

# 고밀도 광 기록 채널에서 17PP 변조 부호의 연판정 입력 연판정 출력 런-길이 제한 복호 알고리즘

준회원 이 봉 일\*, 종신회원 이 재 진\*

## SISO-RLL Decoding Algorithm of 17PP Modulation Code for High Density Optical Recording Channel

Bongil Lee\* Associate Member, Jaejin Lee\* Lifelong Member

### 요 약

우수한 에러 정정 부호 기법인 LDPC(Low Density parity Check) 부호를 고밀도 광 기록 시스템에 적용하는 경우, 변조 부호 복호기는 연판정 채널 출력 검출기를 통과해 나온 정보 중에서 패리티 부분을 받아서 연판정 값을 출력해줘야 하는 알고리즘이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 고밀도 광기록 채널에서 17PP 변조 부호에 대한 효과적인 연판정 입력 연판정 출력 런-길이 제한 부호의 복호 알고리즘을 제안하고, 이 때 LDPC 부호의 성능을 비교하였다. 그 결과 기존에 연구되었던 (1, 7) RLL을 이용한 연판정 입력 연판정 출력 복호 알고리즘 보다, 고밀도 광 기록 채널에서는, 제안한 17PP를 이용한 연판정 입력 연판정 출력 복호 알고리즘이 0.8dB 정도의 성능 이득이 있는 것을 알 수 있었다.

Key Words : 17 parity preserving code, Run-length limited code, Optical recording, LDPC code

### ABSTRACT

When we apply the LDPC code for high density optical storage channel, it is necessary to make an algorithm that the modulation code decoder must feed the LDPC decoder soft-valued information because LDPC decoder exploits soft values using the soft input. Therefore, we propose the soft-input soft-output run-length limited 17PP decoding algorithm and compare performance of LDPC codes. Consequently, we found that the proposed soft-input soft-output decoding algorithm using 17PP is 0.8dB better than the soft-input soft-output decoding algorithm using (1, 7) RLL.

### I. 서 론

최근 에러 정정 부호들 중 주목받고 있는 부호 기법인 Low Density Parity Check (LDPC) 부호는 적은 계산량과 낮은 복호 지연, 다양한 블록의 크기와 부호화율 등의 장점을 가지고 있다. 1962년 Gallager에 의해 처음 제안 되었으며<sup>[1]</sup> 1966년에

Mackay와 Neal에 의해 우수성이 재발견되었고<sup>[2][3]</sup> 그 이후 Shannon이 제안한 이론적 채널 용량 한계에 근접하는 성능을 가진 부호로서 많은 연구가 진행되고 있다. 이 부호는 패리티 검사 행렬의 원소들의 대부분이 '0'인 부호로 확률값들을 반복 복호하는 방법으로 성능의 향상을 가져오는 기법이다. 런-길이 제한 (Run-Length Limited, RLL) 부호<sup>[4]</sup>

※ 본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

\* 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실 (bbong7258@nate.com), (zlee@ssu.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-12-568, 접수일자 : 2008년 12월 30일 최종논문접수일자 : 2009년 01월 19일

는 주로 정보저장장치에 사용되는 변조 부호로 데이터 '1'과 '1' 사이에 연속되는 데이터 '0'의 개수가 최소  $d$ 개, 최대  $k$ 개로 제한조건을 두어 인접 심볼간 간섭 (intersymbol interference, ISI)을 줄이고 타이밍 복구를 쉽게 하려는 것이 목적이다. 광기록 시스템에서 런-길이 제한 부호 다음에 LDPC 부호를 적용할 경우 새로 생성되는 패리티 부분이 런-길이 제한조건을 위반하므로 이를 방지하기 위해 패리티 부분을 따로 런-길이 제한 변조를 해줘야 한다. 본 논문에서는 최근 블루레이 (BD, Blu-ray Disc) 시스템에 사용되는 17PP (17 parity preserving) 변조 부호<sup>[5]</sup>를 이용하여 연관정 채널 검출기를 통과해 나온 정보 중에서 패리티 부분을 받아서 연관정 값을 출력해주는 알고리즘을 제안하여 실험하였다. 실험에 적용된 채널의 밀도는 실제 BD 시스템에서 사용되는 밀도보다 훨씬 높은 값을 사용하였다.

