

위성 통신에서의 반복 복호 기법

Iterative Decoding for a Satellite Broadcasting Channel

이 재 선*, 박 재 성*, 이 병 무**, 김 진 영*

Jae Sun Lee, Jae Sun Park, Byoung Moo Lee, and Jin Young Kim

Abstract

In this paper, the network performance of a turbo coded optical code division multiple access (CDMA) system with cross-layer, which is between physical and network layers, concept is analyzed and simulated. We consider physical and MAC layers in a cross-layer concept. An intensity-modulated/direct-detection (IM/DD) optical system employing pulse position modulation (PPM) for satellite broadcasting communications is considered. In order to increase the system performance, turbo codes composed of parallel concatenated convolutional codes (PCCCs) is utilized. The network performance is evaluated in terms of bit error probability (BEP). From the simulation results, it is demonstrated that turbo coding offers considerable coding gain with reasonable encoding and decoding complexity. Also, it is confirmed that the performance of such an optical CDMA network can be substantially improved by increasing the interleaver length and the number of iterations in the decoding process. The results of this paper can be applied to implement the satellite broadcasting communications.

Keywords : 강도변조/직접검파 (IM/DD : Intensity Modulation/Direct Detection), 광 (Optical) 부호분할 다중접속 (CDMA : Code Division Multiple Access) 시스템, 터보 (Turbo) 부호, 펄스위치변조 (PPM : Pulse Position Modulation)

I. 서 론

부호분할 다중접속 (CDMA : Code Division Multiple Access) 시스템은 주파수 조절이 필요하지 않기 때문에 시분할 다중접속 (TDMA : Time Division Multiple Access) 및 파장분할 다중접속 (WDMA : Wavelength Division Multiple Access)에 비해서 네트워크를 디자인하는데 더욱 유연하다. 특히, 시분할 다중접속은 칩비율의 역다중화와 네트워크의 정확한 시간 동기화가 필요하고, 파장분할 다중접속은 매우 정확한 파장 안정성이 요구된다. 더욱이, 단일 모드 위성통신의 넓은 전송 대역폭은 기본적으로 광 (Optical) 부호분할 다중접속 시스템에 적합하다.

무선 광 채널과 같은 전력 제한적인 광 채널에서는 전력 효율성 때문에 펄스위치변조가 적합하다. 데이터를 송신하기 위해 펄스위치변조에서는 펄스위치변조 심볼에 따라서 레이저 펄스가 이미 지정된 펄스 위치 중의 하나로 이동한다.

다중 사용자 검파나 채널 부호화 같은 광 부호분할 다중접속 시스템의 성능을 개선하기 위한 많은 연구가 있었다[1-3]. 최근, 채널 부호화 분야에서 Berrou 등에 의해 1993년에 제안된 터보 (Turbo) 부호에 대한 관심이 높아졌다[1]. AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널뿐만 아니라 무선 채널에서의 부호분할 다중접속 시스템에서 터보 부호는 상당한 부호화 이득은 제공함을 확인하였다[2]. 또한 터보 부호화된 광 통신 시스템의 성능이 최근 여러

연구에서 입증되었다[4-5].

터보 부호화는 반복적으로 수행된다[6]. 부호화기는 병렬로 연결된 두 개의 요소 부호기와 인터리버로 구성되어 있다[7]. 전송될 정보 시퀀스는 인터리버에 의해 시간 순서가 바뀐 후 두 번째 부호기의 입력으로 사용된다. 터보 부호는 인터리버의 길이가 증가할수록 성능이 향상되고, 부호화 복잡도가 선형적으로 증가하며, 큰 블록 길이의 부호화가 가능하다는 것이 알려져 있다[6]. 터보 부호는 최대 우도 (ML : Maximum Likelihood) 부호가 아니라, 반복적인 방법으로 최대 우도 부호에 근접하도록 하는 부호 방법이다. 모든 반복 부호마다, 채널을 통해 수신된 정보와 다른 부호기에 의해 생성된 신뢰성 있는 정보를 이용하여 단일 부호가 수행된다.

