

논문 2004-41TC-4-2

반복 복호의 계산량 감소를 위한 간단한 복호 중단 판정 알고리즘

A Simple Stopping Criterion for the MIN-SUM Iterative Decoding Algorithm on SCCC and Turbo code

허 준*, 정 규 혁**

(Jun Heo and Kyu-hyuk Chung)

요 약

본 논문에서는 min-sum 반복복호를 위한 효과적인 반복복호 중단 알고리즘을 제안한다. 이전까지 소개된 반복복호 중단 알고리즘이 상호정보량을 바탕으로 중단시점을 판단하는데 비하여 제안된 알고리즘은 트렐리스 상에서 복호된 결과가 유효한 시퀀스인가를 판단하여 복호중단 시점을 결정한다. 제안된 반복복호 알고리즘을 3GPP 터보부호와 직렬결합 길쌈부호에 적용하여 반복복호의 계산량과 필요한 메모리의 양이 크게 줄어드는 것을 나타내었다.

Abstract

A simple stopping criterion for iterative decoding based on min-sum processing is presented. While most stopping criteria suggested in the literature, are based on Cross Entropy (CE) and its simplification, the proposed stopping criterion is to check if a decoded sequence is a valid codeword along the encoder trellis structure. This new stopping criterion requires less computational complexity and saves memory compared to the conventional stopping rules. The numerical results are presented on the 3GPP turbo code and a Serially Concatenated Convolutional Codes (SCCC).

Keywords: Iterative decoding, Turbo code, SCCC, stopping condition

I. 서 론

차세대 이동통신 시스템에서 고속의 멀티미디어 서비스를 위한 차세대 오류정정부호로 언급되는 터보부호는 매우 우수한 성능을 나타내는 반면에 반복 복호(Iterative Decoding) 때문에 추가되는 계산량의 증가가 큰 단점으로 지적된다. 이와 같이 반복 복호(Iterative Decoding) 기법을 구현하는데 가장 큰 문제는 반복횟수

에 비례하여 증가하는 계산량 (complexity)과 그것에 의한 지연시간이다. 따라서, 평균적인 계산의 복잡도를 줄이는 방법 중에 하나로서 반복복호의 중단 시점을 적절하게 파악하여 평균반복횟수를 줄이는 연구가 지속적으로 진행되어 왔으면, 몇 가지 반복복호중단 알고리즘이 발표되었다. 이러한 반복복호중단 알고리즘은 상대적으로 높은 신호대잡음비 영역에서 적은 수의 반복복호 이후에 곧 바로 수렴하여 더 이상 반복복호 효과를 나타내지 않는다는 사실에 기반을 두고 있다. 이러한 반복복호 중단 알고리즘을 위해서는 중단 시점을 파악하기 위한 기준이 중요하며 CE(Cross Entropy)에 근거하여 복호중단 시점을 판별하는 연구가 발표되었다^[2]. 그러나, CE 기법은 복호중단 시점을 파악하기에 요구되는 계산량이 너무 많아서 실제로 구현하기가 어려우므로 이것을 간략화해서 터보부호에 적용한 연구가 [3][4]에 발표되었다. 간략화 된 CE기법은 반복복호의 과정에서 얻어지는 extrinsic information의 부호 변화율이 미

* 정회원, 건국대학교 전자공학부
(College of Information and Telecommunications Dept of Electronics Engineering Konkuk University)

** 정회원, 미국 University of Southern California 전기공학과

(Communication Sciences Institute, Electrical Engineering-Systems, Dept. University of Southern California, Los Angeles, CA 90089-2565, USA)

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R08-2003-000-10165-0) 지원으로 수행되었음.

접수일자: 2003년12월17일, 수정완료일:2004년4월7일

리 실험적으로 정해놓은 한계 값 보다 작으면 반복복호를 중단한다. 예를 들면

$$\text{stopwhen} : T(l) \leq (0.005 \sim 0.03)N$$

여기서 $T(l)$ 은 l 번째 반복복호에서 extrinsic 정보의 부호 변환 횟수이며 N 은 반복복호를 통하여 한번에 처리되는 입력 데이터의 블록의 크기이다. 이 알고리즘을 SCR 복호 중단 알고리즘이라고 한다. 여기서 0.005 또는 0.03 등의 값은 실험을 통하여 미리 정해놓은 값으로서 너무 빨리 반복복호를 중단 시켰을 때 나타날 수 있는 성능의 열화와 너무 늦게 반복복호를 중단 시켰을 때 나타나는 평균반복횟수의 증가 관계를 고려하여 적절하게 정하여 진다. 다른 형태의 간략화 된 SCR 알고리즘은 연속적으로 반복 복호된 이진수 값을 비교하여 두 번의 연속적인 반복복호 결과가 일치하면 더 이상 반복복호 효과가 없다고 판단하여 복호를 중단하며, 이것을 HDA 알고리즘이라고 부른다. 이것을 간단한 수식으로 표현하면,

