
MIMO-OFDM 시스템에서 적응비트로딩 알고리즘의 성능평가

이민혁* · 변건식*

Performance Analysis of Adaptive Bitloading Algorithm in MIMO-OFDM Systems

Min-hyouck Lee* · Kuk-sik Byon*

요 약

고속데이터 전송이 요구되는 경우, OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 다중경로에 의해 발생되는 주파수 선택성 페이딩에 쉽게 대처할 수 있다는 장점 때문에 다양한 고속 무선 통신 시스템에 채택되어왔다. 본 논문에서는 최적의 적응 비트로딩 알고리즘을 제안하고, 이를 확인하기 위해 SISO(Single Input Single Output)-OFDM 시스템에 이 알고리즘을 적용하고 고정변조를 사용하는 SISO-OFDM과 비교 분석 하였다. 특히 다중 경로페이딩 채널에서 채널을 알고 있는 경우, MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템의 적응 비트로딩을 시험하기 위해, 특이치 분해(SVD : Singular Value Decomposition)를 사용하여 MIMO 채널을 SISO 채널로 병렬 분해하여, 제안한 적응비트로딩 알고리즘을 적용하였다. 시뮬레이션 결과, 적응 비트로딩 MIMO-OFDM 시스템은 SISO-OFDM 시스템 보다 BER 성능이 우수함을 확인하였다.

ABSTRACT

In the case of the requirement of high speed transmission, OFDM is a powerful technique employed in communications systems suffering from frequency selective fading. In this paper, we apply an optimal adaptive bitloading algorithm technique. The BER performance of the fixed-rate SISO and adaptive SISO is simulated. Specially, we can decompose the MIMO channel into the SISO channel by making use of the singular value decomposition(SVD) assuming channel knowledge in a multipath environment. As a results of simulation, we confirmed that the BER enhancement of MIMO-OFDM system with the bitloading algorithm was superior to the SISO-OFDM system.

키워드

OFDM, SISO-OFDM, MIMO-OFDM, SVD, 적응비트로딩

I. 서 론

무선 이동 통신은 다중로에 의한 주파수 선택성 페이딩으로 인해 성능이 열화될 수 있다. FDM(Frequency Division Multiplexing)은 주파수 선택성 채널에서의 신호 전송에

널리 사용되는 기술이었다. FDM은 채널 대역폭을 서브 채널로 분할해서, 각 신호를 별도의 반송파 주파수로 전송함으로써 저속의 다중 신호를 송신한다. 사용한 반송파는 수신기에서 신호를 쉽게 분리하기 위해 스펙트럼이 중첩되지 않도록 충분히 이격되어 있어야 한다. 더욱이 필

터로 신호를 분리하기 위해 신호 사이에 빈 스펙트럼 영역이 존재하여야 한다. 따라서 FDM 시스템은 스펙트럼 효율이 낮다. 이와 같은 스펙트럼 효율 문제를 해결하기 위해, 제안된 기술이 OFDM이다. OFDM은 신호를 변조하기 위해 직교 반송파를 사용한다[1]. 직교 반송파는 심볼 속도와 같은 주파수 간격으로 이격되어 있고 최적의 스펙트럼 효율을 제공하며, 수신기에서 분리할 수 있다 [2],[3].

적용 기술은 비적용 무부호화 기술보다 데이터 속도를 증가시키는 기술로 알려져 있으며, 적용 기술을 사용하는 송수신기는 채널을 미리 알고 있다고 가정한다. 채널을 알고 있을 때 송수신기는 성능을 개선할 수 있다. 즉, 임의의 비트(예 128 비트)가 N개의 직교 반송파로 변조되어 하나의 OFDM 심볼로 전송될 때, 전체적인 전송에 최소 에너지가 할당되도록 비트를 할당한다[4],[5]. 송수신 안테나를 한 개 사용한 OFDM 시스템을 SISO/OFDM이라 할 때, 데이터 속도를 증가시키는 또 다른 방법으로 MIMO/OFDM 기술이 있다. 그러나 MIMO/OFDM 기술은 각 서브 채널의 상태를 고려하지 않은 고정 변조를 사용하고, 같은 전력으로 전송함으로써 상태가 좋지 않은 서브 채널에서는 많은 오류가 발생하는 단점이 존재한다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해, 송수신기에서의 채널 정보는 미리 알고 있다고 가정하고, 적응 비트 로딩을 이용한 MIMO/OFDM 시스템을 제안하고 성능 분석을 한다.

