

# 이중 이진 터보 부호화된 펄스 위치변조-시간도약 초광대역 무선 통신 시스템의 성능 분석

## Performance Analysis of Double Binary Turbo Coded PPM-TH UWB Systems

김은철\*, 곽도영\*\*, 박재성\*, 김진영\*  
 (Eun Cheol Kim\*, Do-Young Kwak\*\*, Jae Sung Park\*, and Jin Young Kim\*)

**Abstract :** In this paper, performance of a double binary turbo coded ultra wide band (UWB) system is analyzed and simulated in an indoor wireless channel. Binary pulse position modulation-time hopping (BPPM-TH) signals are considered. The indoor wireless channel is modeled as a modified Saleh and Valenzuela (SV) channel. The performance is evaluated in terms of bit error probability (BER). From the simulation results, it is seen that double binary turbo coding offers considerable coding gain with reasonable encoding complexity. It is also demonstrated that the performance of the UWB system can be substantially improved by increasing the number of iterations.

**Keywords:** Double binary turbo code, modified Saleh and Valenzuela (SV) channel model, pulse position modulation-time hopping signal, ultra wide band system.

### I. 서론

초광대역 무선통신 기술은 매우 넓은 주파수 대역을 사용하면서도 기존의 주파수 대역에 할당된 시스템에 간섭을 일으키지 않고, 수백 Mbps 이상의 속도로 데이터를 전송할 수 있는 기술이다 [1-3]. 하지만 초광대역 무선통신 시스템은 무선 채널을 사용하므로, 송·수신기 사이에 정보를 전송하는 도중에 잡음이나 간섭 신호 및 다중경로 페이딩 등에 의해 정보를 손실할 수 있다. 따라서 무선통신 시스템의 신뢰도를 높여서 무선 채널 상에서 오류가 발생하더라도 수신기가 이를 검파하고 정정할 수 있는 기술이 필요한데, 이 기술 중 하나가 채널 부호화 기술이고, RS (Reed-Solomon) 부호, 콘볼루션 (convolutional) 부호 등 여러 부호화 기술이 있다 [4-5].

특히 1993년 Berrou 등에 의해 제안된 터보 (turbo) 부호는 Shannon의 한계에 가까운 매우 우수한 오류 정정 능력을 가지고 있어서 [6], WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) 및 CDMA2000의 3세대 이동통신 시스템에서 오류정정 부호 표준으로 채택되었다 [7-8]. 또한 터보 부호의 구조를 변형하여 오류 정정 성능을 향상시킨 이중 이진 터보 부호 (double binary turbo code)가 제안되었다 [9-10]. 기존의 터보 부호는 한번에 한 개의 비트를 부호기에 입력하였는데, 이중 이진 터보 부호는 두 개의 비트를 입력하도록 설계되었다. 그 결과 이중 이진 터보 부호는 부호어 사이의 최소 거리 (minimum distance)가 증가하여 복호 성능이 향상되고 처리량 (throughput)이 높아져 복호 처리 시간이 감소하는 장점을 가진다. 따라서 이중 이진 터보 부호를 초광대역 무선통신 시스템의 채널 부호로 적용하면 부호화 이득으로 인한 성능 향

상을 예상할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 실내 다중경로 무선채널에서 이중 이진 터보 부호화된 초광대역 무선통신 시스템의 성능을 분석하였다. 이 때 초광대역 무선통신 시스템의 변조 방식은 이진 펄스 위치 변조 (BPPM : Binary Pulse Position Modulation)를 사용하고, 대역 확산 방식은 시간 도약 (TH : Time Hopping) 방식을 사용하는 시스템을 고려하였다. 실내 무선채널은 변형된 SV (modified Saleh and Valenzuela) 채널 [11]로 모델링 되었으며, 시스템 성능은 비트 오류 확률 (BER : Bit Error Rate) 측면에서 분석되었다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제 II 장에서는 초광대역 무선통신 시스템 모델, 실내 무선 채널 모델, 및 이중 이진 터보 부호화/복호화에 대하여 제시하였다. 제 III 장에서는 본 논문에서 사용한 복호화 알고리즘인 Max Log-MAP 알고리즘에 대해서 간략히 소개하고, 모의 실험 결과를 제 IV 장에서 제시하였다. 마지막으로 제 V 장에서는 본 논문의 결론을 제시하였다.

