

고밀도 광기록 채널에서의 NPML 검출 성능 한계 분석

준회원 윤민영*, 종신회원 이재진*^o, 홍유표**

Performance Limit of NPML Detection on High Density Optical Recording Channels

Minyoung Yoon* Associate Member, Jaejin Lee*^o, Youpyo Hong** Lifelong Members

요약

잡음예측 최대유사도(NPML, Noise Predictive Maximum Likelihood) 검출기는 잡음 예측/백색화 과정을 비터비 검출기의 가지 메트릭 계산 과정에 삽입하여 데이터 검출의 신뢰성을 높인다. 본 논문에서는 고밀도 광기록 채널에서 밀도가 높아짐에 따라 고차 전달함수 다항식으로 요구되는 성능을 달성할 수 있음을 보인다. 모의실험을 통해 밀도마다 가장 적합한 PR 타겟값을 찾고, NPML 다항식 차수를 올려가며 BER을 측정하였다. 결과로 각 밀도에 따른 적절한 차수가 필요함을 보였다.

Key Words : PRML, NPML, Optical recording system, Performance limit

ABSTRACT

Noise predictive maximum likelihood(NPML) detector embeds noise prediction/whitening process in the branch metric calculation of Viterbi detector and improves the reliability. In this paper, some high-density optical storage channels are examined, and appropriate NPML systems are designed for each channel.

I. 서론

일반적인 통신시스템에서는 오류율(Error rate)의 목표가 10^{-5} 또는 10^{-6} 인데 반해 스토리지 시스템에서는 10^{-12} 또는 그 이상을 요구한다. 하지만 통신시스템이나 스토리지 시스템이나 최대한 많은 정보를 각 채널을 통해 전송하는 목적은 똑같다. 기록밀도를 높이고 redundancy를 최대한 줄여 가능한 많은 데이터를 기록 하는 것이다. 스토리지 채널에서 기록밀도를 높이기 위해선 향상된 데이터 검출기술이 요구된다. 밀도가 높아짐에 따라 인접 신호간 간섭(ISI-intersymbol interference)이 발생하게 되고 이를 극복하기 위해 좀 더 강력한 신호검출

방법이 요구되고 있다.

PRML 기법은 자기 기록 저장을 위한 신호처리 방법으로 가장 널리 연구되어 왔다. 자기기록 시스템에서와 마찬가지로 PRML 검출 기법은 광 채널에서도 적용될 수 있을 뿐만 아니라, 그 기능을 수행함에 있어서도 여러 장점을 지니고 있다. 하지만 PRML 기술은 기록 밀도가 높아짐에 따라 PR 신호로 등화된 신호의 잠재적인 잡음 확장이 발생하게 되고^[1], 이것은 PRML 시스템의 성능에 상당한 영향을 미친다. 일반적으로 이러한 고밀도 기록 시스템에 PR-다항식의 차수를 증가시켜 어느 정도 문제점을 해소시킬 수 있으나 비선형 잡음에 대하여는 성능 향상의 한계를 지니고 있다. 이러한 문제점

※ 본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

* 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장및통신연구실(zlee@ssu.ac.kr)(^o: 교신저자)

** 동국대학교 IT학부 (yhong@dgu.edu)

논문번호 : KICS2005-02-083, 접수일자: 2005년 2월 23일, 최종논문접수일자: 2008년 7월 21일

을 극복하기 위한 방법으로, 잡음예측 PR-등화에 기초한 MLSD 기법, 즉 잡음예측 최대유사도(noise predictive maximum likelihood, NPML) 검출 방법이 연구되고 있다²⁾.

본 논문에서는 광기록 채널에서 잡음 예측에 기초한 MLSD 기법을 사용한 NPML 검출 방법을 사용하여, PR 다항식의 차수를 최대한 증가시켜가면서 각 밀도별 최적의 차수와 계수를 찾아 그 성능을 비교, 분석 하였다.

