

# S-DMT 방식 케이블 모뎀을 위한 주파수 동기 알고리즘 설계

조병학\*

## 요약

HFC 망 상향채널의 용량을 증대시키기 위한 차세대 케이블 모뎀 기술의 하나인 S-DMT 방식 케이블 모뎀의 주파수 동기 알고리즘 제안하고 성능을 평가하였다. 다수 반송파 전송 시스템의 주파수 동기 알고리즘들에 대한 분석을 통하여, 데이터 프레임의 프리앰블 필드 내에 약속된 반복 패턴의 훈련열을 삽입하여 전송하고, 파일럿 신호를 이용하여 잔류 주파수 오프셋에 따른 위상오차를 보정하는 방법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 AWGN 잡음 환경에서의 성능을 평가 하였다. 성능 평가 결과, 파일럿 신호의 수와 크기에 따라 성능 차이를 보이나, 제안한 주파수 동기 알고리즘이 신속한 동기를 필요로 하는 S-DMT 방식 상향채널 케이블 모뎀에 적합하고 양호한 성능을 보임을 확인하였다.

## Design of a Frequency Synchronization Algorithm for S-DMT Cable Modem

Byung-Hak Cho\*

### Abstract

In this paper, we propose a frequency synchronization algorithm for S-DMT cable modem, which is practicable to the next-generation high capacity upstream physical layer in HFC networks. Analyzing several viable frequency synchronization algorithms of multicarrier systems, we proposed an algorithm using predetermined training sequence of repeated pattern in preamble field and residual frequency offset compensation with pilot signals. We verified that the simulation results of the proposed algorithm in AWGN showed good performance and suitability to the S-DMT upstream cable modem for fast frequency synchronization.

Keywords : Frequency Synchronization, Carrier Recovery, S-DMT, Cable Modem, HFC

## 1. 서론

HFC Cable TV 망을 이용한 초고속 인터넷 멀티미디어 서비스가 날로 고도화, 다양화됨에 따라, 상향 채널 수를 증가시킬 수 있고, 잡음 환경에도 강한 새로운 차세대 케이블 모뎀 변조 기법이 요구되어 왔다[1,2]. 그 중 하나로, 다수의 반송파를 이용하는 S-DMT(Synchronous-Discrete Multi Tone)방식이 고려될 수 있다[3]. S

-DMT 방식은 ADSL이나 VDSL에서 사용되고 있는 DMT 기술에 다대일(multi point-to-point) 통신 환경에서 요구되는 동기 기능을 부가한 기술로써, 각 단말기에서 전송한 데이터들이 수신 단에서 동기 되도록 각각의 송신 단말기가 데이터를 전송할 때에 헤드엔드(Head-End)와의 물리적인 거리에 따라 적당히 지연하여 전송함으로써 각각의 보호 구간이 동기 되어 마치 한 개의 송신기에서 데이터를 전송하는 것처럼 한 방식이다[4]. 케이블 모뎀의 상향 채널 변조 기술로서 DMT 기술에 관심을 갖는 이유는, 잡음에 대한 대역 확산 효과에 의해 임펄스 잡음 면역성을 증대시킬 수 있으며, 단일 반송파 변조방식에 비해 단순한 구조의 등화기로도 각각의 채널 환경에 따른 스펙트럼 효율 최적화가 가능하여 전송률을 최대화하기가 용이하기 때문이다[5].

이에 따라, 본 논문에서는 다수 반송파 시스템

\* 제일저자(First Author) : 조병학

접수일자:2007년05월15일, 심사완료:2007년06월27일

\* 한국정보통신기술대학 방송통신설비과

chobh@icpc.ac.kr

▣ 본 연구는 2007년도 한국정보통신기술대학 연구비 지원으로 수행되었음

에서의 주파수 동기 알고리즘을 분석한 후, S-DMT 케이블 모뎀 복조기에 최적한 주파수 동기 알고리즘을 제안하고, 잔류 주파수 오프셋에 의한 위상 오차 보상을 위한 pilot 신호 수 및 크기에 따른 성능을 평가하였다. 성능 평가에 있어서 변조방식은 16QAM, 128 FFT인 경우로 하였고 채널 잡음 환경은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)으로 하였다.