본 논문에서는 터보 부호화된 펄스위치변조-광 부호분할 다중접속 시스템의 성능을 분석하고 실험하였다. 광 채널에서는 강도변조 (IM : Intensity Modulation) 및 직접검파 (DD : Direct Detection)하는 시스템으로 모델링하였다. 네트워크의 성능은 비트오류확률 (BEP : Bit Error Probability) 측면에서 분석되었다. 터보 부호 과정에서는 최대 사후 확률 (MAP : Maximum a Posteriori Probability) 알고리즘과 이것의 변형된 형태인 Max-Log-MAP 알고리즘 및 연관정 출력 비터비 알고리즘 (SOVA : Soft Output Viterbi Algorithm)이 사용되었다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제 II장에서는 광 부호분할 다중접속 네트워크 및 송·수신기 모델을 소개하였고, 제 III장에서 터보 부호기와 복호기의 구조 및 부호 알고리즘을 제시하였다. 제 IV장에서는 시스템 성능을 분석하였으며, 모의실험 결과를 제 V장에서 나타내었다. 마지막으로 본 논문의 결론을 제 VI장에서 제시하였다.

접수일자 : 2009년 8월 7일

최종완료 : 2009년 8월 7일

*광운대학교 전자공학과

교신저자, E-mail : abalani@naver.com

**KT 중앙연구소

II. 시스템 모델

1. 송신기 모델

그림 1은 본 논문에서 고려한 광 부호분할 다중접속 시스템의 송신기 구조를 나타낸다. 각 사용자의 정보 비트는 터보 부호기에 의해 부호화 된다. 부호화된 비트 스트림은 펄스위치변조 방식으로 변조되는데, 여기서 부호화된 비트 스트림 $\log_2 M$ 비트가 M 심볼로 블록화된다. 그리고 송신기는 펄스 시퀀스를 M 시간 슬롯 중에서 한 슬롯에 전송한다. 여기서 슬롯은 M -ary 펄스위치변조 신호 형태에서 각 심볼의 구간을 나타낸다.

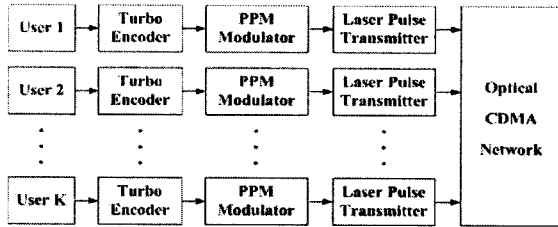


그림 1. 광 부호분할 다중접속 시스템의 송신기 구조
Fig. 1. Transmitter structure of an optical CDMA system.

2. 수신기 모델

그림 2은 본 논문에서 고려한 광 부호분할 다중접속 시스템의 수신기 구조를 나타낸다. 수신된 신호는 먼저 광 상관기에 의해 처리되는데, 광 상관기는 펄스 위치에 대응하는 광 지연 선의 집합이다. 본 논문에서 레이저 빛은 비동기식으로 가정하기 때문에, 사용자들의 광 신호들은 강도가 더해진다. 원하는 신호가 광 상관기를 통과하면, 상관기 출력은 광자 검파기에서 전기 신호로 바뀐다. 그리고, 펄스위치복조기에서 가장 큰 출력을 가진 위치가 송신된 심볼이 존재하는 위치로 선택된다. 이 검파과정을 거친 후 펄스위치복조기 출력은 송신된 정보 비트를 추정하기 위해 터보 복호기에 의해 복호화된다.

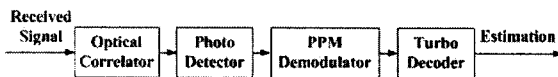


그림 2. 광 부호분할 다중접속 시스템의 수신기 구조
Fig. 2. Receiver structure of an optical CDMA system.

III. 터보 부호화/복호화

1. 터보 부호화

그림 3은 터보 부호기 구조를 나타낸다. 터보 부호기는 요소 부호로 알려진 두 개의 귀납적인 Systematic 길쌈 부호 (Recursive Systematic Convolutional Code)로 이루어져 있다. 터보 부호는 선형 블록 부호 형태이기 때문에 부호화 동작은 정보 행렬과 생성 행렬의 모듈로-2 행렬 곱셈으로 볼 수 있다. 부호기 1은 입력 데이터 시퀀스를 곧바로 부호화하고, 부호기 2는 길이 N 을 갖는 의사 인터리버에 의해 시간 순서가 바뀐 입력 데이터 시퀀스를 부호화한다. 부호기 출력은 입력이 출력으로 곧바로 연결되는 Systematic 비트, d_k , 와 두 요소 부호에 의한 Parity 비트, $x_{p1,k}$ 와 $x_{p2,k}$, 로 구성되어 있다.

