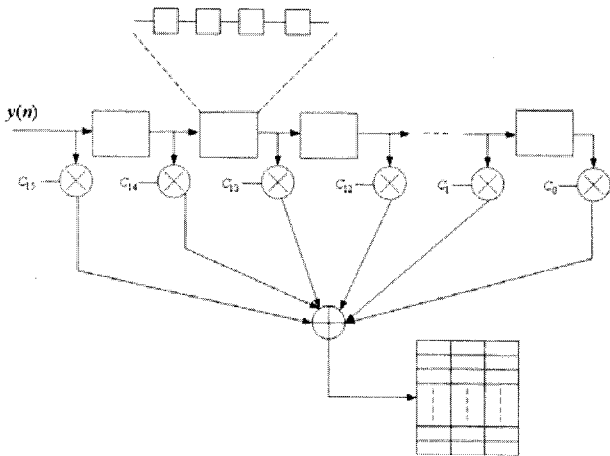


그림 3. 거친 타이밍 동기 구조.  
Fig. 3. Block diagram of coarse timing synchronization.

즉 그림과 같이 메모리는 하나의 열을 M개로 구성하여 순차적으로 행렬을 구성한 다음, 메모리의 각 행 별로 더해 가장 큰 값을 찾아준다. 찾아 낸 값 중 가장 큰 값이 있는 위치가 동기가 된 위치가 되는 것이다.

이렇게 찾은 동기 위치를 바탕으로 오버샘플링 된 데이터는 디시메이터(decimator)를 통과하여 정확한 샘플을 획득하게 된다.

다. 반송파 주파수 오프셋 복구

통신 시스템에서 반송파 주파수 오프셋은 송수신기 오실레이터 간의 미세한 주파수 차이에 의해서 발생이 된다. 동일한 클럭을 사용한다고 가정할지라도, 주파수 발전기는 열을 비롯한 환경 등에 의한 미세한 차이로 인해 주파수 오프셋을 발생할 수 있다. 반송파 주파수 오프셋은 심벌이 성상도(constellation) 상에서 회전하게 만들어 성능의 현저한 열하를 가져오기 때문에 오프셋 성분을 제거해야 한다.

본 논문에서는 프리앰블 패턴으로 16 심벌 길이의 CAZAC 시퀀스를 직렬로 연결하여 사용하며 이를 이용하여 식 (5)와 같이 주파수 오프셋을 추정할 수 있다.

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi T_s} \sum_{k=0}^{N-1} \arg\{r_k r_{k-N}^*\} \quad (5)$$

식 (5)에서  $r_k$ 는 타이밍 동기를 맞춘 신호이고 이 신호를  $N$  심벌만큼 시간 지연 시켜준 것이  $r_{k-N}$ 으로 표현된다.  $r_{k-N}$ 을 쉼표 시켜주고 이를 입력 신호  $r_k$ 와 곱해주면 위상이 얼마나 돌아가 있는지를 알 수 있다. 이 방법을 이용하여  $N$  개만큼 위상을 평균시켜주고  $1/2\pi T_s$ 를 곱해주면 반송파 주파수 오프셋을 추정할

수 있다. 여기서  $T_s$ 는 심벌 타임을 나타낸다.

라. 반송파 각 복구

비록 반송파 주파수 오프셋을 추정하더라도, 약간의 나머지 주파수 오프셋(residual frequency offset)이 남을 수 있다. 이는 우리가 프리앰블을 이용하므로 각각의 심벌이 얼마나 더 돌아가 있는지 측정하고, 식 (5)와 같이 이를 평균하여 복구한다[5].

$$\Delta \hat{\theta} = \sum_{i=0}^{K-1} (\tilde{\theta}_i - \theta_i) \quad (6)$$

식 (6)에서  $\tilde{\theta}_i$ 는 반송파 각 복구 블록의 입력 신호에 대한 각 성분이고,  $\theta_i$ 는 프리앰블의 각 성분이다.

마. 미세 타이밍과 반송파 각 동기 추적 방식

데이터 페이로드 구간에서 송수신기 간의 타이밍 드리프트 성분은 데이터 페이로드가 길어지게 되면 심벌 동기가 어긋나게 되는 영향을 주게 된다. 또한 데이터 페이로드 구간은 프리앰블에 비해 데이터가 많아 나머지 주파수 오프셋의 영향으로 인해 성상도 상에서 심벌이 회전하는 영향을 받게 된다.