II. 비선형 광기록 채널 모델링

매질에 기록된 데이터가 재생될 때 데이터들 사이에는 인접 심벌 간섭이 발생한다. 인접 심벌 간섭은 채널 밀도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가한다. 광기록 채널 잡음의 대부분을 차지하는 비선형 요소인 천이지터와 가우시안 잡음을 고려하여 광기록 비선형 채널의 모델을 그림 1에 나타내었다.

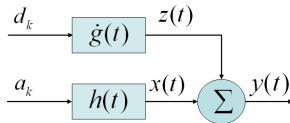


그림 1. 천이지터와 AWGN을 고려한 비선형 광기록 채널모델

이 채널의 재생신호를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 y(t) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k h(t - (k + \Delta_k)T) + n(t) \\
 &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k g(t - (k + \Delta_k)T) + n(t) \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서 $a_k \in \{-1, 1\}$ 이고, $b_k = a_k - a_{k-1} \in \{-2, 0, 2\}$, Δ_k 는 천이의 위치를 랜덤하게 변하게 하는 평균이 0 이면서 b_k 와 통계적으로 독립인 랜덤 천이지터를 나타낸다. $g(t)$ 는 천이응답을 나타내고, T 는 심벌 주기를 나타내며 S 는 정규화된 채널 밀도를 나타낸다. $h(t) = g(t) - g(t - T)$ 는 심벌 응답을 나타내고, $n(t)$ 는 가우시안 잡음을 나타낸다. $g(t)$ 의 대역폭이 한정되어 있고, $|\Delta_k|$ 가 작다면 (1) 식을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 y(t) &\approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k g(t - kT) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k \dot{g}(t - kT) + n(t) \\
 &\approx x(t) + z(t) + n(t) \quad (2)
 \end{aligned}$$

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

여기서 $d_k \equiv -b_k \Delta_k$ 는 랜덤 잡음을 나타내고, $\dot{g}(t) \equiv \dot{T}g(t)$ 는 정규화된 임펄스 응답을 나타내며, $z(t)$ 는 d_k 에 의해 결정되는 천이 지터를 나타낸다. 레이저 빔은 가우시안 분포 모양을 가지기 때문에 Δ_k 를 평균이 0이고 가우시안 분포를 갖는 잡음이라고 가정한다.

III. 잡음예측 부분응답 최대유사도 검출

부분 응답 기술은 대역폭 제한이 매우 엄격한 저장 매체 시스템들에서 대역폭 효율을 증가시키는 방법으로 널리 사용되고 있다. 그림 2와 같이 채널과 등화기를 포함한 전체 특성이 부분응답 다항식의 특성이 되도록 등화기를 설계하게 된다.

$$PR(f) = F[h(t) * e(t)] = H(f) \cdot E(f) \quad (4)$$

PR 채널 모델은 D 변환을 이용한 부분응답 다항식으로 표현이 가능하며, 기록 밀도가 높아지면 신호간 간섭의 범위도 넓어지므로 기록 밀도에 따른 적절한 PR 채널 모델의 선택이 요구된다.

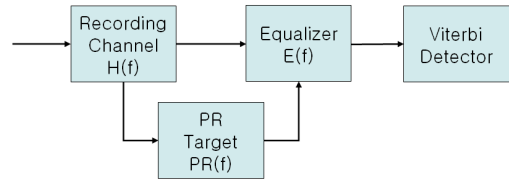


그림 2. 부분 응답 기법을 이용한 PRML 시스템

잡음예측 PRML(noise predictive PRML, NPML) 검출기는 비터비 검출기의 가지 메트릭(branch metric) 계산에 잡음예측/백색화 과정을 삽입함으로써 PRML에 쉽게 적용할 수 있으며, 실제 NPML 검출기에서 상태수 K 와 잡음예측기의 개수 N 을 신중히 선택하여 기존의 PRML보다 향상된 오류율 또는 선행기록밀도를 보인다²⁾.