II. 시스템구성도

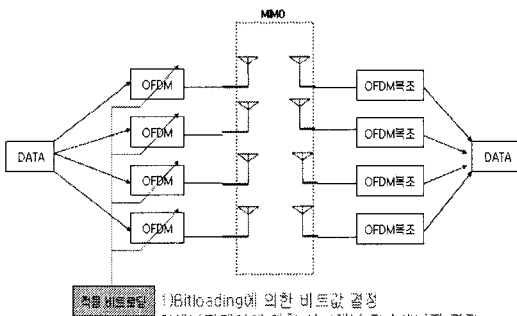


그림 1. MIMO-OFDM 시스템 구성도
Fig. 1 MIMO-OFDM system configuration

제안한 시스템 구성도는 그림 1과 같다. 다중의 송수신 안테나를 사용하여 MIMO 채널을 구성하고 송수신단에서 각각 OFDM 변복조를 한다. 먼저 채널은 미리 알고 있다고 가정하였으므로 임의로 생성한다. 이 때 채널들은 서로 간섭을 주도록 형성하지만 특이치 분해를 통해 대각 행렬만을 취함으로써 서로 다른 채널간의 간섭을 피해 MIMO 채널을 단순한 SISO 채널로 변환할 수 있다. 단 송수신기에서는 precoding을 하고 수신기에서는 펄스 성형을 하여야 한다. 채널을 특이치 분해한 후, 비트로딩 알고리즘에 의해 최소의 전송 에너지가 되도록 비트 할당과 에너지 할당을 하여 송신기로 제환한다. 송신기는 최적의 비트와 에너지를 할당 받아 최적으로 신호를 전송한다.

III. MIMO-OFDM 시스템

MIMO 시스템에서 서브채널의 전력제어는 스펙트럴 효율과 전력효율을 증가시키고자 할 때 중요하다. 일반적으로 주파수 선택성 채널에 대해, 고정된 송신 전력에서 샤는 용량을 달성하는 최적의 전송 기술은 waterfilling 기술[6]이다. 그러나, waterfilling 기술은 최적의 해를 만들지만 계산하기 어려워 실제로 구현하기 어려우므로, 본 논문에서는 MIMO-OFDM 시스템의 실제 성능을 특성화하기 위하여 적응 비트로딩 알고리즘을 사용한다. m 개의 송신 안테나와 n개의 수신 안테나를 사용하는 MIMO 시스템의 채널 응답은 크기 $m \times n$ 행렬로 표현할 수 있으며, 다음과 같다[5].

$$H(k) = \begin{bmatrix} H_{11}(k) & \dots & H_{1m}(k) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ H_{n1}(k) & \dots & H_{nm}(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 행렬 원소 $H_{j,k}$ 는 송신 안테나 k에서 수신 안테나 j까지의 채널 이득을 나타낸다. 송수신 단에서 채널 상태 정보를 완전히 알고 있다면 간단한 특이치 분해를 통하여 MIMO 채널을 병렬의 비간섭 SISO 채널로 분해할 수 있다.[4]. 본 논문에서는 채널의 상태 정보를 알고 있다고 가정하고 시스템을 설계하였고 채널정보를 이용하여 특이치 분해를 한 후 해석하였다[5]. 일반적으로 수신단에서만 채널정보를 알고 있는 경우에는 BLAST-OFDM 기법이 적절하지만, 송수신단에서 채널정보를 알 수 있는

경우에는 SVD를 한 OFDM 기법과 적응 비트로딩 방식을 결합하여 더욱 효율적으로 채널용량을 증가시킬 수 있다. i 번째 반송파의 순시 채널 행렬이 다음과 같은 특이치 분해를 가진다고 하자.

$$H_i = U_i S_i V_i^* \quad (2)$$

식 (2)에서 U_i, V_i 는 unitary 행렬이고, S_i 는 H_i 의 특이치 대각 행렬이다. 식 (2)와 같이 송신기에서 전송하기 전에 먼저 V_i 인 송신 precoding 필터를 사용하고, 수신기에 서 복조하기 전에 U_i^* 의 수신 성형 필터를 사용하면 안테나 간에 간섭이 있는 MIMO 채널을 독립적인 SISO 채널로 분리할 수 있다[1~3].

IV. 적응비트로딩 알고리즘

MIMO-OFDM 시스템에서 특이치 분해를 적용하여 분리한 병렬서브채널의 이득 정보는 알고 있으므로 전력과 전송률을 최적화 할 수 있다. 본 논문에서는 단지 6개의 정방형 MQAM 신호 좌표를 사용하였으며 좌표가 제한되지 않은 waterfilling 기술에 비해 매우 유사한 시스템 효율을 얻을 수 있다. 비트로딩 알고리즘은 서브채널 n 에서 전송하고자 하는 b 비트에 필요한 에너지의 양 $e_n(b)$ 를 최소화하는 것이며 다음 식(3)과 같다[5].

$$\text{최소화} \left(\sum_{n=1}^N e_n(b_n) \right) \quad \text{단,} \quad \sum_{n=1}^N b_n = B(\text{bits}) \quad (3)$$

B 는 할당할 총 비트 수이다.

그림2는 비트할당을 위한 초기화 과정을 나타내며, GAP는 튜닝 파라미터로 서브 채널의 에너지를 설정하는데 사용하며, GNR은 GAP으로 규정된 SNR값이다.

