

논문 2009-6-4

SC-FDMA 시스템을 위한 적응형 스위칭 등화기법

Adaptive Switching Equalization for SC-FDMA System

김주찬*, 배정남*, 김진영*

Joo-Chan Kim, Jung-Nam Bae, Jin-Young Kim

요 약 본 논문에서는 SC-FDMA 시스템을 위한 적응형 스위칭 등화기를 제안하고 성능을 분석하였다. SC-FDMA 시스템이 OFDM과 상당히 비슷한 구조를 가지고 있는 것은 잘 알려져 있다. 더군다나, SC-FDMA 시스템은 OFDM에 비해서 낮은 PAPR을 갖는 장점이 있다. 그러나 이 시스템은 다중경로 페이딩 또는 증가된 채널 응답 등과 같은 무선채널의 특성에 의해 성능이 열화 될 수 있다. 이러한 영향을 줄이기 위해서는 효율적인 적응형 등화기가 요구된다. 따라서 제안된 시스템에서는 낮은 이동속도에서는 ZF 등화기를 그리고 높은 이동속도에서는 MMSE 등화기를 사용하는 스위칭 모드로 운용이 되도록 설계하였다. 모의실험 결과로부터 제안된 기법이 시스템 복잡도 측면에서 효과적인 성능을 보임을 확인하였다. 따라서 제안된 시스템은 향후 3GPP LTE의 상향링크 설계에 응용이 될 수 있으리라 기대한다.

Abstract In this paper, we proposed and analyzed the performance of the adaptive switching equalization for SC-FDMA system. It is well known that SC-FDMA system have a fairly similar structure to OFDMA system. Furthermore, SC-FDMA system has great advantage of low PAPR compare to OFDM system. However, this system often suffers from wireless channel characteristics such as multipath fading and increased channel impulse response and so on. To reduce this channel influence, it strongly requires efficient adaptive equalization. Therefore, the proposed system operated upon two modes namely, ZF mode for slow speed and MMSE mode for high speed. From the simulation results, we can confirm that the proposed scheme has more efficient performance from the system complexity point of view. So we can expect that the proposed system will be applied design of 3GPP LTE uplink.

Key Words : 3GPP-LTE, SC-FDMA, OFDM, FDE, Equalization

I. 서 론

이동통신 시스템이 본격적으로 상용화 서비스를 시작한 이래 이동통신 관련 기술은 진화에 진화를 거듭해 왔다. 1세대의 아날로그 이동통신에서 1990년대 중반에 이르러 2세대의 디지털 이동통신 시대가 열렸으며 이후, 미국과 유럽의 양대 표준으로 나누어 각 진영의 전략에 따라 EVDO 및 WCDMA로의 3세대 이동통신으로 진화해 왔다.

IMT-Advanced로 망명된 4세대 이동통신에서는 유무선과 다양한 무선접속 기술 간의 융합과 정지 상태에서 최대 데이터율을 1Gbps 정도까지 지원하고 높은 이동 환경에서는 최대 데이터율을 100Mbps 이상 지원하는 것을 목표로 기술개발을 진행하고 있다.

최근 이동통신시스템 분야의 표준화 단체는 크게 3GPP 주도의 LTE (Long Term Evolution)와 3GPP2 주도의 UMB (Ultra Mobile Broadband) 그리고 IEEE 주도의 WiMAX로 나누어 볼 수 있다. 하지만 2008년 하반기에 퀄컴의 UMB 개발의 포기 선언으로 4G 이동통신 기술은 사실상 LTE와 WiMAX로 양분된 상황이다. 더군다

*정회원, 광운대학교 전자공학과
접수일자 2009.10.6, 수정일자 2009.11.3

나 미국의 CDMA 기반 이동통신 사업자인 Verizon과 멕시코의 Movistar, 북미의 AT&T와 영국의 Vodafone 등 세계적 메인 이동통신 사업자들이 거의 LTE 진영에 섰고, 한국의 경우도 세 이동통신 사업자 중 SKT와 KT는 WCDMA나 HSPA의 LTE계열 기반이기 때문에 향후 4세대 이동통신시스템의 표준으로 LTE가 유리한 입장에 있다고 볼 수 있다.