PR-등화기의 전달 함수는 채널 임펄스 응답 $h(t)$ 에 대한 등화기의 출력 y_k 를 PR 목표 다항식으로 근사화시키는 기능을 한다. PR 목표 다항식의 일반화된 표현식은 다음과 같다.

$$f(D) = (f_0 + f_1 D^1 + \dots + f_{M-1} D^{M-1}) \quad (5)$$

여기서 계수 $f_i, i=0, \dots, M-1$ 는 음이 아닌 임의의 양의 정수값이 된다. PR 목표 다항식 값에 근사한 등화기의 출력 $\{y_k\}$ 는 PR 신호에 잉여 잡음신호가 더해진 신호가 된다. 따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_k = \sum_{j=0}^{M-1} a_{k-j} f_j + w_k \quad (6)$$

이때, w_k 는 잉여 잡음을 의미하며, 신호간 잉여 간섭과 유색 잡음이 포함되어 있다. 이러한 잉여 잡음 중에 유색 잡음은 잡음예측기를 통과시켜 백색화할 수 있다. $p(D) = (p_1 D^1 + \dots + p_N D^N)$ 는 잉여 잡음 w_k 에 대하여 N 개의 탭을 갖는 잡음예측기 전달 함수를 나타낸다. 등가적으로 예측 에러 필터의 전달 다항식을 $[1 - p(D)]$ 로 나타낼 수 있고, 예측 에러에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} e_k &= w_k - \hat{w}_k = w_k - \sum_{i=1}^N w_{k-i} p_i \\ &= (y_k - \sum_{j=0}^{M-1} a_{k-j} f_j) - \sum_{i=1}^N (y_{k-i} - \sum_{j=0}^{M-1} a_{k-i-j} f_j) p_i \end{aligned} \quad (7)$$

즉, $\{e_k\}$ 는 PR-등화된 출력 신호 $\{y_k\}$ 의 백색화 잡음 성분을 나타낸다. 비터비 알고리즘으로 구현되는 시퀀스 결정 시스템이 잡음예측/백색화 과정에 의해 신뢰성 있는 연산을 하기 위해서는 검출기의 각 상태와 연관된 과거 경로가 기억된 결정값에 의해 결정되어야 한다. 이러한 이유로 NPML 검출기는 예측기가 삽입된 PR 신호를 위한 시퀀스 결정 검출기라 할 수 있다.

상태를 S_x 라 가정하고 첨자 $x \in \{1, 2, \dots, 2^{M-1}\}$ 를 상태수라 하면, NPML 검출기에 대해 현재 상태 S_x 에서 다음 상태 S_x 로 가는 상태 변환에서의 가지 매트릭 계산은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} BM_k(S_x, S_x) &= [y_k - \sum_{i=1}^N (y_{k-i} - \sum_{j=0}^{M-1} a_{k-j-i} f_j) p_i \\ &\quad - \sum_{j=0}^{M-1} a_{k-j} f_j]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $a_{k-i-j}(S_x) f_j$ 는 상태 S_x 와 연관된 경로로부터 가지는 과거 결정값을 나타내고 $a_{k-j} f_j$ 은 상태 S_x 에서 다음 상태 S_x 로 상태 변환이 될 경우를 가정한 결정값이 된다. 이를 통해 예측기의 연산은 잉여 잡음 w_k 가 0에 근사한 값을 갖도록 한다.

부분응답 다항식 PR(121)의 특성을 갖는 채널의 예를 생각해보면, 등화기를 통과하는 데이터는 다음

과 같다.

$$y_n = a_n + 2a_{n-1} + a_{n-2} + w_n \quad (9)$$

여기서 y_n 는 등화기를 통과하여 나온 데이터이고, a_n 은 n 번째 데이터, w_n 은 n 번째 잡음이다. 여기서 잡음을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$w_n = y_n - (a_n + 2a_{n-1} + a_{n-2}) \quad (10)$$

이것을 예측기에 통과시킨 후의 값을 z_n 이라고 하면 다음과 같은 식이 된다.

$$z_n = w_n - \sum_{i=1}^N w_{n-i} p_i \quad (11)$$

여기서 z_n 이 0이 되도록 LMS 알고리즘을 사용하여 계수들을 훈련시키면 예측기의 계수를 구할 수 있다. 이렇게 구한 계수를 가지고 비터비 검출기에 적용하여 데이터를 복원한다. 그림 3은 기록밀도가 5일 때 $N=2$ 인 예측기를 통과하기 전과 통과한 후의 잡음을 그렸다. 통과하기 전에는 고주파 대역에 몰려있던 잡음이 예측기를 통과하면서 전 대역에 고르게 펼쳐져서 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이것은 특정 주파수에서 확장된 잡음이 백색화된 것을 확인해 준다.