$$\text{stopwhen} : u_k^{(l)} = u_k^{(l-1)}, \forall k, 1 \leq k \leq N.$$

이러한 SCR과 HDA 반복 복호 중단 알고리즘이 터보부호에 적용된 결과가 [3][4]에 발표되었다. 결과적으로 HDA 알고리즘이 상대적으로 낮은 신호대잡음비 영역에서 효과적인 복호중단 성능을 나타내었으며, SCR 알고리즘은 높은 신호대잡음비 영역에서 효과적인 복호 중단 성능을 나타내었다.

본 논문에서는 터보부호 및 직렬결합 길쌈부호(SCC C)^[1]에 적용 할 수 있는 새로운 반복복호 중단 알고리즘을 제안하며, 제안하는 반복복호 중단 알고리즘은 기존의 알고리즘에 비하여 낮은 계산량 (평균 반복복호 횟수)를 신호대잡음비 전 영역에서 나타낼 뿐 만 아니라 기존의 알고리즘을 비하여 복호중단 시점을 판별하기 위해 소비되는 메모리의 양이 크게 줄어드는 장점을 가지고 있다.

II. VCW 반복 복호 중단 알고리즘

반복복호 알고리즘은 크게 sum-product(log-MAP) 알고리즘과 min-sum(max-log-MAP) 알고리즘으로 나누어지며, sum-product 알고리즘이 심벌 복호화 알고리즘인데 반하여 min-sum 알고리즘은 시퀀스 복호화 알고리즘이다. 제안된 반복복호 중단 알고리즘은

min-sum 알고리즘이 시퀀스 복호인 점에 착안하여 반복복호의 결과가 유효한 시퀀스인가를 트렐리스 구조상에서 확인한 후에 유효한 시퀀스인 경우에 반복복호를 중단한다. 반복복호 과정에서 유효한 다른 시퀀스로 잘못 판별된 확률이 매우 낮기 때문이다. 이것을 유효 시퀀스 확인 기법(Valid Codeword Check: VCW) 즉 VCW 알고리즘이라고 한다^[6]. 트렐리스를 구조를 갖는 이진 부호화 알고리즘은 시간 k 에서 각각의 state들은 다음 시간 $k+1$ 에서 가질 수 있는 상태는 오직 둘 뿐이다. 만약에 복호된 시퀀스가 완전히 이러한 트렐리스 구조를 만족한 상태가 되면 이것을 유효한 전송 시퀀스라고 한다.

$$u^{(l)} \in \mathbb{C}$$

여기서 $u^{(l)}$ 은 l 번째 반복복호에서 얻어진 시퀀스를 나타내며 \mathbb{C} 는 유효한 codeword의 집합을 나타낸다. 한 가지 주목할 사실은 min-sum 알고리즘에서 intrinsic 정보는 항상 트렐리스 구조에서 하나의 시퀀스를 나타내는데 반하여 extrinsic 정보는 그렇지 않다는 것이다. 따라서 반복복호를 통하여 extrinsic 정보의 신뢰도가 높아지면 어느 순간부터 유효한 트렐리스의 path를 따르게 된다. 유효한 트렐리스 구조를 따르는 path인지를 판별하기 위해서는 트렐리스 구조를 나타내는 테이블을 이용하여 쉽게 구현 할 수 있다. 기존의 HDA 알고리즘이 이전의 반복복호 결과를 저장해 두었다가 다음의 반복복호 결과와 비교하여 복호중단 시점을 결정하는데 반하여 제안된 VCW 알고리즘은 이전의 복호결과를 이용하지 않으므로 복호결과를 저장하기 위해서 별도의 메모리 영역을 필요로 하지 않는 장점이 있다. 또한, 기존의 SCR 알고리즘이 실험적인 한계값을 미리 정해야 하는 반면에 제안된 VCW 알고리즘은 어떠한 한계값 설정도 필요하지 않다.