### II. 시스템 모델

#### 1. 초광대역 무선통신 시스템 모델

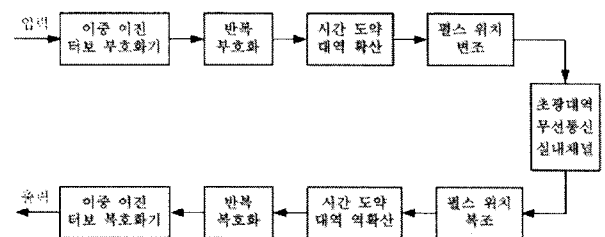


그림 1. 이중 이진 터보 부호화된 펄스 위치변조-시간도약 초광대역 무선통신 시스템 모델.

Fig. 1. Double binary turbo coded PPM-TH UWB system model.

그림 1은 이중 이진 터보 부호화기를 가진 펄스 위치변조-시간도약 초광대역 무선통신 시스템을 나타낸다. 우선 입력

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 20xx. x. x., 채택확정 : 200x. x. xx.

김은철 : 광운대학교 전자공학과

(eun6210@kw.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 핵심기술개발 사업의 일환으로 수행하였음. [2007-S-029-02, 가정용/기업용 WiBro 시스템 기술개발]

데이터는 이중 이진 터보 부호화기에 의해 부호화 된 후, 반복 부호화기에 입력된다. 이 반복 부호화기의 반복 횟수는 초광대역 무선통신 시스템의 단위 비트당 펄스의 개수와 관계가 있다. 다음으로 시간 도약 부호에 의해 대역 확산이 된 후, 펄스 위치 변조기에 의해 변조된다. 펄스 변조된 신호는 펄스 성형 필터를 거쳐서 송신된다.

수신기에 수신된 신호는 펄스 위치 복조되는데, 이 때 최대 크기의 출력을 나타내는 위치가 송신된 심볼을 포함하는 위치로 선택된다. 이 검파 과정을 거친 후, 송신기에서 사용한 시간 도약 부호와 동일한 부호를 이용하여 대역 역확산을 한다. 다음으로 반복 복호화를 한 후 이중 이진 터보 복호화기를 통하여 송신된 신호를 추정하게 된다.

2. 채널 모델

본 논문에서는 IEEE802.15.SG3a 에서 초광대역 무선통신 시스템의 채널 모델로 선택한 변형된 SV (Saleh and Valenzuela) 모델을 실내 무선 채널 모델로 선택하였다 [11].

이산 시간 다중경로 채널 충격 응답은 식 (1)과 같다.

$$h(t) = X \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^{K(n)} \alpha_{nk} \delta(t - T_n - \tau_{nk}) \quad (1)$$

여기서  $\alpha_{nk}$  는  $n$  번째 클러스터의  $k$  번째 다중 경로 계수이다.  $T_n$  은  $n$  번째 클러스터의 도착 시간을 나타내며,  $\tau_{nk}$  는  $n$  번째 클러스터의  $k$  번째 다중 경로에 대한 지연을 나타낸다.  $N$  은 관찰된 클러스터의 개수를 나타내고,  $K(n)$  은 클러스터에 수신된 다중경로의 개수를 나타내며,  $X$  는 채널이 진폭 이득을 나타내는 로 그노말 랜덤 변수이다.

3. 이중 이진 터보 부호화/복호화

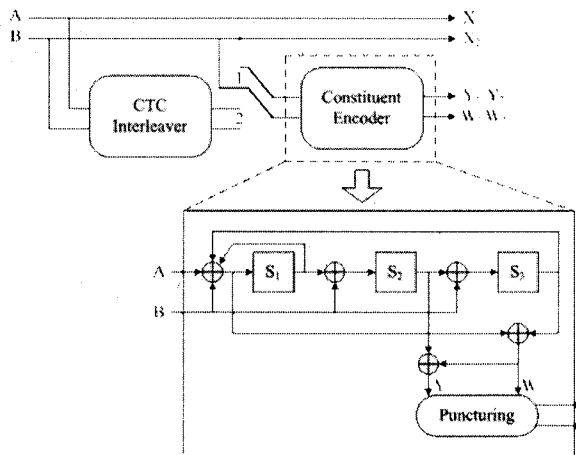


그림 2. 이중 이진 터보 부호의 부호화기 구조.  
Fig. 2. Encoder structure of double binary turbo code.