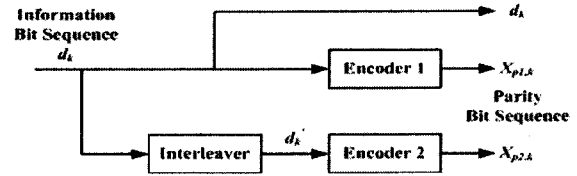


그림 3. 터보 부호기 구조
Fig. 3. Structure of a turbo encoder.

2. 터보 복호화

그림 4는 터보 복호기 구조를 나타낸다. 터보 부호화 과정에서 매우 큰 효과적인 구속장은 인터리빙과 연접을 통하여 생성된다. 따라서 기존의 비터비 복호 알고리즘은 터보 복호에 사용할 수 없다. 터보 복호는 반복적으로 수행된다. 특히, 각 요소 부호는 다른 요소 부호로부터 복호화된 가장 최근의 정보를 이용하여 개별적으로 복호화된다.

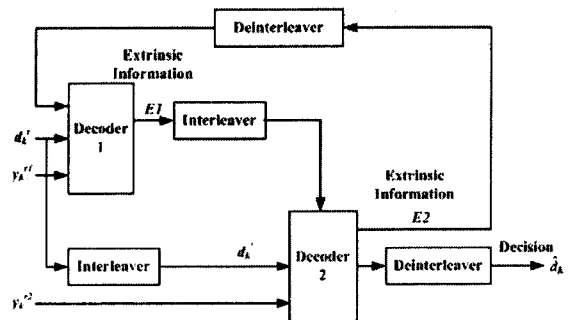


그림 4. 터보 복호기 구조
Fig. 4. Structure of a turbo decoder.

각 요소 복호기는 식 (1)에 표현된 Systematic 비트의 사후 로그-우도 비율 (LLR : Log-Likelihood Ratio)을 계산한다.

$$\Lambda_k = \log \frac{p(d_k = 1 | y_1, y_2, \dots, y_N)}{p(d_k = 0 | y_1, y_2, \dots, y_N)} \quad (1)$$

여기서 y_i ($1 \leq i \leq N$)는 복호기 출력이고, $p(d_k = j | y_1, y_2, \dots, y_N)$ 은 비트 값이 j 일 사후 확률이다. 이 외부 정보 Λ_k 는 각 반복 복호에서 복호 출력을 더욱 신뢰성 있게 만들 수 있는 다이버시티의 한 형태로 간주할 수 있다. 복호 과정은 복호기 출력이 특정 기준을 만족할 때까지 계속된다. 충분한 반복 복호 후, 복호기의 최종 출력 값에 기초하여 송신된 데이터 비트를 결정, \hat{d}_k , 하게 된다.

3. 터보 복호 알고리즘

터보 부호에 대한 최적의 복호 알고리즘인 ML 복호 알고리즘은 인터리버가 존재하기 때문에 매우 복잡하다. 하지만 터보 부호에 대한 반복 복호는 매우 유용하고 매우 높은 성능을 나타낸다. 반복 복호는 반복하는 사이에 연관된 정보를 교환하면서 요소 부호기 사이에 반복을 일으킨다. 이상적으로 이 요소 부호기는 사후 비트 확률을 계산하기 위해서 MAP 복호기여야 한다. 하지만 MAP 복호 알고리즘은 또한 매우 복잡하기 때문에, 요소 부호기에 대해

서 낮은 복잡도를 가지는 다른 알고리즘이 제안되었다. 그 중 하나가 SOVA 알고리즘인데, 이는 표준 비터비 알고리즘을 수정하여 연관성 출력을 생성하도록 한 것이다. MAP 알고리즘과 SOVA 알고리즘에서, 복호 복잡도는 구속장에 지수적으로 증가하기 때문에 요소 부호의 구속장을 결정하는 부호기 레지스터의 개수는 제한되어 있다. 또한 MAP 알고리즘을 더욱 쉽게 구현하기 위해서 Max-Log-MAP 알고리즘이 제안되었다.