일반적으로 짧은 프레임 길이로 구성되는 구간에서는 타이밍 드리프트와 나머지 주파수 오프셋에 의한 영향이 작게 되지만, 데이터 페이로드가 길게 구성된 프레임에서는 타이밍 드리프트는 시스템에서 심벌간의 동기를 어긋나게 하는 원인이, 나머지 주파수 오프셋은 심벌 회전의 원인이 된다. 본 논문에서는 Oeder와 Meyr가 제안한 제곱 타이밍 동기 방식을 미세 타이밍 동기 방식으로[6], 미세 반송파 각 동기 방식은 데이터 페이로드 구간만 이용하여 심벌의 각을 보정해 주는 것으로 Cartwright가 제안한 반송파 각 보정 방식을 사용하였다[7].

III. 컴퓨터 모의실험 결과

1. 거친 동기 방식 모의실험 결과

본 논문에서는 프리앰블로  $\pi/4$ 만큼 회전시키고, 16 심벌 길이를 갖는 직렬 연결된 CAZAC 시퀀스를 사용하였다. CAZAC 시퀀스는 자기상관 특성이 우수하기 때문에 프레임 동기를 잡는데 유용하다. 프레임 동기를 위해 허위 경보 확률(false-alarm probability)과 분실 확률(missing probability)을 통해 적절한 임계값

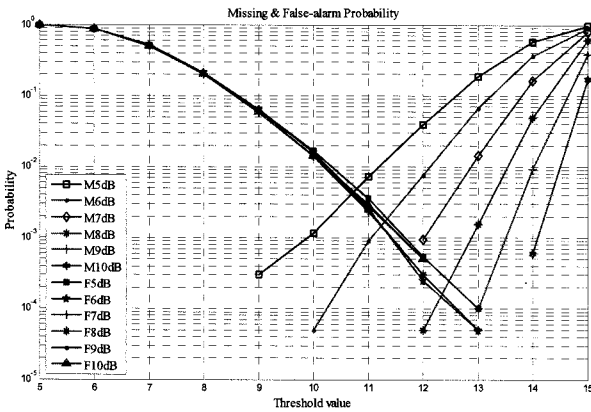


그림 4. 임계값 결정을 위한 허위 경보 확률과 분실 확률.

Fig. 4. False-alarm and missing probabilities for the threshold of frame detection.

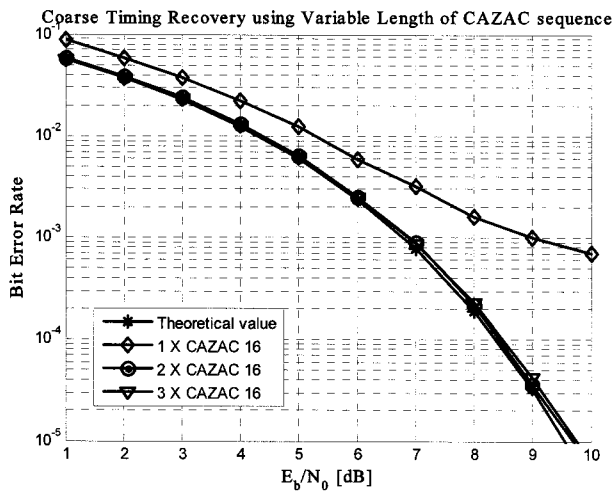


그림 5. 거친 타이밍 동기 BER.

Fig. 5. Coarse timing recovery using variable length of CAZAC sequence.

(threshold)을 정해주어야 한다. 그림 4에서 오른쪽에 분포한 성능 곡선은 분실 확률이고, 왼쪽에 위치한 성능 곡선은 허위 경보 확률을 나타낸다.

프레임 동기 후 CAZAC 시퀀스의 자기 상관 값들을 저장하여 거친 타이밍 동기를 잡아 줄 수 있다. 저장된 자기상관 결과 값들을 각각의 16 길이로 나눠 각 인덱스 별로 더하고 그 중 최대값을 타이밍 위치로 잡아주게 된다. 그림 5는 CAZAC 시퀀스의 길이별로 살펴본 BER 성능이다. 그림에서 알 수 있듯이 BER 성능은 1개의 CAZAC 시퀀스 블록을 사용할 경우 BER 성능이 떨어지는 반면 2개 이상의 블록을 사용할 경우 BER 성능이 QPSK 이론치의 BER과 거의 같게 나타났다.