그림 2는 이진 이중 터보 부호화기 구조를 나타낸다 [9-10]. 여기서  $S_1, S_2, S_3$  는 각각 쉬프트 레지스터를 나타낸다. 이진 이중 터보 부호화기는 선형 케환 쉬프트 레지스터의 입력으로 단위시간당 두 개의 비트를

공급한다. 즉 두 개의 연속된 이진 비트들을 하나의 2-비트 심볼 ( $A, B$ )로 형성한 후 부호화를 수행한다. 이 때 constituent 부호화기는 콘볼루션 부호화 기법을 사용한다. 정보 블록  $N$  비트의 입력은  $N/2$  비트로 구성된  $A, B$  서브 블록으로 나뉜다. 부호기에서 입력  $A, B$  서브 블록은 출력  $A, B, Y_1, W_1, Y_2, W_2$  서브 블록을 생성하고 각 서브 블록은  $N/2$  비트로 구성되어 있다. 따라서 평치량을 거치지 않은 이중 이진 터보 부호는 1/3의 부호율을 갖는다. 출력에서  $A, B$  서브 블록은 정보 비트가 그대로 출력되는 systematic 부호화의 결과이고,  $Y_1$  과  $W_1$  서브 블록은 정보 비트를 이중 이진 구조의 케환형 콘볼루션 부호기를 통과시킨 후 생성된 패리티 비트이고,  $Y_2$  과  $W_2$  는 인터리버를 거친 정보 비트를 이중 이진 구조의 케환형 콘볼루션 부호기를 통과시킨 후 생성된 패리티 비트이다.

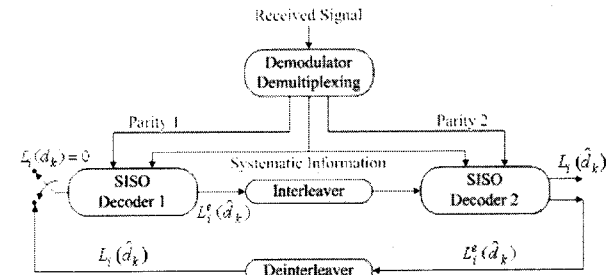


그림 3. 이중 이진 터보 부호의 복호화기 구조.  
Fig. 3. Decoder structure of double binary turbo code.

그림 3은 이중 이진 터보 부호의 복호화기를 나타낸다 [12]. 터보 복호기에서는 연속된 입력 비트들이 Trellis Mux를 통하여 정보 비트와 패리티 비트로 구분된다. 그리고 정보 비트와 패리티 비트가 이전의 SISO (Single Input Single Output) 복호기에 의해 발생된 사전 정보값과 함께 복호화 과정에 이용된다. 그리고 복호화된 결과가 이전의 복호화된 결과 값과 비교된 후 추가 부가 정보들을 이용하여 복호화를 반복하여 결과값에 대한 신뢰도를 증가시킨다. 일정 회수만큼 반복 복호화된 결과값은 경관정을 거쳐서 최종값으로 결정된다.

III. 복호화 알고리즘

본 논문에서는 시스템의 계산의 복잡성을 줄이고, 처리량을 높이며, 전력 소모를 줄이기 위해서 이중 이진 터보 부호에 대해서 복호화 알고리즘으로 Max-Log-MAP 알고리즘을 고려하였다.

먼저 식 (5)의 로그 스케일의 branch 천이 확률을 계산한다.

$$\bar{\gamma}_k^i(S_{k-1}, S_k) = \ln \gamma_k^i(S_{k-1}, S_k) = \ln p(y_k | d_k) P(d_k) \quad (5)$$