## 2. 주파수 동기 알고리즘

다수 반송파 방식 수신기에서의 올바른 데이터 복조를 위해서는 수신된 심볼의 시작점을 정확하게 찾아내기 위한 심볼 동기화, 찾아낸 심볼 내의 데이터를 정확히 분리해 내기 위해 각 반송파의 주파수를 정확히 찾아내는 주파수 동기(또는 반송파 동기)가 필요하다. 주파수 동기는 송수신기 간의 RF 반송파 주파수를 일치시키는 기능이며 송수신기 간의 반송파 주파수 차이를 주파수 오프셋(frequency offset)이라 부른다. 특히 S-DMT 방식은 다중 반송파 전송 방식을 이용하므로 반송파 주파수 오프셋에 민감한 단점이다.

일반적으로 다수 반송파 통신 시스템에서의 주파수 동기는 대략적 주파수 동기(coarse frequency synchronization)와 미세 주파수 동기(fine frequency synchronization)의 두 개 모드에서 동작하도록 하는 것이 일반적이다. 대략적 주파수 동기는 초기 주파수 오프셋에 대하여 가장 가까운 부 반송파 간격의 정수 배를 추정하여 보상하는 기능을 수행하며, 미세 주파수 동기는 부 반송파 간격의  $\pm 1/2$  이하의 주파수 오프셋을 추정하여 보상하고 계속적으로 잔존한 미세 주파수 오프셋의 변화를 추적해나가는 기능을 수행한다[6].

다수 반송파 시스템에서는 수신기에서의 FFT 과정이 각 부 반송파에 대한 정합 필터의 역할을 하기 때문에, 송수신기 간에 주파수 오프셋이 존재하면 수신 신호가 FFT를 거치면서 부 반송파 간의 간섭(ICI)으로 인한 왜곡이 발생하며 이로 인해 부 반송파 상호간의 직교성을 상실하게 된다. 따라서 COFDM(Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing)방식의 DAB(Digital

Audio Broadcasting) 수신기의 경우는 AFC(Automatic Frequency Control)를 이용하여 동조 발진기의 유동 성분이나 도플러 현상에 의해 발생하는 주파수 오프셋을 보상하도록 하고 있다[7].

주파수 오프셋은 수신 신호에 두 가지의 심각한 영향을 끼친다. 첫째는 각 부 반송파에서의 신호가 FFT를 통과하여 복조될 때 발생하는 신호 크기 감쇄이고 둘째는 다른 부 반송파와의 간섭으로 인한 부 반송파 상호간의 직교성 상실이다[8]. 더욱이 S-DMT 방식은 전송 대역에 비해 부 반송파간의 주파수 간격이 상대적으로 매우 작아서 작은 주파수 오프셋에도 민감하게 영향을 받을 수 있으므로 주파수 동기가 매우 중요한 기술이라고 볼 수 있다.

## 3. 주파수 동기 알고리즘 분석

근래에 OFDM이나 DMT 방식 전송시스템 구현에 대한 관심이 고조되면서 다수반송파 방식 시스템을 위한 다양한 주파수 동기 알고리즘이 제안되었다. Moose는 동일한 심볼을 반복 전송하여 주파수 오프셋을 추정하는 기법[8]을, Clas sen은 주파수 선택성 페이딩 채널에서 동작하는 Data-aided 주파수 동기 알고리즘을 제안하였다[6]. Daffara나 Beek는 미세 주파수 동기 방법으로 보호 구간을 이용한 Guard-Interval-Based (GIB) 주파수 동기 알고리즘[9,10]을, Nogami와 Nagashima는 동기 심볼을 이용한 알고리즘[11]을 제안하였으며, 그 밖에 보호 대역 전력 검출에 의한 방법도 제안된 바 있다. 이상 언급한 몇 가지 알고리즘에 대해 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