4G를 위한 핵심기술을 살펴보면 3GPP-LTE와 IEEE의 WiMAX 모두 OFDMA (Orthogonal Frequency Domain Multiple Access) 기반의 기술을 바탕으로 하고 있음을 알 수 있다. 특이한 것은 3GPP-LTE의 상향링크에서 OFDMA와 비슷한 SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Domain Multiple Access)을 채택한 것인데, 이는 OFDM 기반 전송에 있어서 문제가 되는 PAPR (Peak to Average Power Ratio)을 줄임으로써 단말이 가지는 전력 부담을 최소화하기 위한 것으로 볼 수 있다^[1].

본 논문에서는 3GPP-LTE의 상향링크 표준인 SC-FDMA 시스템을 위한 적응형 스위칭 등화기를 제안하고 성능을 실험하였다. Single Carrier 기반의 통신 시스템은 OFDM에서와 같은 PAPR 문제가 없지만 상대적으로 무선채널의 상태에 따른 영향을 크게 받기 때문에 이를 위한 효율적인 적응형 등화기가 요구된다.

본 논문의 구성은 II장에서 SC-FDMA 시스템을 설명하고 III장에서 제안된 적응형 스위칭 등화기를 논한 다음, IV장에서 모의실험 결과를 설명하고 V장에서 결론을 맺는 구성을 따른다.

II. SC-FDMA 시스템

1. SC-FDE 시스템

3GPP LTE의 상향링크에 적용되는 SC-FDMA 기술은 SC-FDE (Single Carrier-Frequency Domain Equalization) 기반의 시스템이다. 따라서 SC-FDMA를 이해하기 위해 먼저 SC-FDE 시스템의 구조 및 특성을 알 필요가 있다.

이동통신 시스템이 점점 빠른 데이터율을 요구함에 따라 전송시스템은 OFDM 기반의 방식으로 진화를 해왔는데, 이는 OFDM 시스템이 더 많은 데이터를 더 긴 심벌구간을 가지더라도 병렬 전송의 특성으로 인하여 더

많은 데이터를 전송시킬 수 있고, 따라서 무선채널에 강한 특성을 가지기 때문이었다^[2]. 일반적으로 Single Carrier 방식에서는 광대역 다중경로 무선 채널을 거치면 시간 영역에서 매우 긴 채널 임펄스 응답을 갖기 때문에 시스템의 복잡도가 선형적으로 증가하게 되어 구현이 불가능하였다. 그러나 Single Carrier 방식의 전송기법도 주파수 영역에서 등화기를 거치면 OFDM 방식과 비교하여 비슷한 성능을 보일뿐만 아니라 신호 처리면에서도 낮은 복잡도를 가지며 OFDM에서와 같이 파워 앰프의 비선형으로 인한 문제를 갖지 않기 때문에 시스템 구현 측면에서 낮은 가격의 앰프를 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다^[3].

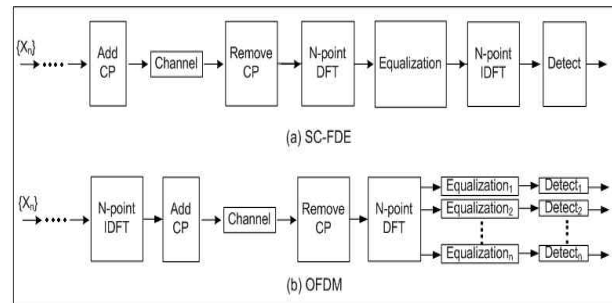


그림 1. SC-FDE와 OFDM의 전송구조
Fig. 1. Block-diagram for SC-FDE and OFDM.

그림 1은 SC-FDE와 OFDM의 전송구조를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 SC-FDE 시스템은 수신 신호를 DFT하여 주파수 영역으로 변환시킨다. 그리고 그 결과를 주파수 영역에서 그대로 등화시킨다. 다시 IDFT 변환을 거쳐 신호는 시간 영역으로 변환되는 과정을 거친다. OFDM 전송구조를 살펴보면 두 시스템이 상당히 유사하다는 것을 알 수 있다. 주목할 것은 OFDM의 경우 데이터 검출을 주파수 영역에서 부분송파 당 수행하는 것이고, 반면에 SC-FDE의 경우엔 시간영역에서 추가적인 IDFT를 거친 후 수행 된다는 것이다. 이 차이점으로 인하여 OFDM 전송 시스템은 채널 주파수 특성에 더욱더 민감하여 채널 코딩 등의 도움이 필요해진다^[4].