여기서  $S_k$  는 시간  $k$  에서 레지스터의 상태를 나타내고,  $y_k$  는 수신된 심볼을 나타내며,  $d_k$  는 정보 심볼을 나타낸다. [12]에 나타난 바와 같이 식 (5)의 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{\gamma}_k(S_{k-1}, S_k) &= \frac{1}{2} L_C [y_k^{s,I} x_k^{s,I}(i) + y_k^{s,Q} x_k^{s,Q}(i)] + \ln P(d_k) + K \\ &= \frac{1}{2} L_C [y_k^{p,I} x_k^{p,I}(i, S_{k-1}, S_k) + y_k^{p,Q} x_k^{p,Q}(i, S_{k-1}, S_k)] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $y_k^{s,I}$ ,  $y_k^{s,Q}$ ,  $y_k^{p,I}$ ,  $y_k^{p,Q}$  는 각각  $I$  채널 및  $Q$  채널을 통하여 수신된 systematic 비트와 패리티 비트 값을 나타낸다. 그리고  $x_k^{s,I}(i)$ ,  $x_k^{s,Q}(i)$ ,  $x_k^{p,I}(i, S_{k-1}, S_k)$ ,  $x_k^{p,Q}(i, S_{k-1}, S_k)$  는 각각 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) constellation 에 맵핑된 코드워드 비트를 나타낸다. 또한  $K$  는 상수이다. 본 논문에서는 QPSK 변조방식을 사용하지 않고 PPM 변조 방식을 사용하였으므로  $I$  채널 및  $Q$  채널로 데이터를 전송하는 것이 없다. 따라서 이중 이진 터보 부호화를 적용할 수가 없다. 하지만 이중 이진 터보 부호화를 적용하기 위하여 부호화된 신호중  $I$  채널로 전송되는 신호를 홀수번째 비트로 하고  $Q$  채널로 전송하는 신호를 짝수번째로 비트로 하여 PPM 변조를 수행하였다.

다음으로 MAP 알고리즘에서 순방향 반복과 역방향 반복에 의해 생성된 값  $\alpha_k(S_k)$  와  $\beta_k(S_k)$  를 구하고 이의 최대 값을 구한다.

$$\overline{\alpha}_k(S_k) \approx \max_{S_{k-1}} [\overline{\gamma}_k(S_{k-1}, S_k) + \overline{\alpha}_{k-1}(S_{k-1})] \quad (7)$$

$$\overline{\beta}_{k-1}(S_{k-1}) \approx \max_{S_k} [\overline{\gamma}_k(S_{k-1}, S_k) + \overline{\beta}_k(S_k)] \quad (8)$$

그리고 로그 우도비를 계산한다.

$$L_i(d_k) = \ln \frac{\sum_{S_{k-1}, S_k} \gamma_k^i(S_{k-1}, S_k) \alpha_{k-1}(S_{k-1}) \beta_k(S_k)}{\sum_{S_{k-1}, S_k} \gamma_k^0(S_{k-1}, S_k) \alpha_{k-1}(S_{k-1}) \beta_k(S_k)} \quad (9)$$

여기서  $i=1, 2, 3$  이다.

마지막으로 식 (10)의 이전 복호기로부터 다음 복호기에 대한 심볼의 확률을 계산하여 최대값을 구한다.

$$L_i(d_k) = L_i^e(\hat{d}_k) = \ln \frac{P[d_k=i]}{P[d_k=0]} \quad (10)$$

$$\ln P[d_k=00] = -\max[0, L_1^e(\hat{d}_k), L_2^e(\hat{d}_k), L_3^e(\hat{d}_k)] \quad (11)$$

$$\ln P[d_k=01] = L_1^e(\hat{d}_k) - \max[0, L_1^e(\hat{d}_k), L_2^e(\hat{d}_k), L_3^e(\hat{d}_k)] \quad (12)$$

$$\ln P[d_k=10] = L_2^e(\hat{d}_k) - \max[0, L_1^e(\hat{d}_k), L_2^e(\hat{d}_k), L_3^e(\hat{d}_k)] \quad (13)$$

$$\ln P[d_k=11] = L_3^e(\hat{d}_k) - \max[0, L_1^e(\hat{d}_k), L_2^e(\hat{d}_k), L_3^e(\hat{d}_k)] \quad (14)$$

#### IV. 실험 결과

실험에서 사용한 이중 이진 터보 부호의 부호기는 8개의 상태를 가지고, 부호율은 1/3 이다. 그리고 부호기에 입력되는 데이터의 한 블록은,  $A$  서브 블록이 212비트,  $B$  서브 블록이 212비트로, 총 424비트이다. 초광대역 무선통신 시스템은 평균 송신 전력이 -30 dBm이고, 비트당 펄스의 개수를 1개로 하였다.