### 3.1 심볼 반복 전송을 이용한 동기 알고리즘

Moose가 제안한 알고리즘으로 약속된 동일한 심볼을 2번 반복 전송하여 수신기에서 수신된 2개의 심볼 간의 위상차에 따라 주파수 오프셋을 추정하는 방법이다. Moose 알고리즘은 후술하는 Beck 알고리즘과 비슷하나, 매 심볼마다 보호 구간으로 복사되는 데이터 구간과 보호 구간 샘플열을 비교하여 주파수 오프셋을 추정하는 것이 아니라, 약속된 동일한 훈련열을 이용한다. 따라서 모든 FFT 구간을 다 이용할 수 있으며

로 추정 주파수 오프셋의 분산 특성이 좋아지는 장점이 있다.

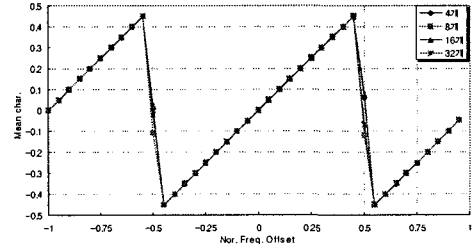
### 3.2 보호 구간을 이용한 동기 알고리즘

Daffara 와 Adami 는 보호 구간을 이용하여  $\pm 0.5$  이내의 상대적 주파수 오프셋을 추적하는 Guard-Interval-Based (GIB) 주파수 동기 알고리즘을 제안하였는데, 원리는 다음과 같다.

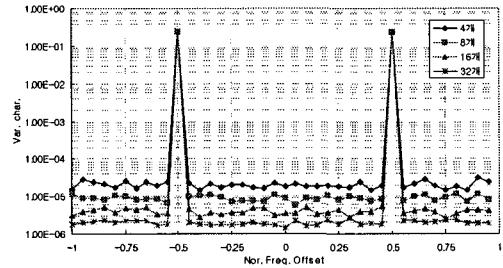
AWGN을 고려하지 않고 주파수 오프셋  $\Delta f$ 가 0 일 때, 두개의 샘플  $r_{N-i}$ , 과  $r_{-i}$  곱셈의 결과  $r_{N-i}r_{-i}^*$ 는 실수 값만을 가진다. 그러나 주파수 오프셋이 존재하게 되면 두 개의 샘플  $r_{N-i}$ 과  $r_{-i}$ 은 주파수 오프셋의 영향으로 서로 다른 위상을 가지게 되므로  $r_{N-i}r_{-i}^*$  곱셈 결과는 허수 값을 포함하며 이 허수 값을 주파수 오프셋에 대한 정보로 사용할 수 있다. 따라서 이러한 곱셈 결과를 이용하여 주파수 오차를 추정한 후, 전통적인 단일 반송파 전송시스템에서와 마찬가지로 PLL(Phase-Locked Loop)회로에 주파수 오프셋 추정 값을 인가함으로써 반송파 주파수를 추적한다.

Beek 외 2명이 제안한 알고리즘은 시간 영역에서 심볼 내의 보호 구간과, 유효 데이터 후반부의 보호 구간으로 복사된 부분과의 위상 변화량을 비교함으로써 주파수 오프셋을 추정하는 방법을 사용한다. 추정된 오류 값, 즉, 상대적 주파수 오프셋은 보호 구간에 Maximum Likelihood 추정 이론을 적용하여 얻어 낸다. 이 방법은 주파수 동기와 FFT 윈도우 위치 복원이 서로 연동하는 알고리즘이지만 여기서는 주파수 동기 관련된 부분만을 언급하기로 한다. 이 알고리즘은 보호 구간을 비교 구간으로 이용하므로 이 기간 동안에는 실제 유효 데이터가 전송되는 것이 아니라, ICI(Inter Channel Interference)의 영향을 제거하기 위한 데이터가 전송된다. 따라서 보호 구간의 길이를 유효 데이터 전송 효율과 ICI 면역성, 두 가지 모두 고려하여 최적하게 선정하여야 한다. (그림 1)은 보호 구간의 길이에 따른 Beek 알고리즘의 주파수 오프셋 특성을 나타낸 것으로, 평균 특성은 (a)에서와 같이 보호 구간 길이에 별로 상관없이  $-0.5 \sim 0.5$ 로 모두 같지만, 분산 특성은 (b)에서와 같이, 보호 구간