III. VCW 알고리즘 실험결과

그림 1의 직렬결합 길쌈부호 (Serially Concatenated Convolutional Code: SCCC)가 제안된 VCW 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 사용되었다. 반복복호에서 사용되는 입력 데이터의 길이는 1024 비트로 조정하였다.

각각의 길쌈부호기(CC)는 부호율 1/2의 systematic recursive 길쌈부호를 사용하였으며 BPSK 변조를 사용

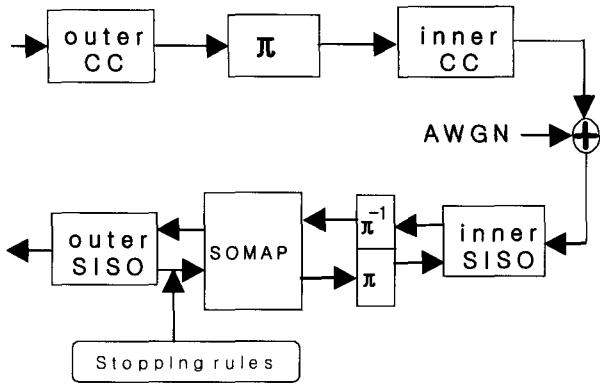


그림 1. 복호중단 알고리즘을 적용한 SCPC 복호기 블록도

Fig. 1. Block diagram of SCPC system with stopping algorithm.

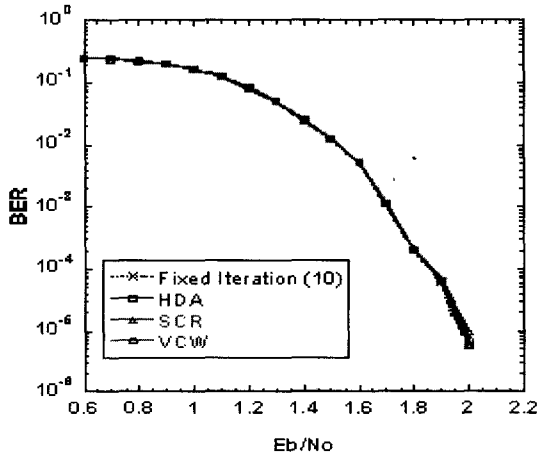


그림 2. AWGN 채널에서 SCPC 시스템의 세 가지 반복복호 중단 알고리즘의 성능과 고정된 반복 복호 횟수(10회)를 갖는 알고리즘의 성능 비교

Fig. 2. Performance comparison of different stopping different of SCPC and fixed number iterative decoding algorithm.

하였다. 복호 중단 알고리즘은 Outer SISO의 extrinsic 정보를 바탕으로 매 반복 복호 마다 적용하였다. 그림 2 는 세 가지 서로 다른 복호 중단 알고리즘의 성능을 AWGN 채널에서 비교하였다. 모든 경우에 최대 반복 복호 횟수는 10으로 고정하였으며, 그 이전에 각각의 복호 중단 알고리즘에 의해서 복호 중단 판정이 나면 복호를 중단한다. 성능 비교를 위해서 복호중단 알고리즘을 사용하지 않고 매 블록마다 10번으로 고정된 반복 복호를 수행한 성능도 같이 나타내었다.

기존의 알고리즘 중에서 SCR 복호중단 알고리즘은 한계 값을 어떻게 설정하느냐에 따라서 성능이 크게 변하는데 10번으로 고정된 복호결과와 같은 성능을 얻기

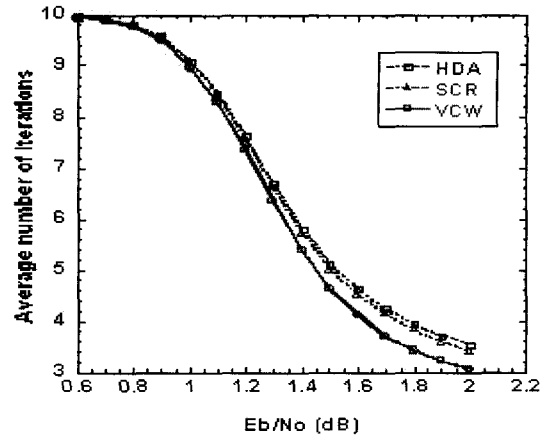


그림 3. AWGN 채널에서 SCPC 시스템의 세 가지 반복복호 중단 알고리즘의 평균 반복 회수 비교

Fig. 3. Average number of iterations of different stopping rules on AWGN channel.