기존의 채널 검출기로 사용되던 PRML (Partial Response Maximum Likelihood)<sup>[6]</sup>이나 NPML (Noise - Predictive Maximum Likelihood)<sup>[7]</sup>은 비터비 알고리즘을 이용하여 경관정 값을 출력하도록 되어있는 반면 LDPC 부호는 연관정 값을 이용하여 반복 복호를 할 때 좋은 성능을 낼 수 있기 때문에 채널에 적용하려면 변조 부호를 통하여 변형된 패리티 부분이 복호되었을 때 연관정 값이 되도록 출력하는 알고리즘 즉 검출기의 연관정 출력값을 이용하여 패리티 부분에 대한 17PP 런-길이 제한 복호를 연관정 값으로 복호하는 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 LDPC 부호를 고밀도 광 기록 채널에 적용하였을 때, 신호검출기의 연관정 값을 이용하여 효과적인 17PP 변조 부호의 연관정 복호화 방법을 제안하고 이러한 방법에 대한 성능을 비교하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 광 기록 채널과 LDPC 부호와 연관정을 이용한 런-길이 제한 부호에 대하여 설명하고, III장에서는 LDPC 부호의 실험 결과를 비교하며, IV장에서는 결론을 맺는다.

## II. 실험 환경

### 2.1 광 기록 채널

광 기록 채널에서는 채널 밀도가 높아짐에 따라 인접 심볼 간 간섭이 비선형적으로 증가하게 된다. 이러한 현상은 광 기록 시스템 잡음의 대부분인 천이 지터를 발생시킨다<sup>[8]</sup>. 여기서 천이 지터는 매체에 기록되어진 천이 위치가 기록된 데이터와는 무

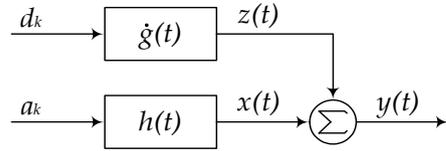


그림 1. 천이 지터가 부가된 채널 모델

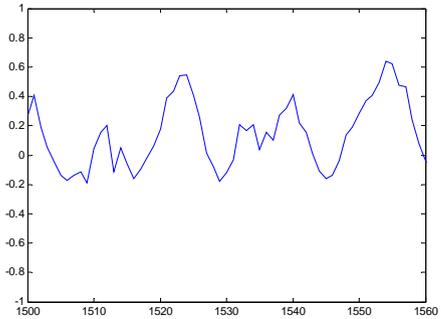


그림 2. 기록밀도 7일 때의 채널 출력 파형

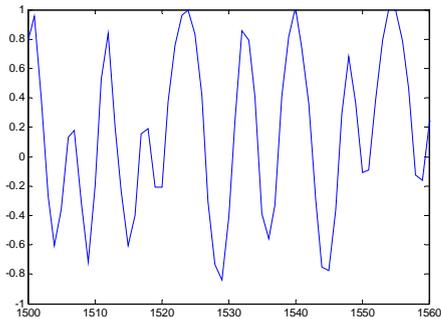


그림 3. 기록 밀도 3일 때의 채널 출력 파형

관하게 비선형적으로 이동하는 현상을 말한다. 천이 지터가 부가된 채널을 그림으로 표현하면 그림 1과 같다. 여기서  $a_k \in \{-1, 1\}$ 이고,  $h(t) = g(t) - g(t - T)$ 는 심벌 응답을 나타낸다. 천이 지터가 포함된 채널을 통과하여 나온 재생 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$y(t) \approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k g(t - kT) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k \dot{g}(t - kT) + n(t) \quad (1)$$

$$\approx x(t) + z(t) + n(t) \quad (2)$$

$$\dot{g}(t) = \frac{2}{ST\sqrt{\pi}} \exp\left(-\left(\frac{2t}{ST}\right)^2\right) \quad (3)$$

여기서  $g(t)$ 는 천이응답을 나타내고,  $T$ 는 심벌 주기를 나타내며  $S$ 는 정규화된 채널 밀도를 나타낸다.  $b_k = a_k - a_{k-1} \in \{-2, 0, 2\}$ 이고,  $d_k = -b_k \Delta_k$ 는 랜덤 잡음을 나타내고,  $\Delta_k$ 는 천이의 위치를 랜덤하게 변화하게 하는 평균이 0 이면서  $b_k$ 와 통계적으로 독립인 가우시안 분포를 갖는 잡음이라고 가정한다.  $z(t)$ 는  $d_k$ 에 의해 결정되는 천이 지터를 나타낸다.