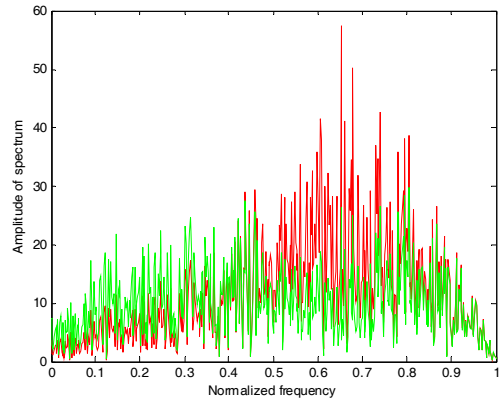


그림 3. 예측기를 통과하기 전과 후의 잡음 스펙트럼

IV. 기록밀도별 최적 다항식 추정 실험

고밀도 광기록 채널에서의 NPML 성능의 한계를 알기 위해 여러 가지 실험을 하였다. 모의실험은 광기록 시스템에서 가우시안 잡음과 천이지터가 존재하는 채널에서 행해졌다.

밀도를 6~10까지 증가시키면서 그에 따른 성능을 비교 분석하였다. 타겟 계수를 이용하여 스펙트

럼을 그렸을 때, 그림 4와 5를 비교해 보면 차수가 늘어날수록 스펙트럼 폭이 좁아지고 날카로워지는 것을 알 수 있다. 마찬가지로, 채널을 통과한 데이터의 스펙트럼을 각 밀도에 따라 그려보면, 그림 6과 7과 같이 밀도가 높아질수록 스펙트럼 폭이 좁아지고 날카로워지는 것을 알 수가 있다. 따라서 고밀도 광기록 채널에서의 데이터 검출은 급격하고 날카로운 스펙트럼을 감쌀 수 있는 고차 다항식이 필요함을 알 수 있다.