거친 타이밍 동기를 획득한 후 오버샘플링 된 데이터를 데시메이션(decimation)을 통해 정확한 데이터 샘플

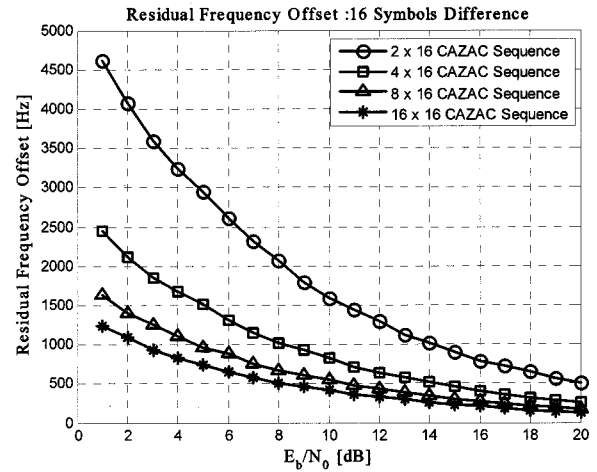


그림 6. 16 심벌 CAZAC 시퀀스 차이를 이용한 반송파 주파수 오프셋 성능.

Fig. 6. Performance of carrier frequency offset recovery algorithm using 16-symbol difference.

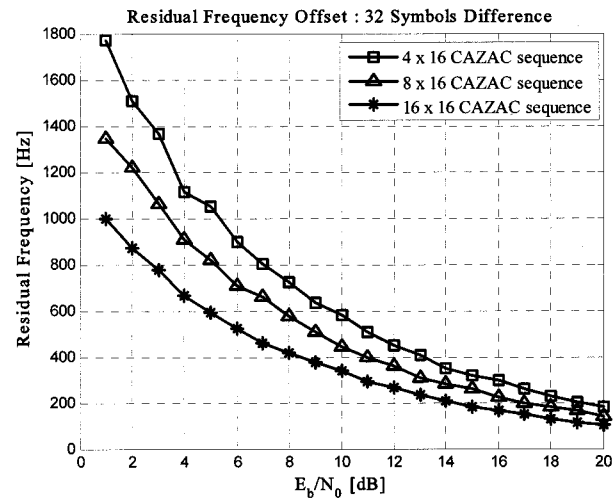


그림 7. 32 심벌 CAZAC 시퀀스 차이를 이용한 반송파 주파수 오프셋 성능.

Fig. 7. Performance of carrier frequency offset recovery algorithm using 32-symbol difference.

들(on-time samples)을 획득할 수 있다. 데시메이터를 통과하여 나온 데이터를 이용해 반송파 주파수 오프셋을 복원할 수 있다. 앞장에서 설명한 알고리즘의 성능은 나머지 주파수 오프셋을 이용하여 나타내었다. 그림 6은 16 심벌을 단위로, 그림 7은 32 심벌 단위로 그 각을 추정했으며 주파수 오프셋은 10 kHz를 주었으며, 다양한 길이를 이용하여 그 성능을 비교하여 나타내었다.

## 2. 시스템 성능 모의실험 결과

거친 동기 방식에서 일정한 데이터의 동기 찾아내지만, 데이터 페이로드가 길어지게 되면 타이밍 드리프트와 나머지 주파수 오프셋의 영향을 받게 된다. 이는 시

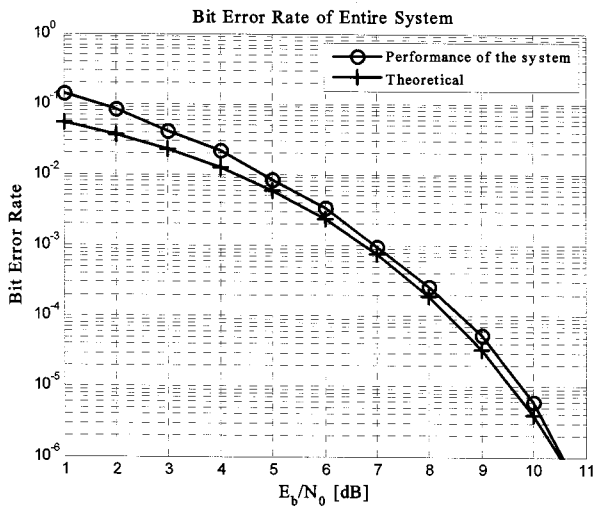


그림 8. 전체 시스템의 BER 성능.  
Fig. 8. BER performance of entire system.

시스템 성능에 영향을 주는 요소이므로 반드시 제거해야 한다. 전체 시스템 모의실험에서는 거친 및 미세 동기 방식을 모두 적용하였다.