밀도가 7일 때의 그림 2와 밀도가 3일 때의 그림 3을 비교해 보면 밀도가 높아짐에 따라 신호파형의 구분이 힘들어지는 것을 볼 수 있다.

### 2.2 LDPC 부호

LDPC 부호는 패리티 검사 행렬의 생성 방법에 따라 크게 랜덤 LDPC 부호와 결정적 LDPC 부호로 나눌 수 있다. 또한 패리티 검사 행렬의 구성에 따라 구조적 LDPC 부호와 비구조적 LDPC 부호로 나눌 수 있다. 구조적 LDPC 부호 방법은 복잡도를 줄이며 하나의 행렬로부터 부호율 조정과 부행렬 길이의 변환이 가능한 장점이 있다. Richardson과 Urbanke가 제안한 효율적인 부호화 기법<sup>10)</sup>은 생성 행렬 없이 패리티 검사 행렬의 재구성을 통하여 패리티 검사 행렬만을 이용하여 부호화가 가능하도록 함으로써 부호화의 복잡도 문제를 해결하였다. LDPC 부호의 열무게별 성능의 차이가 있는데 열무게가 3일 때 성능이 가장 좋다고 알려져 있다<sup>11)</sup>. LDPC 부호의 복호 방법으로는 메시지와 체크 노드의 정보들을 주고받으면서 반복적으로 복호하는 Sum-product 알고리즘을 사용한 반복 복호 방법이 좋은 성능이 나온다고 알려져 있다<sup>12)</sup>.

본 논문에서는 패리티 검사 행렬의 생성 방법으로는 랜덤한 방법을 사용했고 패리티 검사 행렬의 구성으로는 구조적인 방법을 사용하였으며 열무게는 3으로 하였고 Richardson과 Urbanke가 제안한 방법으로 부호화 하였다.

### 2.3 연관성을 이용한 런-길이 제한 복호 알고리즘

연관성 값을 이용한 런-길이 제한 부호의 복호 알고리즘은 McPheters 등이 DVD에 사용되는 (1, 7) RLL 변조 부호의 연관성 입력 연관성 출력 (Soft-Input Soft-Output : SISO) 복호 알고리즘을 제안하였다<sup>13)</sup>. 그러나 이 (1, 7) RLL 변조 부호는 본 논문에서 다루려는 고밀도 수준에는 적합하지 못하는 결점이 있다. 현재까지 개발된 고밀도 변조 부호로는 BD (Blu-ray Disc)에 사용되는 17PP 변조 부호가 있으며 부호화 기법은 1에 정리하였다.

표 1. 17PP 부호에 대한 기본 코딩 테이블

data	code
11	*0* xx1 then *0* = 000 xx0 then *0* = 101
10	001
01	010
00 11	010 100
00 10	010 000
00 01	000 100
00 00 11	000 100 100
00 00 10	010 100 000
00 00 01	010 100 100
00 00 00	010 100 000
*11 01 11	010 000 000 (next 010)
00 00 10 00	000 100 100 100
00 00 00 00	010 100 100 100

따라서 본 논문에서는 17PP 변조 부호를 복호하는 과정에서 신호검출기로부터 연관성값을 입력으로 받아서 연관성값을 출력하여 LDPC 복호기에 제공할 수 있는 복호 알고리즘을 제안하였다.

17PP 변조 부호를 연관성 입력 연관성 출력 런-길이 제한 복호를 하기 위해서는 우선 00, 01, 10, 그리고 11의 4가지의 입력에 대한 부호율 2/3인 17PP 조건을 만족하는 조합으로 각각 별개의 21비트의 시퀀스를 구성해야 한다. 00, 01, 10, 11일 때 각각 고정된 자리를 먼저 정한 후 앞과 뒤에 올 수 있는 경우를 부호화 기법을 이용하여 정한다. 이렇게 함으로써 앞뒤에 어떤 경우가 오더라도 이 자리는 고정되어 있기 때문에 복호할 당시 그때의 정확한 값으로 복호할 수 있다.