2. SC-FDMA 시스템

SC-FDMA 시스템은 단일 반송파 기반의 전송시스템으로써 주파수 영역의 등화기를 수반하는 SC-FDE 시스템을 다중 사용자 접속을 지원하기 위하여 확장한 시스

템이다. 3GPP-LTE 시스템의 상향링크에서는 전송 기법으로 SC-FDE를 부반송파 분할 방식으로 확장한 SC-FDMA 기술을 채택하였다. SC-FDMA 기술은 송신단 변조과정에서 IFFT를 입력 전에 사용자 별로 FFT 처리과정을 수행하고, 수신단 복조과정에서 FFT 출력신호를 IFFT 처리함으로써 상향링크 송신단에서 발생할 수 있는 PAPR을 최소화하여 단말의 전력소모를 줄인다. 이외에 SC-FDMA 심벌은 CP (Cyclic Prefix)를 삽입하여 ISI (Inter Symbol Interference)를 방지하는 것은 동일하다. LTE 상향링크에서는 7개의 심벌이 모여 하나의 슬롯을 구성하는 normal CP와 6개의 심벌이 모여 하나의 슬롯을 구성하는 extended CP인 두 가지 종류의 CP 길이를 채택하고 있다. 그림 2는 SC-FDMA 기법을 사용하는 3GPP-LTE 상향링크 송·수신단의 구조를 나타내고, 그림 3은 OFDMA 전송시스템의 송·수신단 구조를 나타내고 있다. 그림2에서 보듯이 정보 메시지는 FFT를 거치면서 높은 PAPR 상태를 가지지만 다시 한 번 무선 채널로 송신되기 전에 IFFT를 거치면서 낮은 PAPR을 갖게 된다.

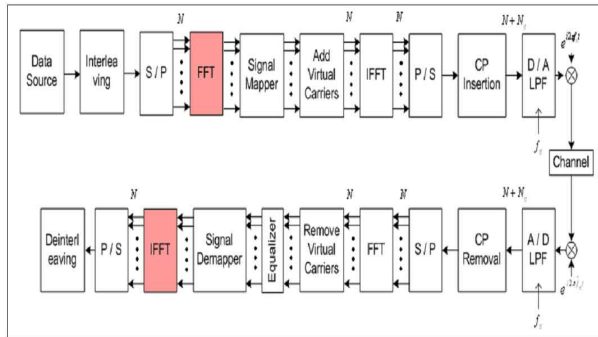


그림 2. SC-FDMA 송수신단 블록도
Fig. 2. Transceiver for SC-FDMA system.

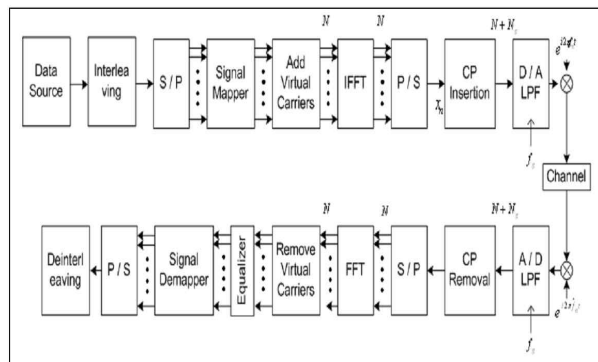


그림 3. OFDMA 송수신단 블록도
Fig. 3. Transceiver for OFDMA system.

그림 3과 비교하여 보면 SC-FDMA에서는 기존의 OFDM 송수신기 구조에 부가적으로 FFT를 한 번 더 처리 해 줌으로써 PAPR이 주파수 영역에서 증가했다가 IFFT를 거치면서 시간 영역에서 PAPR이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이렇게 PAPR이 증가되는 것을 방지함으로써 최종 송신 신호의 PAPR을 약 2~3dB 정도 줄이게 되는 것이다. 하지만 SC-FDMA에서는 ICI (Inter-Carrier Interference)가 증가되는 부담이 발생하고 이 증가된 ICI를 제거하기 위해서 수신단에서 복잡한 등화기와 같은 수신기의 설계가 필요해 진다^[5].