위해서 $T(l) = 0.03N$ 으로 정하였다. 그림 2 에서 보듯이 세 가지 반복 복호 알고리즘은 모두 10번으로 고정된 반복복호의 경우와 거의 같은 성능을 나타낸다. 다시 말하면, 오류가 남아 있는데도 불구하고 복호중단 판정을 너무 일찍 내려서 성능의 열화를 가져오는 경우는 거의 없음을 나타낸다. 또한 복호중단 판정 이후에 실행되는 반복복호는 성능의 개선에 전혀 도움이 되지 않으므로 가능하면 빨리 그리고 정확하게 복호중단 시점을 판별하는 것이 복잡도를 줄이고 (따라서 지연시간도 줄어듦), 소모되는 전력을 줄이는데 도움이 됨을 알 수 있다. 같은 성능을 나타내는 복호중단 알고리즘 중에서는 평균 반복 횟수가 적을수록 잔여 오류 없이 복호중단 시점을 정확하게 판정한 것을 나타낸다. 기존의 복호중단 알고리즘 중에서 HDA 알고리즘은 연속적인 횟수의 복호결과를 비교하여 판정하므로 l 번째 반복복호에서 모든 오류가 정정된 경우에도 $l + 1$ 번째 반복복호까지 기다려야 복호중단 판정을 내릴 수 있는 것에 반하여 제안된 복호중단 알고리즘은 l 번째 복호결과에서 모든 오류가 정정된 것으로 판정되면 바로 복호를 중단하므로 평균반복횟수를 줄일 수 있다.

그림 3 에서는 세 가지 다른 복호 중단 알고리즘의 평균 복호 횟수를 나타내었다. 신호대 잡음비가 매우 낮은 영역에서는 세 가지 알고리즘이 거의 같은 복호횟수를 나타내는 것에 반하여 신호대 잡음비가 높아질수록 제안된 VCW 알고리즘이 기존의 SCR이나 HDA 알고리즘에 비하여 적은 반복 횟수를 나타낸다. 예를 들어 신호대 잡음비가 2 dB의 경우에는 HDA 와 SCR이

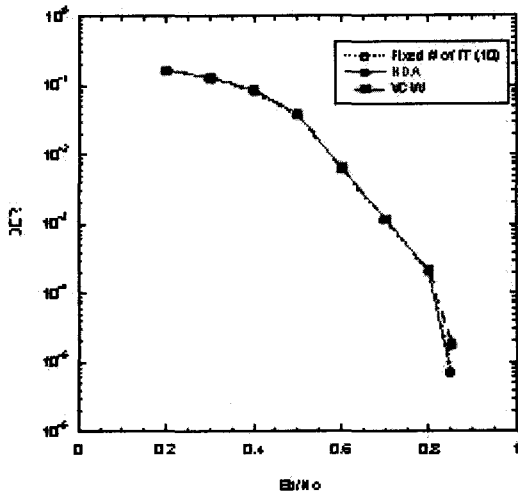


그림 4. AWGN 채널에서 3GPP 터보부호의 두 가지 반복복호 중단 알고리즘의 성능과 고정된 반복 복호 횟수(10회)를 갖는 알고리즘의 성능 비교

Fig. 4. Performance of stopping rules of 3GPP Turbo code on AWGN channel.

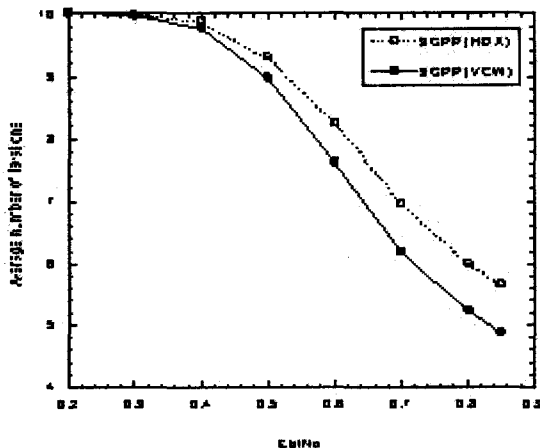


그림 5. AWGN 채널에서 터보부호의 두 가지 반복복호 중단 알고리즘의 평균 반복 횟수 비교

Fig. 5. Average number of iterations of stopping rules on 3GPP Turbo code.