이렇게 해서 만들어진 복호화 알고리즘에 필요한 매핑 테이블<sup>14)</sup>을 만든다. 그 다음 SISO-RLL 복호기의 출력으로 내보낼 LLR값을 구하기 위해  $APP(d_k = 1)$ 과  $APP(d_k = 0)$ 을 구해야 한다.

$APP(d_k = 1)$ 은 다음의 식을 통해 계산하게 된다.

$$APP(d_k = 1) = \sum_{j \in S_1(k)} \exp \left[ \sum_{m=0}^{20} 2.0 I_m^{chan} (2c_m^j - 1) \right] \quad (4)$$

여기서  $j \in S_1(k)$ 는  $d_k(j) = 1$ 을 만족하는 조합을 나타낸다. 즉 위에서 작성된 매핑 테이블 중 10과 11을 나타내고,  $d_k(j) = 0$ 은 00과 01을,  $d_{k+1}(j) = 1$ 은 01과 11을 마지막으로  $d_{k+1}(j) = 0$ 은 00과 10을 나타낸다. 이러한 조합들은  $c_m^j$ 에 대입되어서  $(2c_m^j + 1)$ 을 계산하고  $I_m^{chan}$  값은 슬라이딩 윈도우를

통해 들어오는 21비트(9비트는 이전 값, 3비트는 현재 값, 9비트는 미래 값)의 입력이다.

이렇게 작성된 테이블의  $d_m^j$  과 입력인  $L_m^{chan}$  을 이용하여  $d_k$ 와  $d_{k+1}$  일 때 각각의  $APP(d_k=1)$ ,  $APP(d_k=0)$ ,  $APP(d_{k+1}=1)$ ,  $APP(d_{k+1}=0)$ 을 계산하고 log를 취해서 LLR 값을 구한다.

$$L^{RLL}(d_k) = \log \frac{APP(d_k=1)}{APP(d_k=0)} \quad (5)$$

계속해서 입력된 정보의 끝까지 3비트씩 슬라이딩 윈도우를 옮겨가면서 위와 같은 계산을 계속 해주면서 연관정 값을 출력한다.

### III. 모의실험

모의실험 전체 구조는 그림 4와 같다. 입력 정보를 변조 부호기를 거친 후 프리코딩을 해준다. 프리코더에서는 채널 비트를 NRZI (Non-Return-to-Zero Inverse) 파형으로 바꿔주는데 이것은 매체에 기록 가능한 구형 전류 파형으로 만드는 역할을 한다.

LDPC 부호는 데이터 부분과 패리티 부분으로 나눌 수 있는데 데이터 부분은 이미 17PP 제한 조건을 만족하는데 반해 새로 생성된 패리티 부분은 17PP 제한 조건을 만족하지 않는다. 따라서 패리티 부분을 17PP 변조 부호를 이용하여 제한 조건을 만족하게 하여 채널을 통과시킨다. 연관정 채널 출력 검출기를 통해 나온 패리티 부분을 앞에서 제안한 17PP 연관정 입력 연관정 출력 런-길이 제한 복호 알고리즘을 이용하여 그 복호된 값을 LDPC 복호기에 데이터 부분과 패리티 부분으로 넣어서 LDPC 복호를 한다.



그림 4. 모의 실험 블록 다이어그램

#### 3.1 모의실험 환경

LDPC 부호는 부호율이 0.94인 4096 비트의 데이터에 240비트의 패리티를 붙이는 (4336,240) LDPC 부호를 사용했다. 변조 부호는 17PP를 사용

표 2. 시스템 환경

LDPC 부호	부호길이 4336, 부호율 0.94
변조 부호	17PP SISO-RLL
차 수	7차
PR 타겟	PR( 1 2 3 4 4 3 2 1 )
잡음 환경	15% Jitter 85% AWGN
채널 밀도	7
반복 복호 횟수	LDPC 반복복호 20회

하였고 채널밀도는 7에서 실험을 하였다. 차수는 7차로 하여 모의실험을 하였으며 PR 목표 다항식은 (12344321)로 하였다.