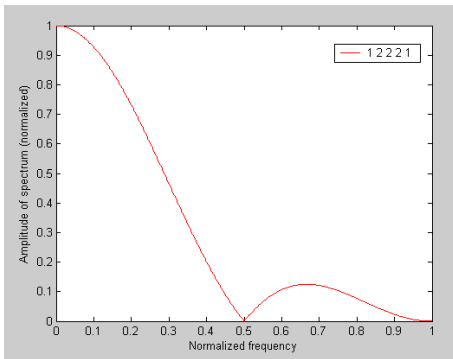


그림 4. 4차 Target 스펙트럼

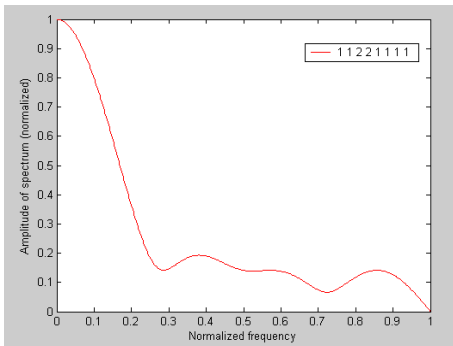


그림 5. 7차 Target 스펙트럼

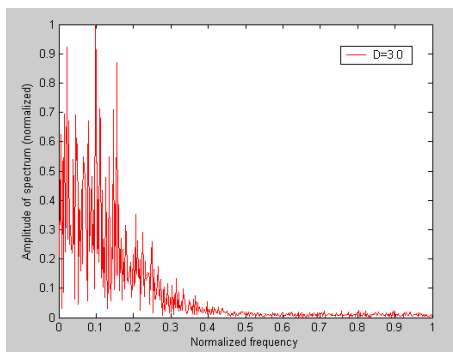


그림 6. 밀도 3에서 채널을 통과한 데이터의 스펙트럼

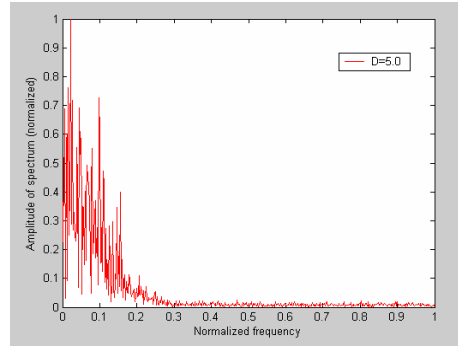


그림 7. 밀도 5에서 채널을 통과한 데이터의 스펙트럼

표 1에서는 밀도별 채널값에 가장 근접한 다항식의 타겟값을 제시하였다. 밀도별 다항식 타겟은 백색 부가 가우시안 잡음과 지터잡음에만 영향을 받는다고 가정하여 모든 가능한 정수 계수를 갖는 타겟의 BER 성능의 비교를 통해 찾았고, 그 타겟값을 근거로 고밀도 광기록 채널에 대한 모의실험을 하여 성능을 비교하였다.

표 1. 밀도별 최적의 다항식 타겟 (오름차순)

다항식 Target 계수값					
S	4차	5차	6차	7차	8차
6	1101	22303	233312	1013302	10013202
7	2102	21202	233212	1013202	10023011
8	2102	21202	121202	1023203	10133021
9	2001	21102	222112	1031202	10122102
10		20101	232113	1121202	20131102

데이터 검출 기준은 SNR 25dB일 때 10^{-3} 이하의 성능을 나타내는 다항식 차수를 데이터 검출 가능한 기준으로 잡았다. 표 1의 밀도별 타겟을 토대로 다항식이 고차로 가면 갈수록 밀도에 따른 성능 또한 향상됨을 모의실험을 통해 확인하였다. 하지만 시뮬레이션을 통해 밀도 10의 범위를 넘어서면 9차 다항식을 통해서도 SNR 25dB에서 BER 10^{-3} 이상의 성능을 만족하지 않음을 알게 되어 밀도의 범위는 10까지로 정하였다. 6차 NPML 다항식을 통해서 밀도가 6일 때에 가장 좋은 성능을 확인할 수 있었고, 오히려 차수가 증가하면 할수록 BER이 안 좋아지는 것을 알 수 있다. 그것은 채널 밀도와 상관없이 무조건적인 고차 다항식은 오히려 데이터 검출을 어렵게 한다는 것이다. 그래서 각 밀도별 최적의 차수가 있음을 확인하였고, 고밀도에서는 저차 다항식으로는 도저히 검출이 불가능함을 알 수 있

다. 밀도 10일 때에는 6차, 7차 다항식을 통해서도 검출이 어렵고 8차 다항식이 되어야 BER 10^{-3} 이상의 성능을 나타낼 수 있다. 그림 8~10에서는 NPML 다항식 차수가 6~8차 일 때 각 밀도별 검출 성능을 보여준다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 자기기록 저장 장치에서 검출 방식으로 이용되고 있는 잡음예측 NPML 검출방식을 광기록 채널에서 적용하여, 채널을 통과한 데이터의 전력 스펙트럼 밀도를 통해 적절한 PR 타겟들을 선정하였다. 선정된 타겟들로 모의실험을 수행하여 각 채널마다 가장 우수한 성능을 보이는 NPML 시스템을 결정하였다.