3.5 번의 반복횟수가 평균적으로 필요한데 반하여 VCW 알고리즘은 3번의 반복횟수만을 요구하므로 약 15%의 계산량 감소 및 소요되는 전력의 감소를 가져올 수 있다. 또한 VCW 알고리즘은 신호 블록 초반부에서 유효하지 않은 시퀀스로 판별되면 바로 복호중단 판별을 멈추고 다음 횟수의 복호를 수행 할 수 있다. 이점은 복호중단 판별을 위해서는 반드시 해당 데이터 블록의 끝까지 복호중단 여부를 판별해야 하는 기존의 알고리즘과 다른 점이다. 이것은 현재의 복호결과를 저장해 둘 필요가 없기 때문에 생기는 장점이다.

그림 4와 그림 5 에서는 3GPP 터보부호[7][8]에 대

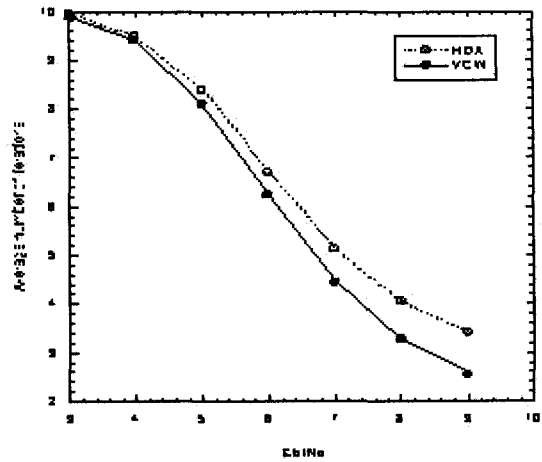


그림 6. 페이딩 채널에서 터보부호의 두 가지 반복복호 중단 알고리즘의 평균 반복 횟수 비교

Fig. 6. Average number of iterations of 3GPP turbo code on fading channel.

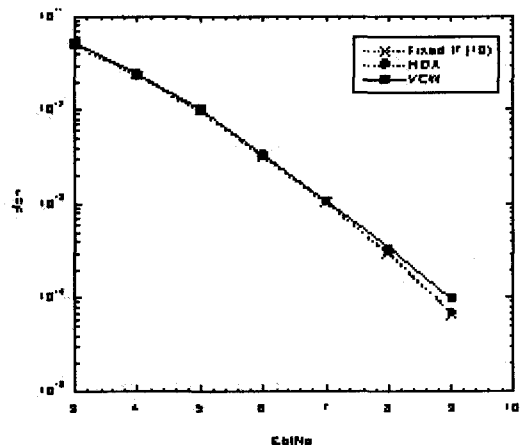


그림 7 페이딩 채널에서 3GPP 터보부호의 두 가지 반복복호 중단 알고리즘의 성능과 고정된 반복 복호 횟수(10회)를 갖는 알고리즘의 성능 비교

Fig. 7. Performance of stopping rules of 3GPP Turbo code on fading channel.

한 AWGN 채널에서 반복중단 알고리즘의 성능을 나타내었다. 데이터 블록의 크기는 표준에 나타난 것 중에 하나인 5114 비트로 하였다. SCCC 경우와 마찬가지로 성능의 차이는 거의 없으며, 그림 5 에 나나낸 바와 같이 평균 반복횟수는 VCW 복호중단 알고리즘을 사용한 경우에 가장 적었다. 신호대 잡음비 0.85 dB에서 제안된 VCW 알고리즘이 HDA 알고리즘에 비해서 약 0.8 회 정도의 감소된 평균 반복 횟수를 나타내었다. 이것은 약 16%의 계산량 감소를 의미한다. 반복복호 중단 알고리즘의 페이딩 채널에 대한 효과를 알아보기 위해서 같은 3GPP 터보부호를 도플러 주파수 $fT = 0.01$