IV. 모의실험 결과

이번 장에서는 계층간 교차 개념이 적용된 광 부호분할 다중접속 시스템의 성능을 보이기 위해서 모의 실험한 결과를 보인다. 실험에서 8-ary 펄스위치변조를 사용하였고, 3개의 모든 부호화 비트는 8개의 가능한 펄스위치변조 심볼 중 하나로 연결된다. 입력 비트들은 독립적으로 인터리빙되고, 두 개의 요소 길쌈 부호기에 의해 부호화된다. 터보 부호기의 부호율은 1/3이고, 생성 다항식은 $1 + D^2$ 와 $1 + D + D^2$ 이다.

그림 5은 터보 복호 과정에서 반복 복호 회수를 변화시키는 경우, 심볼당 평균 광자 개수에 따른 비트 오류 성능을 나타낸 것이다. 실험에서 다중 사용자 수는 10명, 인터리빙의 길이는 100, 평균 잡음 광자 개수는 50, 광 직교 부호의 weight은 5, 광 직교 부호의 길이는 500으로 설정하였다. 그리고 터보 복호는 MAP 알고리즘을 사용하였다. 그림 5의 결과로부터 터보 부호화는 부호화 되지 않은 경우와 비교할 때 상당한 부호화 이득을 제공하는 것을 확인할 수 있다. 또한 터보 복호 과정에서 반복 복호 회수가 증가할수록 부호화 이득의 증가로 인해 비트 오류율 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 성능 증가 비율은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 충분한 반복 복호 이후에는 연관성 정보가 더 이상 쓸모없게 되기 때문이다.

그림 6은 인터리버 길이를 변화시키는 경우, 심볼당 평균 광자 개수에 따른 비트 오류 확률 성능을 나타낸 것이다. 실험에서 다중 사용자 수는 10명, 평균 잡음 광자 개수는 50, 반복 복호 회수는 8회, 광 직교 부호 weight은 5, 광 직교 부호의 길이는 500으로 설정하였다. 그리고 터보 복호는 MAP 알고리즘을 사용하였다. 그림 6로부터 부호화율을 변화시키지 않더라도 인터리버 길이를 증가시키면 상당한 시스템 성능 향상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 간단히 하드웨어 구조를 변경하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 의미하는 것으로, 터보 부호의 핵심적인 장점이라고 할 수 있다.

그림 7은 광 직교 부호의 weight을 변화시키는 경우, 심볼당 평균 광자 개수에 따른 비트 오류 확률 성능을 나타낸 것이다. 실험에서 다중 사용자 수는 10명, 인터리버 길이는 100, 평균 잡음 광자 개수는 50, 반복 복호 회수는 8회, 광 직교 부호의 길이는 500으로 설정하였다. 그리고 터보 복호는 MAP 알고리즘을 사용하였다. 그림 7의 결과로부터 광 직교 부호의 weight이 증가할수록 시스템 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이는 광 직교 부호의 weight이 증가할수록 간섭 신호의 평균 광자 개수가 감소하기 때문이다.

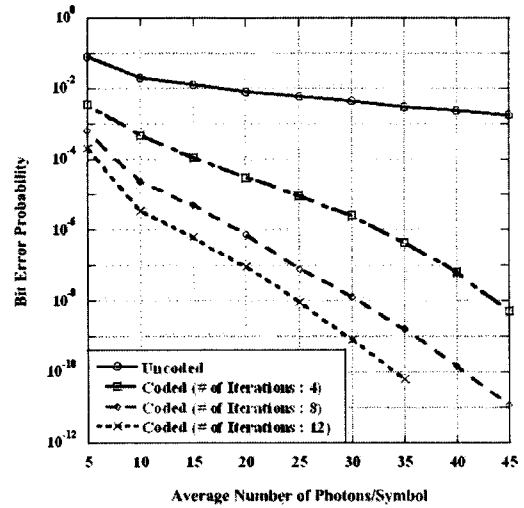


그림 5. 다양한 반복 복호 회수에 대하여 심볼당 평균 광자 개수에 따른 비트 오류 확률 성능

Fig. 5. Bit error probability versus average number of photons per symbol performance for different numbers of decoding iterations.