채널의 잡음은 지터 잡음을 15%로 하고 부가적 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN)을 85%로 실험을 하였으며, LDPC 부호의 복호시 최대 반복횟수는 20회로 하였다. 시스템 변수들은 표 2에 정리해 놓았다.

#### 3.2 모의실험 결과

모의실험은 크게 두 가지 실험을 하였다. 첫 번째 실험은 LDPC 부호기를 통과해서 새로 생성된 패리티 부분이 런-길이 제한 조건을 만족하는지 여부에 따른 성능 차이 실험이고, 두 번째 실험은 패리티 부분에 제한조건과 연관정 입력 연관정 출력 런-길이 제한 복호기에 사용되는 변조 부호 알고리즘별 성능 비교 실험이다.

그림 5는 LDPC 부호화를 거친 후 새로 생성된 패리티 부분을 17PP 변조 부호화를 하지 않고 있는 그대로 채널과 채널 검출기를 통해 나온 값으로 LDPC 복호를 한 경우와 패리티 부분을 17PP 변조 부호를 통해 제한조건을 만족시켜서 채널과 채널 검출기를 통해서 나온 연관정 값을 받아서 연관정 값을 출력하는 17PP 런-길이 제한 복호기를 통과한 값을 이용하여 LDPC 복호를 한 경우를 비교한 결과 그래프이다. 예상되는 비와 같이  $10^{-6}$  비트오류율(BER)에서 0.8dB 정도의 성능 차이를 보이고 있다.

그림 6은 패리티 부분도 제한조건을 만족하도록 변조 부호화 하여 복호시 연관정 값을 받아 연관정 값을 출력하는 (1, 7) RLL과 17PP 변조 부호의 복호 알고리즘별 성능을 비교한 실험으로, 17PP 변조 부호를 이용한 알고리즘의 성능이 (1, 7) RLL 변조 부호를 이용하여 나온 성능보다  $10^{-6}$  BER에서 0.7dB 정도의 성능 이득을 보이고 있다. 이것은 (1, 7) RLL 부호가 고밀도에 대한 부담으로 인하여

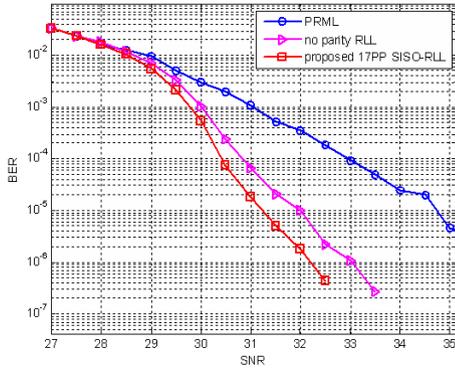


그림 5. 패리티 부분의 17PP 런-길이 제한조건 여부에 따른 성능 비교

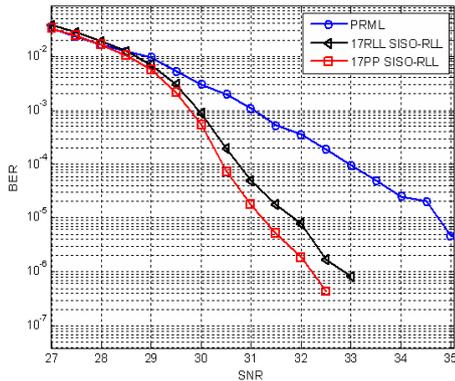


그림 6. 변조 부호에 따른 SISO-RLL 알고리즘별 성능 비교

17PP 부호보다 BER 성능이 떨어지는 것이라고 볼 수 있다.