III. 적응형 스위칭 등화기 설계

그림 4는 주파수 영역 등화 기법을 나타낸다. 수신된 신호는 FFT를 통과하게 되고, 가중치 행렬을 곱한 후, IFFT에 의해 주파수 영역에서 등화된 신호를 다시 시간 영역 신호로 변환시킨다.

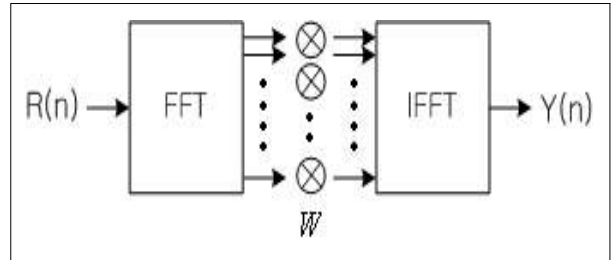


그림 4. 주파수 영역 등화기법
Fig. 4. Frequency domain equalization.

본 논문에서는 등화기법으로 ZF와 MMSE를 사용한다. ZF에 의해 주파수 영역 등화기의 가중치 행렬은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H \quad (1)$$

MMSE에 의한 가중치 행렬은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$W_{MMSE} = (H^H H + \sigma_z^2 I)^{-1} H^H \quad (2)$$

여기서 H^H 는 hermitian 전치 행렬이다. MMSE의

경우 잡음에 대한 사전정보인 σ_z^2 가 사용됨을 볼 수 있다. 일반적으로 ZF에 비해 MMSE가 더 좋은 성능을 보이는데, 이는 채널 이득행렬의 condition number가 클 경우 가중치를 곱할 때 발생하는 잡음 증폭이 MMSE의 경우가 ZF에 비해 적기 때문이다. 따라서 SNR이 낮아 잡음의 크기가 큰 경우 MMSE와 ZF의 성능 차이가 크고, SNR이 높아 잡음의 크기가 작을 경우 두 가지 기법의 성능이 유사하게 된다^[6].

따라서 본 논문은 SNR 및 속도에 따라 적합한 등화기법을 선택 수행할 수 있는 스위칭 기법을 제안한다. 3GPP-LTE는 이동성이 고려되는 환경으로 모바일의 속도가 증가하게 되면 도플러 효과가 커져서 에러가 증가하게 된다. 그러므로 속도가 느릴 때는 ZF을 사용하여 복잡성을 줄이고, 속도가 임계값 이상 올라가게 되면 MMSE를 사용해 성능을 올려주는 적응형 등화기법도 제안한다. 제안된 스위칭 기법은 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

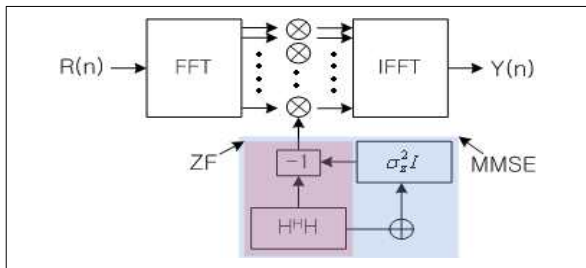


그림 5. 적응형 스위칭 등화기
Fig. 5. Adaptive switching equalization.

IV. 모의실험 및 결과

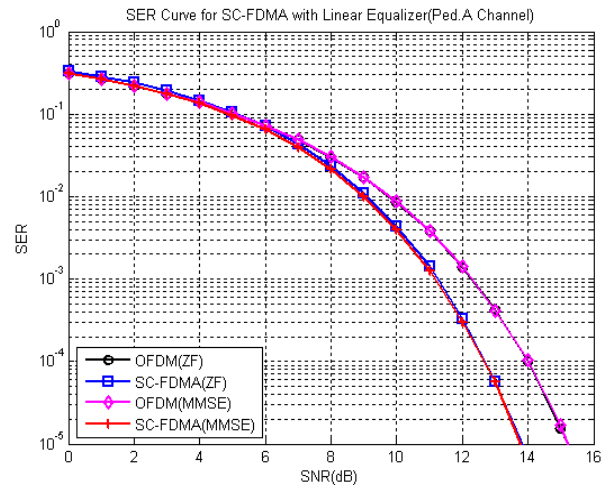
이번 장에서는 3GPP-LTE 상향링크 시스템에서 등화기법이 적용된 SC-FDMA의 성능을 모의실험을 통해 비교 분석한다. 모의실험을 위한 파라미터는 표 1과 같다. 채널 환경은 ITU의 Pedestrian A와 Vehicular A를 사용하였다^[7].