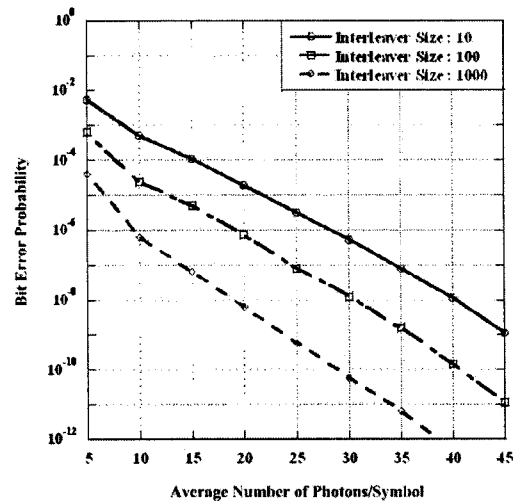


그림 6. 다양한 인터리버 길이에 대하여 심볼당 평균 광자 개수에 따른 비트 오류 확률 성능

Fig. 6. Bit error probability versus average number of photons per symbol performance for different interleaver sizes.

그림 8은 심볼당 평균 광자 개수에 따른 비트 오류 확률 성능을 MAP과 Max-Log-MAP 및 SOVA의 터보 복호 알고리즘에 따라서 비교하였다. 실험에서 다중 사용자 수는 10명, 인터리버 길이는 100, 평균 잡음 광자 개수는 50, 반복 복호 회수는 8회, 광 직교 부호의 weight은 5, 광 직교 부호의 길이는 500으로 설정하였다. 예상한 바와 같이 MAP 복호 알고리즘이 세 가지 알고리즘들 중에서 가장 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 하지만 심볼당 평균 광자 개수가 증가할수록 MAP 복호 알고리즘과 Max-Log-MAP 복호 알고리즘의 성능 차이는 점차 감소하여 무시할 수 있을 정도가 되는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 시스템 성능과 복잡도를 모두 고려한다면 터보 복호 알고리즘으로 MAP 알고리즘보다는 Max-Log-MAP

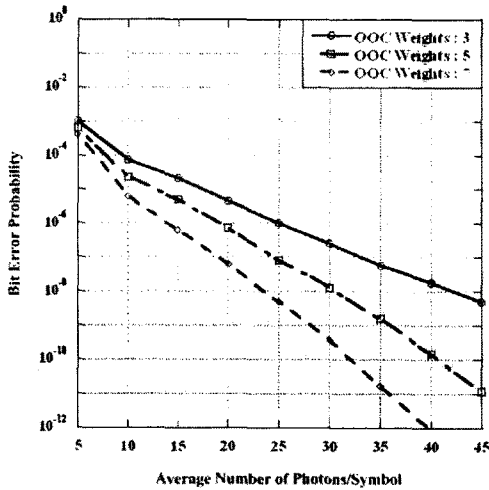


그림 7. 다양한 광 직교 부호 weight에 대하여 심볼당 평균 광자 개수에 따른 비트 오류 확률 성능
 Fig. 7. Bit error probability versus average number of photons per symbol performance for different OOC weights.

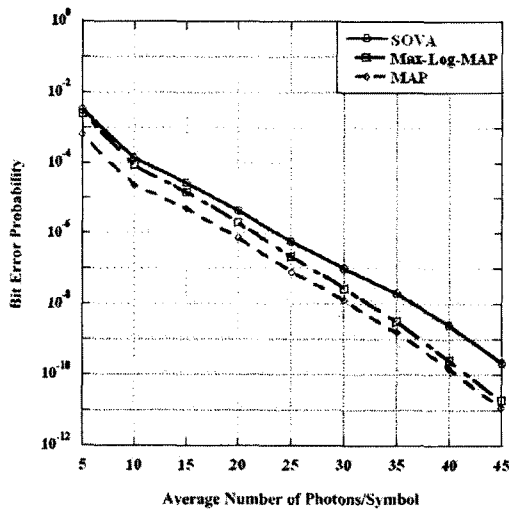


그림 8. 다양한 터보 복호 알고리즘에 대하여 심볼당 평균 광자 개수에 따른 비트 오류 확률 성능
 Fig. 8. Bit error probability versus average number of photons per symbol performance for different turbo decoding algorithms.