이 길수록 즉, 비교구간이 많을수록 개선되는 것을 볼 수 있다.



(a) 평균 특성



(b) 분산 특성

(그림 1) 보호 구간 길이에 따른 Beek 알고리즘의 특성(128FFT S-DMT)

### 3.3 동기 심볼을 이용한 동기 알고리즘

Nogami와 Nagashima가 제안한 알고리즘으로 동기를 위한 전용 심볼을 매 프레임의 선단에 삽입하여 주기적으로 수신기가 동기를 수행하도록 하는 방법이다. 이 알고리즘은 동기를 위한 전용 심볼을 정의하고 약속된 동기 심볼을 이용하여 주파수 동기와 FFT 윈도우 위치 복원을 동시에 수행할 수 있는 특징을 가진다. 즉, 수신된 심볼과 이미 알고 있는 연속 파일럿 패턴과의 상관 값을 구해서 그 값을 최대로 하는 경우의 주파수 오프셋을 추정한다.

### 3.4 보호 대역 전력검출에 의한 동기 알고리즘

보호 대역(guard band)는 인접 채널과의 간섭 영향을 줄이기 위해 각 채널 사이에 신호 전송을 하지 않고 비워두는 주파수 대역이다. 따라서 잡음이나 주파수 오프셋 없이 수신되었을 경우, 보호 대역에는 신호가 존재하지 않는 것이 정상이나, 만일 주파수 오프셋이 존재한다면 수신된

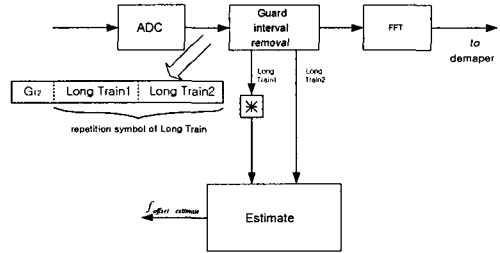
신호는 전체적으로 주파수 이동이 일어나게 되고, 이 영향으로 인하여 보호 대역 내에 신호 성분이 존재하게 된다. 보호 대역 전력 검출 방법은 이러한 점을 이용하여 주파수 오프셋을 추정한다. 즉, 원래 신호가 존재하는 대역과 인접한 보호 대역의 일정 구간을 잡고 이 구간을 이동하면서 전력을 검출하여 가장 작은 전력이 나오는 이동치를 추정함으로써 주파수 오프셋을 최적으로 보상한다.

### 4. 주파수 동기 알고리즘 설계

S-DMT 방식의 차세대 상향 채널 케이블모뎀에서는 Bursty 데이터 전송이 대부분이므로 신속한 주파수 동기가 요구된다. 신속한 주파수 동기를 보장하고 구현 특성을 좋게 하기 위해서는 추적 성능이 뛰어나면서도 오버 헤드와 계산량이 적어야 한다. 이러한 관점에서 전술한 여러 가지 주파수 동기 알고리즘의 장단점들을 비교 검토한 결과, 추정 주파수 오프셋의 분산 특성이 우수한 Moose 알고리즘의 기본 원리에 따른 심볼 반복 전송 기법을 이용하되, 신속한 주파수 동기를 위해서 프레임의 초기에만 주파수 동기를 얻어내도록, 데이터 프레임의 프리앰블 필드 내의 약속된 훈련열(training sequence)을 삽입하여 1개의 심볼 구간 내에서의 반복되는 패턴간의 위상을 비교함으로써 주파수 동기가 될 수 있도록 하는 방법을 제안하였다. 제안된 주파수 동기 알고리즘의 블록도를 (그림 2)에 나타내었다. 이 알고리즘은 (그림 2)에서와 같이, A/D를 거친 후, 심볼 타이밍 복원부에서 샘플링 클럭 위상 오프셋 보상이 최적하게 이루어졌다고 가정하고 보호 구간을 제거한 다음, 반복되는 훈련열을 이용하여 상대적 주파수 오프셋을 추정하게 된다. 이 때 주파수 오프셋을 추정하는 식은 다음과 같다.