표 1. 모의실험 파라미터
Table 1. Simulation parameters.

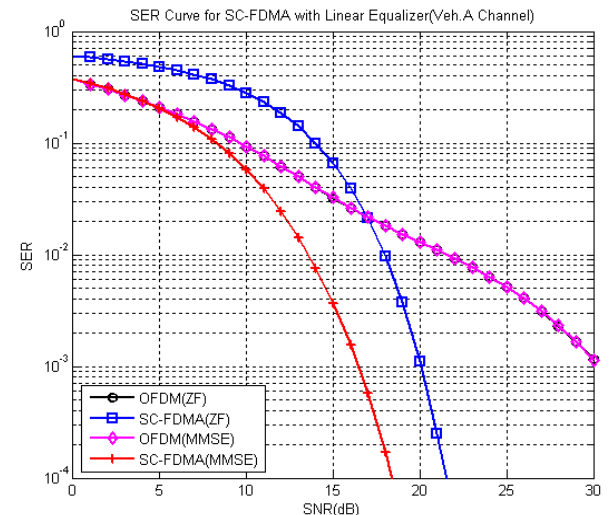
주파수 대역폭	10 MHz
FFT 사이즈	1024
유효 부반송파 수	600
채널 모델(ITU)	Ped.A, Veh.A

1. SC-FDMA 성능 분석

모의실험에서 다중접속 방식은 IFDMA를 고려하였다. 그림 6의 (a)는 Pedestrian A에서의 채널에서의 등화기 성능을 나타낸다. OFDM은 원-탭 등화기로 ZF, MMSE 기법의 성능이 동일하게 나타나고, SC-FDMA의 경우 MMSE 기법이 ZF 기법보다 약간 성능이 좋게 나올 수 있다. (b)는 Vehicular A 채널에서의 등화기 성능을 나타낸다. OFDM의 경우 원-탭 등화기로 두 기법의 성능이 동일하게 나타나고, Pedestrian A 보다 성능이 열화가 심함을 확인할 수 있다. SC-FDMA의 경우 MMSE 기법의 ZF 기법보다 3~4dB 정도 우수한 성능이 나온다.



(a) Pedestrian A (SNR : 0~16dB)



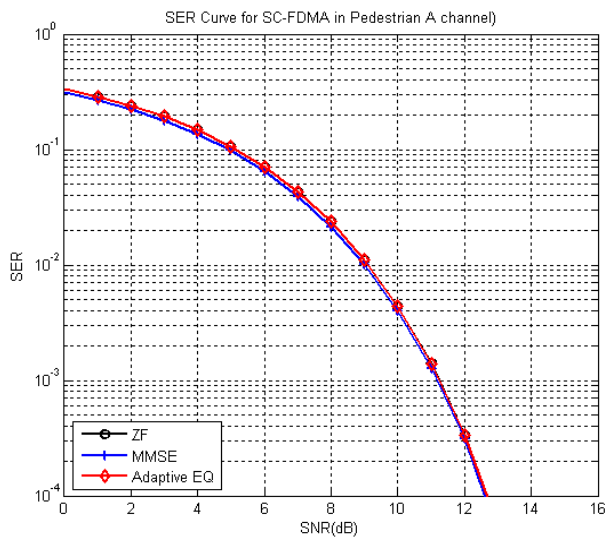
(b) Vehicular A (SNR : 0~30dB)

그림 6. 등화 기법이 적용된 SC-FDMA 성능
Fig. 6. Performance of SC-FDMA with equalization technique.