알고리즘을 선택하는 것이 전체적으로 봤을 때 더 효율적인 선택임을 결론지을 수 있다. 그리고 기본적으로 MAP 복호 알고리즘은 비트 오류 확률을 최소화 시키는 알고리즘인데 반해 SOVA 복호 알고리즘은 시퀀스 오류 확률을 최소화 시키는 알고리즘이므로, 비트 오류 확률 성능은 SOVA 알고리즘 보다는 MAP 알고리즘이 더욱 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 터보 부호화된 광 부호분할 다중접속 시스템의 성능을 분석하였다. 광 부호분할 다중접속 시스템은 펄스 위치 변조 방식을 사용하고, 광 채널에서는 강도 변조/직접 검파하는 시스템으로 설정하였다.

모의 실험 결과로부터, 터보 부호화는 어느 정도의 부호화 및 복호화 복잡도 증가가 있기는 하지만 상당한 부호화 이득을 제공하는 것을 확인하였다. 따라서 이 부호화 이득으로 인하여 광통신에 필요한 레이저 펄스 전력을 줄일 수 있고, 광통신 시스템의 기대 수명을 어느 정도 연장시킬 수 있다. 또한 고정된 부호화율에서 인터리버의 길이를 증가시킬수록 시스템 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 부호기와 복호기의 구조를 변형하여 메모리 크기를 증가시키면, 복호 복잡도가 증가하지만 시스템 성능을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다. 게다가, 터보 부호화 과정에서 반복 복호 회수를 증가하면 시스템 성능이 향상되었고, Max-Log-MAP 복호 알고리즘이 시스템 성능과 복잡도를 모두 고려할 때 적절한 선택임을 확인하였다.

본 논문의 결과는 광 부호분할 다중접속 네트워크에서 터보 부호를 사용하는데 활용될 수 있고, 위성 방송 시스템을 구현하는데 적용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2007-S-029-03, 가정용/기업용 WiBro 시스템 기술 개발]

[참고 문헌]

- [1] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting code: turbo codes," in *Proc. of IEEE ICC'93*, pp. 1064, 1070, Geneva, Switzerland, June 1993.
- [2] E. K. Hall and S. G. Wilson, "Design and analysis of turbo codes on Rayleigh fading channels," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, no. 2, pp. 160-174, Feb. 1998.
- [3] A. R. Forouzan, M. N. Kenari, and N. Rezaee, "Frame time-hopping patterns in multirate optical CDMA networks using conventional and multicode schemes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 5, pp. 863-875, May 2005.
- [4] C. Argon and S. W. McLaughlin, "Optical OOK-CDMA and PPM-CDMA systems with turbo product codes," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 20, no. 9, pp. 1653-1663, Sep. 2002.
- [5] G. Bosco, G. Montorsi, and S. Benedetto, "Soft decoding in optical systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 8, pp. 1258-1265, Aug. 2003.
- [6] J. W. Lee, R. L. Urbanke, and R. E. Blahut, "Turbo codes in binary erasure channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 54, no. 4, pp. 1765-1773, Apr. 2008.
- [7] A. Mahran and M. Benaissa, "Iterative decoding with a hamming threshold for block turbo codes," *IEEE Commun. Lett.* vol. 8, no. 9, pp. 567-569, Sep. 2004.



이 재 선

2008년 광운대학교 전파과 졸업
2008년~현재 광운대학교 전파과 석사과정
<관심분야> 채널코딩, 전력선 통신, OFDM
<e-mail> abalani@naver.com



김 요 철

2009년 광운대학교 전파공학과 졸업
2009년~현재 광운대학교 전파공학과 석사과정
<관심분야> 전력선통신, 디지털통신, MAC
채널 부호화,
<e-mail> yocheolkim@kw.ac.kr



이 병 무

2006년 미국 University of califonia, Irvine
(공학박사)
2007년 미국 University of califonia, Irvine,
Research Specialist
2007년~현재 KT중앙연구소 무선기술담당 과장
<관심분야> 무선통신, 비선형 신호처리, 최적화

<e-mail> blee@kt.com



김 진 영

1998년 서울대 전자공학과 (공학박사)
2000년 미국 Princeton University, Research
Associate.
2001년 SK텔레콤 네트워크 연구원 책임연구원
2001년~현재 광운대학교 전파공학과 부교수

2009년 현재 미국 M.I.T 공대 Visiting Scientist

<관심분야> 디지털 통신, 신호처리, 채널 부호화

<e-mail> jinyoung@kw.ac.kr