의 플랫 페이딩 채널에서 실험하였다. 데이터 블록의 크기는 AWGN 채널의 경우와 마찬가지로 5114 비트로 하였다. 그림 6과 그림 7은 같은 3GPP 터보부호를 플랫 페이딩 채널에서 반복 복호 알고리즘을 실험한 결과이다. AWGN 채널의 경우와 마찬가지로 페이딩 채널에서도 반복복호 중단 알고리즘이 평균 계산량을 크게 감소시키는 것을 알 수 있으면 특히 제안된 VCW 알고리즘이 페이딩 채널에서도 낮은 평균 반복횟수를 나타내었다. 신호대 잡음비 9 dB에서 제안된 VCW 알고리즘이 HDA 알고리즘에 비해서 약 0.9 회 정도의 감소된 평균 반복 횟수를 나타내었다. 이것은 약 26%의 계산량 감소를 의미하며, 따라서 페이딩 채널에서 제안된 반복 복호의 계산량 감소 효과가 앞서 나타낸 AWGN 채널에서의 계산량 감소효과 보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

VI. 결론 및 추후 연구

본 논문에서는 반복 복호 알고리즘에서 복호 횟수를 성능의 열화없이 줄이는 방법으로 복호 중단 판정 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 기존의 알고리즘에 비하여 성능의 열화 없이 반복복호 계산의 복잡도를 크게 줄였으며 기존의 알고리즘이 연속적인 복호 결과를 저장한 후에 이용하는 것에 반하여 제안된 알고리즘은 현재의 복호 결과에 따라서 복호 중단 판정이 이루어짐으로서 별도의 메모리가 필요 없으며 신속하게 복호중단 여부가 블록의 중간 부분에서 이루어 질 수 있다. 또한, 기존의 SCR 알고리즘과는 다르게 실험적이 한계값이 필요하지 않다는 장점이 있다. 제안된 VCW 알고리즘이 비교적 높은 신호대 잡음비에서 기존의 SCR이나 HDA 알고리즘 보다 우수한 성능 (적은 평균 반복복호 횟수) 을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] Benedetto, S., Divsalar, D., Montorsi, G., and Pollara, F.: 'Soft-input soft-output modules for the construction and distributed iterative decoding of code networks', European Trans. Commun., March/February 1998, pp. 155-172
- [2] Hagenauer, J., Offer, E., and Papke, L.: 'Iterative decoding of binary block and convolutional codes', IEEE Trans. Inform. Theory, vol.42, March 1996, pp. 429-445
- [3] Shao, R., Lin, S., and Fosstorfier, M.: 'Two simple stopping criteria for turbo decoding', IEEE Trans. Commun., vol.47, August 1998, pp. 1117-1120
- [4] Shao, R., Fosstorfier, M., and Lin, S.: 'Two simple stopping criteria for turbo decoding', proceeding of ISIT 1998, Cambridge, MA, USA, pp. 279
- [5] Chugg, K.M., Anastasopoulos, A., and Chen, X.: Iterative Detection (Adaptivity, Complexity Reduction, and Applications), KAP, 2001
- [6] J. Heo, K. Chung, and K. M. Chugg, "Simple Stopping Criterion for the MIN-SUM Iterative Decoding Algorithm," IEE Electronics Letters, 6th Dec. 2001, Vol.37, No. 25, pp. 1530-1531.
- [7] G. Lee, S. Hyun, and S. C. Park, "Evaluation of the MAP Decoder for the Turbo Codes of IMT-2000," Proc. of VTC2000, 0pp. 1265-1269.
- [8] J. Vogt and A. Finger, "Improving the max-log-MAP turbo decoder," IEE Electronics Letters, 9th Nov. 2000, Vol.36, No. 23, pp. 1937-1939.

— 저 자 소 개 —



허 준(정회원)
 1989년 서울대학교
 전자공학과 졸업
 1991년 서울대학교
 전자공학과 석사
 2002년 미국 USC대학
 전기공학과 공학박사

1991년 ~ 1997년 LG전자 중앙연구소
 2003년 ~ 현재: 건국대학교 전자공학부 조교수
 <주관심분야: 통신공학, 부호이론, 반복복호>



정 규 혁(정회원)
 1997년 성균관대학교
 전자공학과 졸업
 1998년 미국 USC대학
 전기공학과 공학석사
 2003년 미국 USC대학
 전기공학과 공학박사

2000년 ~ 2001년 미국 TrellisWare
 Technologies사 연구원
 <주관심분야: 통신공학, 부호이론, 반복복호>