$$\hat{\lambda} = -\frac{1}{2\pi T_N} \tan^{-1} \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N \text{Im}(y_{n-N}^* y_n)}{\sum_{n=1}^N \text{Re}(y_{n-N}^* y_n)} \right\}$$

여기서,  $y_n$ 는  $n$ 번째 샘플을 의미하며,  $N$ 은 심볼의 샘플 길이를 나타낸다.



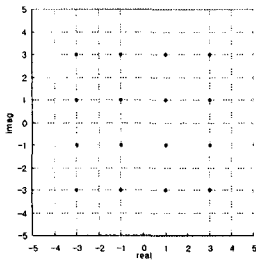
(그림 2) 약속된 훈련열을 이용한 주파수 동기 알고리즘의 블록도

### 5. 성능 평가

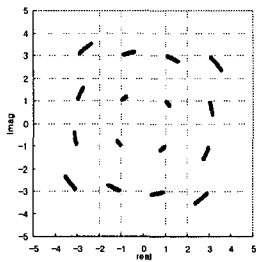
약속된 훈련열을 이용한 주파수 동기 알고리즘은 성능이 아무리 우수하더라도 AWGN 등의 잡음의 영향으로 실제 주파수 오프셋과 추정 주파수 오프셋 간에 다소의 주파수 차가 존재하기 마련이다. 이를 잔류 주파수 오프셋(residual frequency offset)이라고 하는데 버스트 구조에서는 프리앰블 필드에서 추정한 주파수 오프셋을 가지고 뒤에 연속된 데이터를 보상할 경우, 뒤로 갈수록 이러한 위상오차가 누적되어 심각한 BER 성능 열화가 발생된다.

(그림 3)은 Moose 알고리즘을 사용하여 주파수 오프셋을 추정하고 데이터 영역에서 보상하였을 경우, 16QAM S-DMT 시스템의 잔류 주파수 오프셋에 따른 수신 심볼의 위상 회전 정도를 성상도 상에 나타낸 것이다. 잔류 주파수 오프셋이 각각 0, 0.001, 0.005, 0.01의 경우에, 30 심볼 동안을 관찰한 결과를 나타내었는데 잔류 주파수 오프셋이 클수록 위상회전이 심각하게 나타남을 확인할 수 있다.

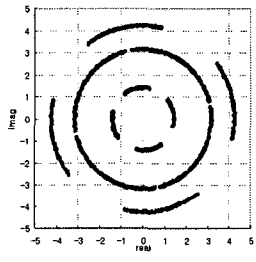
이와 같은 잔류 미세 주파수 오프셋으로 인한 위상 회전을 보상하는 방법으로, 매 데이터 심볼마다 미세 주파수 동기를 수행하는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 매 심볼마다 추정된 주파수 오프셋 값이 오히려 프리앰블에서 추정한 값보다 정확하지 않을 수 있고 계산량이 많다는 단점이 있다. 이에 반해, 파일럿 신호를 이용하여 회전된 위상 변화량만큼 보정해주는 방법은, 수신 단에서 신호 패턴을 이미 알고 있으므로 위상 회전량을 추정하여 그 만큼을 FFT후단에서 보상해주기만 하면 되므로, 계산량이 적고 간단하다는 장점이 있다.