밀도를 높이고, PR 다항식의 차수를 최대한 증가 시켜가면서 각 밀도별 최적의 차수와 계수를 찾아 그 성능을 비교 분석 하였다. 고밀도로 가면 갈수록 고차 다항식을 통한 데이터 검출만이 가능함을 보였다. 또한 무조건적인 고차다항식 사용은 저밀도

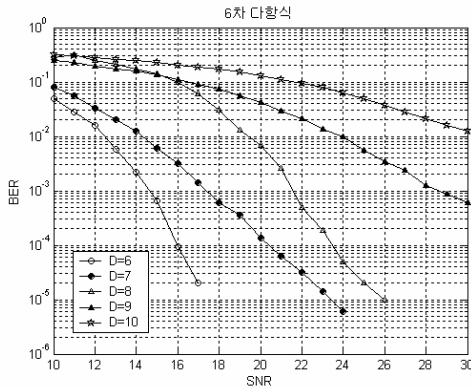


그림 8. 6차 다항식을 통한 밀도별 BER 그래프

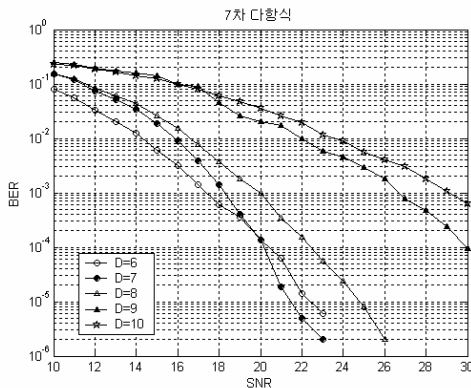


그림 9. 7차 다항식을 통한 밀도별 BER 그래프

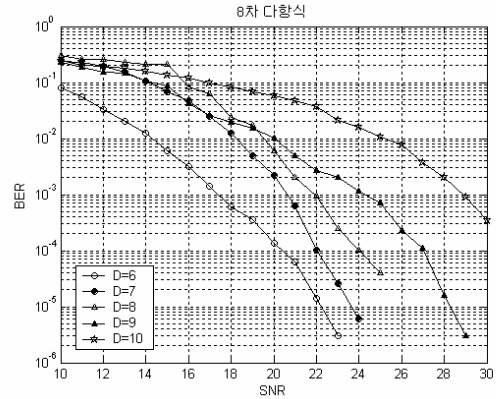


그림 10. 8차 다항식을 통한 밀도별 BER 그래프

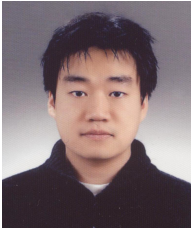
에서는 오히려 좋지 않은 성능을 나타낼 수 있음을 확인하였고, 밀도별 최적의 다항식과 계수 사용만이 최고의 성능 향상을 얻을 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Osawa, Y. Kurihara, Y. Okamoto, H. Saito, H. Muraoka and Y. Nakamura, "PRML systems for perpendicular magnetic recording," J. Magn. Soc. Japan, Vol.21, pp.399-405, Oct. 1997.
- [2] E. Eleftheriou and W. Hirt, "Noise-predictive maximum-likelihood detection for the magnetic recording channel," Proc. of ICC '96, Vol.1, pp.556-560, June 14-18, 1996.
- [3] J. Bergmans, Digital Baseband Transmission and Recording, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1996.
- [4] G. Bouwhuis, J. Bratt, A. Huijser, J. Pasman, G. van Rosmalen and K. Schouhamer Immink, Principles of Optical Disc Systems, Bristol, U.K, Adam Hilger Ltd. 1985.
- [5] 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, Jan. 1992.
- [6] H. Shafiee, M. Melas and P. Sutardja, "Performance Comparison of EPRML and Peak Detection in High Density Digital Magnetic Recording," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.29, pp.4015-4017, Nov. 1993.

윤 민 영 (Minyoung Yoon)

준회원



2003년 2월 명지대학교 전자공학과 학사
2008년 2월 숭실대학교 대학원 정보통신공학과 석사
<관심분야> 스토리지 시스템

홍 유 표 (Youpyo Hong)

종신회원



1991년 2월 연세대학교 전기공학과 학사
1993년 5월 U. of Southern California 전기공학과 석사
1998년 8월 U. of Southern California 컴퓨터공학과 박사
1998년 7월~1999년 2월 Synopsys, Hillsboro, Senior Engineer
1999년 3월~현재 동국대학교 전자공학과 부교수
<관심분야> 스토리지 시스템, 영상압축, 회로설계

이 재 진 (Jaejin Lee)

종신회원



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