앞 장에서 설명한 동기 알고리즘을 각각의 시스템 블록에 구성하고, 전체 시스템의 BER 성능을 그림 8에서 나타내었다. 컴퓨터 모의실험에서 프리앰블은 CAZAC 시퀀스를 사용하였고, 데이터는 QPSK 심벌을 사용하였다. 그림 8의 결과에서  $10^{-4}$ 을 달성하는 BER 성능은 이론값에 비해 0.5 dB 이내로 들어오는 것을 확인할 수 있으며 시스템의 성능도 이론값과 유사한 것을 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 상향 링크 케이블 모뎀 시스템의 동기화 방법에 관하여 연구하였다. 프리앰블로는 16 심벌 길이로  $\pi/4$ 만큼 회전시킨 CAZAC 시퀀스를 직렬 연결하여 사용하였다. 프리앰블과 데이터 페이로드로 프레임 구성해 이를 송수신 한 결과를 모의실험을 통해 나타내었다. 동기 알고리즘은 프리앰블을 이용하는 거친 동기 구간과 데이터 페이로드 부분을 이용하여 동기를 잡는 미세 동기 구간으로 구분을 하였다. 각각의 알고리즘에 대하여 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 살펴 보았으며, 이를 전체 시스템의 컴퓨터 모의실험을 통해 BER 성능을 확인하였다. 제안한 시스템의 성능은 QPSK의 경우  $10^{-4}$ 에서 약 0.5 dB 이내의 성능을 갖는 것을 확인하였다.

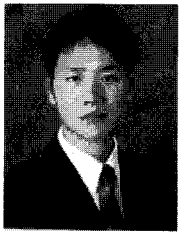
#### 참 고 문 헌

- [1] 이석원, 박승권, "케이블TV망을 이용한 디지털대형화방송 및 차세대통합망(NGcN) 서비스," Telecommunications Review, 제13권 제4호, 516-526 쪽, 2003년 8월
- [2] Data-over-cable service interface specifications DOCSIS 3.0; Physical layer specification, Cable Labs, CM-SP-PHYv3.0-103-070223, Feb. 2007.
- [3] Albert A. Azzam, High-Speed Cable Modems; Including IEEE 802.14 Standards, McGraw-Hill, 1997.
- [4] R. C. Heimiller, "Phase Shift Pulse Codes with Good Periodic Correlation Properties," *IRE Trans. on Information Theory*, Vol. 7, pp. 254-257, Oct. 1961.
- [5] H. Meyr, M. Moeneclaey, and S. A. Fechtel, Digital Communication Receivers; Synchronization, Channel Estimation, and Signal Processing, Wiley, pp 311~313, 1998.
- [6] M. Oerder, and H. Meyr, "Digital Filter and Square Timing Recovery," *IEEE Trans. on Comm.*, Vol 36, No. 5, pp. 605-612, May 1988.
- [7] K. V. Cartwright, "Blind phase recovery in general QAM communication system using alternative high order statistics," *IEEE Signal Processing Lett.*, Vol. 6, No. 12, Dec. 1999.

---

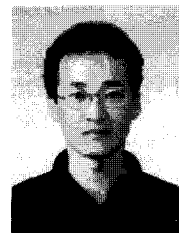
 저 자 소 개
 

---



김 영 제(학생회원)  
 2003년 충남대학교 전자공학  
 교육과 학사.  
 2005년 충남대학교 전자공학과  
 석사.  
 2006년 충남대학교 전자공학과  
 박사과정.

<주관심분야 : 유무선 디지털 통신, 통신시스템  
 동기 알고리즘, 항 재밍 시스템>



오 왕 록(정회원)-교신저자  
 1994년 포항공과대학교 전자전기  
 공학과 학사.  
 1997년 포항공과대학교 정보통신  
 공학과 석사.  
 2003년 포항공과대학교 전자전기  
 공학과 박사.

1994년~1995년 스탠더드텔레콤 연구원  
 2003년~2006년 포항공과대학교 정보통신연구소  
 전임연구원  
 2006년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부  
 교수

<주관심분야 : 터보 코드, MIMO 시스템, 유무선  
 디지털 통신>



김 환 우(평생회원)-교신저자  
 1996년 서울대학교 전자공학과  
 학사.  
 2000년 한국과학기술원 전기 및  
 전자공학과 석사.  
 2004년 University of Utah,  
 전자공학과 박사.

1980년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부  
 교수

2004년~2005년 IEEE 대전섹션 의장  
 2007년~현재 대한전자공학회 대전충남지부  
 지부장

<주관심분야 : 신호처리, 디지털 통신, 무선 통  
 신>