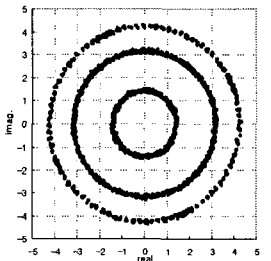
(a) 잔류주파수 오프셋= 0  
경우



(b) 잔류주파수 오프셋= 0.001  
경우



(c) 잔류주파수 오프셋= 0.005  
경우

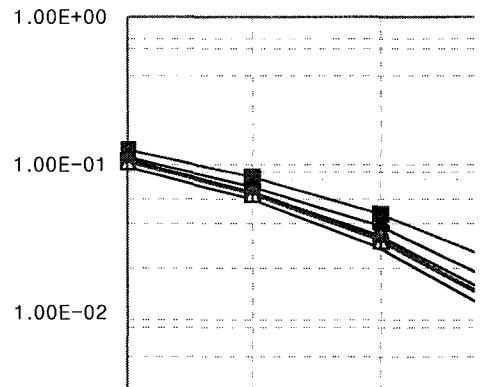


(d) 잔류주파수 오프셋= 0.01 의  
경우

(그림 3) 시스템의 잔류 주파수 오프셋에 따른  
성상도(16QAM, 128FFT S-DMT)

파일럿 신호는 128-FFT 프레임 내의 부 반송파 채널 중에 적절히 선택하여 전송할 수 있는데, 파일럿 신호의 수와 크기에 따라 잔류 주파수 오프셋에 대한 정정 능력에 차이가 발생할 수 있다. 따라서 이 두 가지를 변수로 하여 성능을 평가하여 보았다.

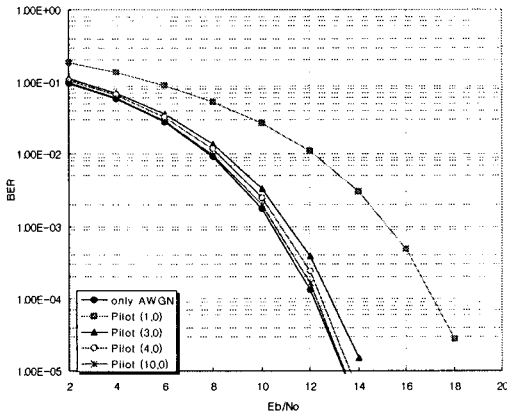
(그림 4)는 정상도 상에서의 파일럿 신호 크기 값을  $\pm 4.0$  고정 했을 경우, 파일럿 신호의 수에 따른 성능을 시뮬레이션 한 결과이다.



(그림 4) 파일럿 신호 수에 따른 성능 비교  
(16QAM, 128FFT S-DMT)

이 결과를 통해, 파일럿 신호 수가 많을수록 BER 성능이 더 좋아지나 4개 이상의 경우부터는 성능 개선이 포화되어 그다지 개선되지 않음을 볼 수 있다. 성능 개선을 위해서는 파일럿 신호 수를 늘려야하지만 그 만큼 유효 데이터 전송 효율이 나빠지므로, 4개 정도로 한정하는 것이 효율적임을 알 수 있다.

(그림 5)은 4개의 파일럿을 사용하였을 때 파일럿 신호의 크기에 따른 성능을 비교한 결과이다. (그림 5)에서는 파일럿 신호의 크기가 클수록 위상의 회전 영향을 덜 받아서 성능이 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 제한된 전력 내에서 통신해야 하므로 적당한 신호 크기를 가지는 것이 중요하다. (그림 5)에서 파일럿 신호 크기 값이 4.0 인 경우가 적절함을 확인할 수 있다.