그림 4는 초광대역 무선통신 시스템에 이중 이진 터보 부호화를 한 경우, 펄스 에너지 대 잡음 에너지 ( $E_x/N_0$ )에 따른 비트 오류 확률을 다양한 반복 복호 (iteration) 횟수에 대해서

비교하였다. 부호화 되지 않은 경우와 비교할 때, 이중 이진 터보 부호화는 펄스 에너지 대 잡음 에너지가 증가할수록 상당한 부호화 이득을 제공하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이중 이진 터보 부호화는 실내 무선 채널에서 초광대역 무선통신 시스템의 성능을 향상시키는데 매우 효과적이다. 또한 반복 복호 횟수가 증가할 수록 부호화 이득이 증가하고 시스템 성능도 더욱 향상됨을 확인할 수 있다. 하지만 성능 증가 폭은 점점 감소하여, 반복 복호 횟수가 일정 수준 이상이 되면 더 이상의 부호화 이득이 증가하지 않음을 알 수 있다. 이는 충분한 반복 복호 후에는 소프트 정보가 더 이상 쓸모 없게 되기 때문이다.

그림 5는 시간 오프셋이 발생한 경우 다양한 복호 반복 횟수에서 펄스 에너지 대 잡음 에너지에 따른 비트 오류 확률을 나타낸다. 시간 오프셋은 20 ps와 40ps인 경우에 대해서 실험을 수행하였다. 실험 결과 이중 이진 터보 부호화는 시간 오프셋이 존재하더라도 펄스 에너지 대 잡음 에너지가 증가할수록 부호화 이득으로 인해 시스템 성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 하지만 시간 오프셋이 20ps 에서 40 ps로 증가할수록 성능 개선 정도는 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 시간 오프셋이 일정 수준 이상이 되면 펄스 위치 복조된 정보와 원래 정보와의 차이가 원 신호를 복원하지 못할 정도로 커지기 때문이다.

#### V. 결론

본 논문은 실내 무선 채널에서 이중 이진 터보 부호화된 펄스 위치변조-시간도약 초광대역 무선통신 시스템의 성능을 분석하였다. 성능 분석 결과 이중 이진 터보 부호화는 상당한 부호화 이득을 제공하는 것을 알 수 있었다. 그리고 일정 수준 이하의 시간 오프셋이 존재하는 상황에서도 시스템 성능을 개선할 수 있음을 확인하였다. 본 논문의 결과는 초광대역 무선통신 시스템을 구현하는데 적용될 수 있다.

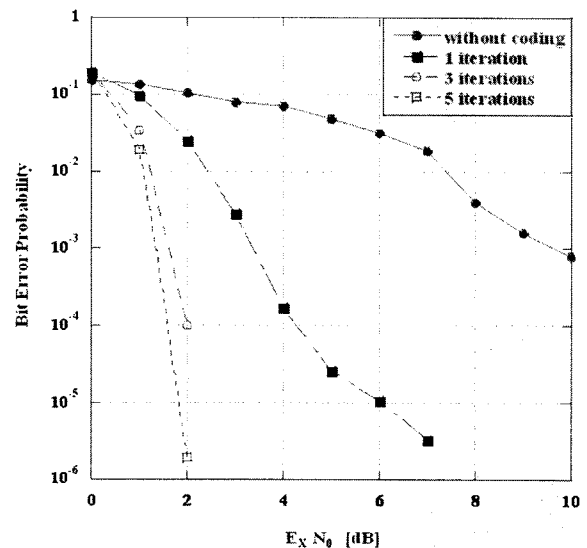


그림 4. 다양한 반복 복호 횟수에 대하여 펄스 에너지 대 잡음 에너지에 따른 비트 오류 확률.

Fig. 4. Bit error probability versus  $E_x/N_0$  for a different number of iterations.