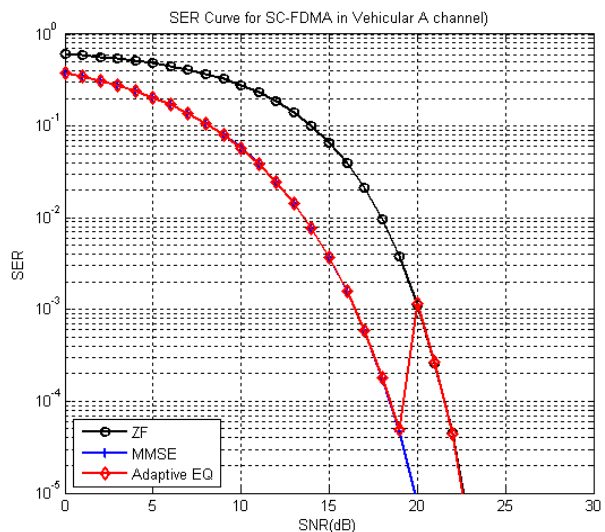
2. 적응형 스위칭 등화기법이 적용된 SC-FDMA 성능

모의실험에서 다중접속 방식은 IFDMA를 고려하였다. 그림 7의 (a)의 Pedestrian A 채널의 경우, 즉 모바일의 속도가 느릴 경우는 ZF 기법을 사용하여 등화를 하는 것이 복잡도 측면에서 효과적임을 알 수 있다.

그림 (b)의 Vehicular A 채널, 즉 모바일의 속도가 임계값 이상 증가할 경우는 적응형 스위칭 등화 기법을 사용하였다.



(a) Pedestrian A (SNR : 0~16dB)



(b) Vehicular A (SNR : 0~30dB)

그림 7. 적응형 등화 기법이 적용된 SC-FDMA 성능
Fig. 7. Performance of SC-FDMA with adaptive equalization technique.

SNR 10^{-3} 지점을 임계값으로 정하여, 그 이하에서는 MMSE 기법을 사용하여 채널로 인한 열화를 보상해주고, 임계값 이상에서는 ZF를 사용하여 복잡도를 낮추었다. 적응형 스위칭 등화기법을 적용하였을 경우 성능과 복잡도 측면에서 효과적임을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 3GPP-LTE 상향링크 SC-FDMA에서 적응형 스위칭 등화기법을 제안하였다. SC-FDMA 기술은 OFDMA 기술과 상당히 유사하나 송신신호의 PAPR을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 상대적으로 무선채널의 상태에 따른 영향을 크게 받기 때문에 이를 위한 효율적인 적응형 등화기가 요구된다. 3GPP-LTE는 이동성이 고려되는 환경으로 모바일의 속도가 증가하게 되면 도플러 효과가 커져서 성능의 열화가 발생한다. 그러므로 속도가 느릴 때는 ZF를 사용하여 복잡성을 줄이고, 속도가 임계값 이상 올라가게 되면 MMSE를 사용해 성능을 향상시킨다. 성능 분석 결과 제안된 기법을 사용할 경우 복잡성과 성능 측면에서 좋은 결과를 보였고, 3GPP-LTE 상향링크에서 효율적인 등화 알고리즘 설계에 활용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] 3GPP homepage: <http://www.3gpp.org>.
- [2] R. van Nee and R. Prasad, "OFDM for wireless multimedia communications", Artech House, 2000.
- [3] D. Falconer, S. L. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar, and B. Eidson, "Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems", IEEE Commun. Mag., Apr. 2002.
- [4] Hyung G. Myoung and David J. Goodman, "Single carrier FDMA", Wiley, 2008.
- [5] 이상근, 조봉열, 여운영, "3G/4G 이동통신 시스템", 홍릉과학출판사, 2008.
- [6] N. Al-Dhahir, "Single carrier frequency domain

equalization for space time block coded transmissions over frequency selective fading channels," IEEE communication Letters, vol. 5, no. 7, pp. 304-306, July 2001.

[7] 3GPP TS 25.101, User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD) (R7), Section B.2.2, Sep. 2007.

※ 본 연구는 2009년도 광운대학교 연구년의 결과로 수행되었음. (연구년: 2009년 3월-2010년 2월)

저자 소개

김 주 찬(정회원)



- 2009년~현재 광운대학교 전파공학과 박사과정
- <주관심분야 : RFID/USN 기술, 이동무선통신, 안테나 및 전파전파, 통방융합 기술>

배 정 남(정회원)



- 2009년 광운대학교 전파공학과 학사
- 2009년~현재 광운대학교 전파공학과 석사과정
- <주관심분야 : 디지털통신, 무선통신, 디지털 방송 전송 기술>

김 진 영(정회원)



- 1998년 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 2000년 미국 Princeton University, Research Associate
- 2001년 SK 텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
- 2001년~현재 광운대학교 전파공학과

부교수

- 2009년 현재 미국 MIT 공대 Visiting Scientist
- <주관심분야 : 디지털통신, 무선통신, 채널부호화>