한편 그림 6의 (1, 7) RLL 연관성 입력 연관성 출력 복호 알고리즘을 이용한 경우의 성능은 그림 5의 패리티 부분이 17PP 제한조건을 만족시키지 않은 경우의 성능보다 10<sup>-6</sup> BER에서 0.1dB 정도의 성능 이득이 있는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 LDPC 부호를 고밀도 광 기록 채널에 적용시키기 위하여 LDPC 부호를 거쳐 새로 생성되는 패리티 부분을 따로 변조 부호화하고 채널 검출기를 통과해서 나온 연관성 값을 받아서 연관성 값으로 복호를 해주는 17PP 변조 부호의 RLL 복호 알고리즘을 제안하였다. 기존에 연구가 되어있었던 (1, 7) RLL을 이용한 연관성 입력 연관성 출력 런-길이 제한 복호 알고리즘을 이용해서 나온 LDPC 성능 보다 본 논문에서 제안한 17PP를 이용

한 연관성 입력 연관성 출력 런-길이 제한 복호 알고리즘을 이용해서 나온 LDPC 성능이 더 좋은 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 하지만 (1, 7) RLL을 이용한 것 보다 17PP를 이용한 연관성 런-길이 제한 복호 알고리즘이 더 복잡도가 높으므로 이를 해결하기 위해서 연산을 간단하게 하는 방법 등의 연구가 추가로 이루어져야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. G. Gallager, "Low-density parity-check codes," IRE Trans. Inform. Theory, Vol.IT-B, pp.21-28, Jan. 1962.
- [2] D. J. C. Mackay and R. M. Neal, "Near Shannon limit performance of low-density parity-check codes," Electron. Lett., Vol.33, pp.457-458, Mar. 1997.
- [3] D. J. C. Mackay, "Good error-correcting codes based on very sparse matrices," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.45, pp.399-431, Mar. 1999.
- [4] K. A. S. Immink, Codes for mass data storage systems, Shannon Foundation Pub., 1999.
- [5] J. A. H. M. Kahlman, K. A. S. Immink, G. J. Van Den Enden, T. Nakagawa, Y. Shinpuku, and T. Narahara, "Apparatus and method for modulation with consecutive minimum runlength limitation," U.S. Patent US 6,496,541 B1, 2002.
- [6] R. D. Cideciyan, F. Dolivo, R. Hermann, W. Hirt, and W. Schott, "A PRML system for digital magnetic recording," IEEE J. Select. Areas Commun., Vol.10, pp.38-56, 1992.
- [7] J. D. Coker, E. Eleftheriou, R. L. Galbraith, and W. Hirt, "Noise-predictive maximum likelihood (NPML) detection," IEEE Trans. Magn., Vol.34, pp.110-117, 1998.
- [8] 이준, 이재진, "고밀도 광 기록 채널을 위한 터보 코드와 터보 등화기를 연결한 데이터 복호 방법," 한국통신학회논문지, 25권, 6B호, pp.1068-1074, 2000년 6월.
- [9] 이주현, 이재진, "광 기록 시스템을 위한 부분 응답 신호," 신호처리합동학술대회, 13권, pp.975-978, 2000년 9월.
- [10] T. J. Richardson and R. L. Urbanke, "Efficient encoding of low-density parity-check codes," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.47, No.2, Feb., 2001.
- [11] S. Hongwei, L. Jingfeng, and B. V. K. V. Kumar, "Concatenated low density parity check codes for magnetic recording channels,"

INTERMAG 2003, pp.DT-12, April. 2003.

- [12] F. R. Kschischang, B. J. Frey and H.-A. Loeliger, "Factor graphs and the sum-product algorithm," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.47, No.2, pp.498-519, Feb. 2001.
- [13] L. L. McPheters and S. W. McLaughlin, "Turbo-coded optical recording channels with DVD minimum mark size," IEEE Trans. Magnetics, Vol.38, No.1, pp.298-302, Jan., 2002.
- [14] 이봉일, "17PP 변조부호의 효과적인 SISO-RLL 복호 알고리즘", 석사논문, 숭실대학교, 2008.

이 봉 일 (Bongil Lee)

준회원



2007년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2007년 3월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사과정  
<관심분야> 스토리지 시스템, LDPC 부호, 채널코딩

이 재 진 (Jaejin Lee)

중신회원



1983년 2월 연세대학교 전자공학과 학사  
1984년 12월 U. of Michigan, Dept. of EECS 석사  
1994년 12월 Georgia Tech. Sch. of ECE 박사  
1995년 1월~1995년 12월 Georgia Tech. 연구원  
1996년 1월~1997년 2월 현대전자 정보통신 연구소 책임 연구원  
1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과 부교수  
2005년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수  
<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 스토리지 시스템