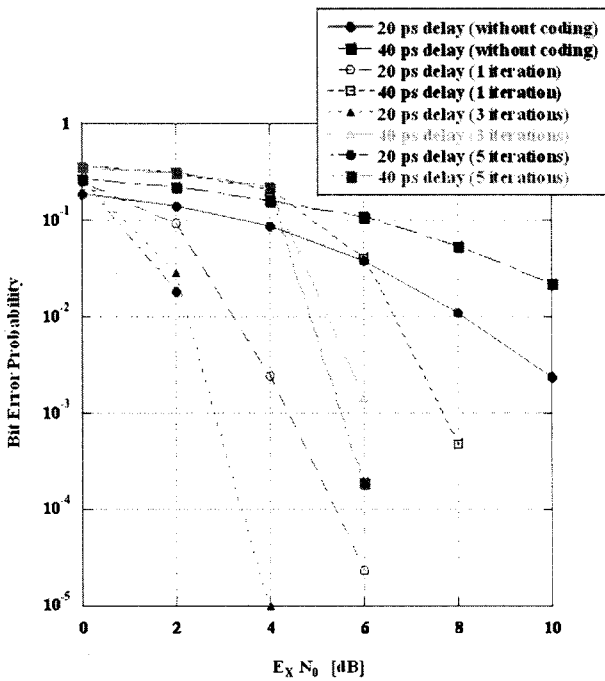


그림 5. 시간 오프셋이 존재하는 경우 펄스 에너지 대 잡음 에너지에 따른 비트 오류 확률.

Fig. 5. Bit error probability versus  $E_x/N_0$  with time offset.

참고문헌

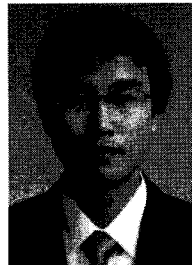
[1] K. Siwiak and D. McKeown, *Ultra-wideband radio technology*, John Wiley and Sons Ltd., 2004.  
 [2] Oppermann, M. Hamalainen, and J. Iinatti, *UWB theory and applications*, John Wiley and Sons Ltd., 2004.  
 [3] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Ultra-wide bandwidth

time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 4, pp. 679-689, Apr. 2000.

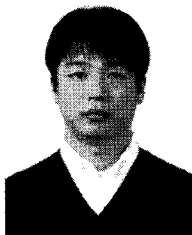
[4] S. Lin and D. J. Costello, *Error Control Coding*, Prentice Hall, 2004.  
 [5] S. B. Wicker, *Error Control Systems for Digital Communication and Storage*, Prentice Hall, 1995.  
 [6] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. 1," in *Proc. of IEEE ICC93*, Geneva, Switzerland, vol. 2, pp. 1064-1070, May 1993.  
 [7] 3GPP, [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org), TS36.212, v.1.3.0, 2007.  
 [8] 3GPP2, [www.3gpp2.org](http://www.3gpp2.org), C.S0002-D, v.2.0, 2005.  
 [9] C. Berrou, C. Douillard, and M. Jezequel, "Multiple parallel concatenation of circular recursive systematic convolutional (CRSC) codes," *Annals of Telecommun.*, vol. 54, no. 3-4, pp. 166-172, Mar. 1999.  
 [10] C. Douillard and C. Berrou, "Turbo codes with rate-m/(m+1) constituent convolutional codes," *IEEE Trans. On Commun.*, vol. 53, no. 10, pp. 1630-1638, Oct. 2005.  
 [11] IEEE 802.15.SG3a, "Channel modeling Sub-committee Report Final," *IEEE P802.15-02/490r1-SG3a*, Feb. 2003  
 [12] M. R. Soleymani, Y. Gao, and U. Vilaipornsawai, *Turbo Coding for Satellite and Wireless Communications*, Kluwer Academic Publishers, 2002.



**김 은 철**  
 2003년 광운대학교 전자공학부 (공학사). 2005년 광운대학교 전파공학과 (공학석사), 2005년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 이동통신, 디지털통신, 동기화.



**곽 도 영**  
 2006년 서울대 전기공학부 (공학박사). 2006년 ~ 현재 KT 인프라연구소 선임연구원. 관심분야는 WiBro 펌토셀, MIMO, 통신 채널.



**박 재 성**  
 2008년 광운대학교 전자공학부 (공학사). 2008년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 MIMO, 채널 부호화, 동기화.



**김 진 영**  
 1998년 서울대 전자공학과 (공학박사). 1998년 ~ 2000년 미국 Princeton University, Research Associate. 2000년 ~ 2001년 SK텔레콤 네트워크 연구원 책임연구원. 2001년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 교수. 관심분야는 디지털 통신, 신호처리, 채널 부호화.