(그림 5) 파일럿 신호 크기에 따른 성능 비교 (16QAM, 128FFT S-DMT)

## 6. 결론

신속한 동기를 필요로 하는 S-DMT 방식 상향 채널 케이블 모델에 적용 가능한 주파수 동기 알고리즘을 제안하고자 다수 반송파 시스템에서의 여러 가지 주파수 동기 알고리즘의 장단점을 분석한 결과, Moose의 알고리즘 같이 심볼 반복 전송을 이용한 동기 기법을 적용하되, S-DMT 방식 데이터 프레임에서 프리앰블 필드 내에 반복 패턴의 약속된 훈련열(training sequence)을 삽입하여 전송하고, 1개의 심볼 구간 내에서 반복 패턴 간의 위상을 비교함으로써 신속하게 주파수 동기가 될 수 있도록 하고, 파일럿 신호를 이용하여 잔류 주파수 오프셋에 따른 성능 열화를 개선하는 방법을 제안하였다.

제안한 알고리즘에 대해 16QAM 128FFT S-DMT 방식에서의 BER 성능을 평가해 본 결과, 파일럿 신호의 수와 크기에 따라 성능 차이를 보이나, 전반적으로 양호한 성능임을 확인하였고 신속한 동기를 필요로 하는 S-DMT 방식 상향 채널 케이블 모델에 적합한 방법임을 확인하였다.

## 참고문헌

[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 CA

TV Networks," IEEE Trans. Broadcasting, vol. 43, no. 2, pp. 127-135, Jun. 1997.

[2] [http://www.cablelabs.com/news\\_room/PR/01\\_pr\\_ad\\_v\\_phy\\_083101.html](http://www.cablelabs.com/news_room/PR/01_pr_ad_v_phy_083101.html).

[3] Jeyhan Karaoguz, John Yu, Vedat Eyuboglu, "Comparison of Single Carrier, Multi-carrier, and Spread Spectrum Modulations for Upstream PHY Layer in HFC CATV Networks", IEEE 802.14a/98-018, July 13, 1998.

[4] 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.

[5] 조병학, 최형진, "케이블모뎀 상향채널을 위한 Advanced PHY 변조 기술 성능 평가" 한국통신학회논문지, 제30권, 제2A호, pp. 1-11, Feb. 2005.

[6] F. Classen and H. Meyr, "Frequency Synchronization Algorithms for OFDM Systems Suitable for Communication over Frequency Selective Fading Channels," Proc. 44th IEEE Veh. Technol.(VTC), pp. 1655-1659, 1994.

[7] B. Le Floch, et al., "Digital Sound Broadcasting to Mobile Receiver," IEEE Trans. Consumer Electron., vol. 35, no. 3, pp. 493-503, Aug. 1989.

[8] P. H. Moose, "Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction," IEEE Trans. Commun., vol. 42, pp. 2908-2914, Oct. 1994.

[9] F. Daffara and O. Adami, "A New Frequency Detector for Orthogonal Multicarrier Transmission Techniques," Proc. VTC, pp. 804-809, 1995.

[10] J.-J. van de Beek, M. Sandell, and P. O. Börjesson, "On Synchronization in OFDM Systems Using the Cyclic Prefix," Proc. of RVK(Radiovetenskaplig Konferens), pp. 663-667, 1996.

[11] H. Nogami and T. Nagashima, "A Frequency and Timing Period Acquisition Technique for OFDM Systems," Proc. PIMRC, pp. 1010-1015. 1995.

### 조 병 학



1981년 : 서울대학교 전자공학과  
졸업

1988년 : 서울대학교 전자공학과  
석사 졸업(공학석사)

2002년 : 성균관대학교 전기전자컴  
퓨터공학과 졸업(공학박  
사)

1981년~1986년 : 동양정밀공업(주) 중앙연구소 과장

1988년~1990년 : LG전자 디지털미디어연구소 선임  
연구원

1992년~2001년 : 전자부품연구원 수석연구원

2001년~2002년 : 이스텔시스템즈(주) 인터넷 미디어  
연구소장

2002년~2003년 : (주)정소프트 연구소장

2004년~현 재 : 한국정보통신기능대학 방송통신설  
비과 교수

관심분야 : 디지털 변복조 기술, 케이블 모뎀, 방통  
융합기술, VoD, USN, WPAN