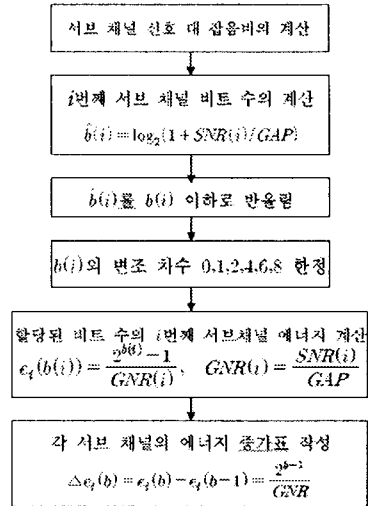
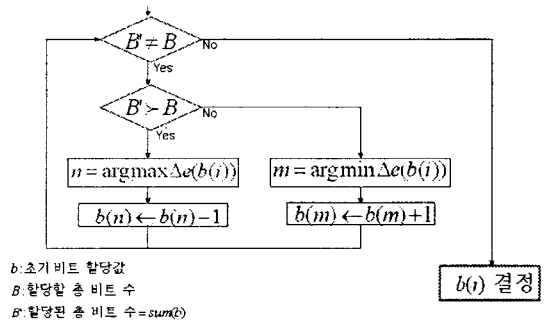


그림 2. 비트할당 알고리즘 순서도
Fig. 2 Bit allocation algorithm procedure

그림 3은 비트 할당에 의해 계산되어진 $b(i)$ 값을 이용하여 최종 검토과정을 나타낸 것이다. 각 서브채널마다 할당되어진 $b(i)$ 값의 합을 B' (할당된 총 비트수)로 나타내며 B 는 할당할 총 비트 수로서 하나의 안테나로 한 번의 전송 시 총 몇 비트를 전송 할 것인가를 나타내는 것이다.



b : 초기 비트 할당값
 B : 할당할 총 비트 수
 B' : 할당된 총 비트 수 = $\sum b(i)$

그림 3. 비트할당 최적화 방법
Fig. 3 Bit allocation optimization method

비트할당을 최적화하였다고 해도 초기에 할당한 비트 수와는 일치하지 않는 경우가 발생하며 이러한 경우 재 할당이 요구된다. 그림 4는 하나의 비트 위만이 있을 경우 수정해주는 알고리즘을 나타낸다.

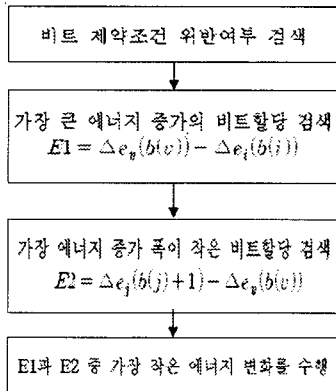


그림 4. 비트수 보정 및 재할당
Fig. 4 Bit number correction and bit re-allocation

위에서 설명한 세 가지 방법을 순차적으로 적용하여 주어진 주파수 선택 채널에 대한 비트로딩 절차가 완벽하게 수행되며 그림 5는 알고리즘의 적용사례를 나타낸 것이다.

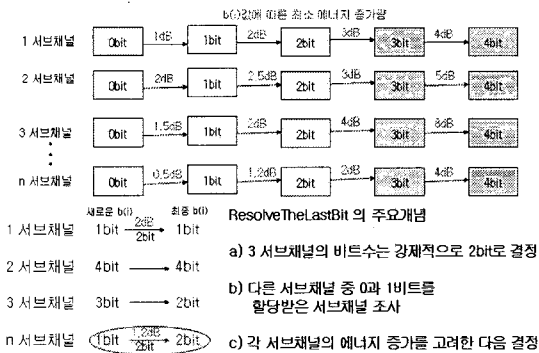


그림 5. 적응비트로딩 알고리즘 예제
Fig. 5 The example of adaptive bitloading algorithm

새롭게 할당되어진 비트 값 $b(i)$ 값에 3 서브채널의 값이 3비트로서 원하지 않은 비트수를 가진다는 것을 알 수 있다. 따라서 3 서브채널의 값을 2비트로 결정하여야 한다. 그러나, 우리가 원하는 비트수는 총 9비트가 되어야 하므로 다른 하나의 비트 값을 증가시켜야 하며, 따라서 각 서브채널의 에너지 증가표를 통해 현재 할당되어진 비트 값이 0비트, 1비트 값을 가지는 서브채널만 검색할 필요가 있다.

다른 서브채널의 1비트 값을 증가시킨다고 하여도 시스템 설계사양인 0, 1, 2, 4, 6, 8비트의 값이 아니라 홀수 비

트의 값으로 잘못된 비트할당이 이루어지게 된다. 따라서 그림 5와 같이 1 서브채널과 n 서브채널을 1비트 증가시킬 때 필요한 에너지 증가 값을 조사하고 적은 에너지 증가 값을 검색, 선택하여 1 비트 값을 증가시킨다. 그림 5에 나타낸 것과 같이 최종적인 최적의 비트할당 값은 1 서브채널이 1비트, 2 서브채널이 4비트, 3서브채널이 2비트, n 서브채널이 2비트로 선택된다.

V. 시뮬레이션 및 결과

주파수 선택성 채널이 주어질 때의 적응비트로딩 알고리즘의 최적화를 이루기 위하여 IV장에서 제시한 알고리즘을 그림 6과 같은 절차로 처리하였다.

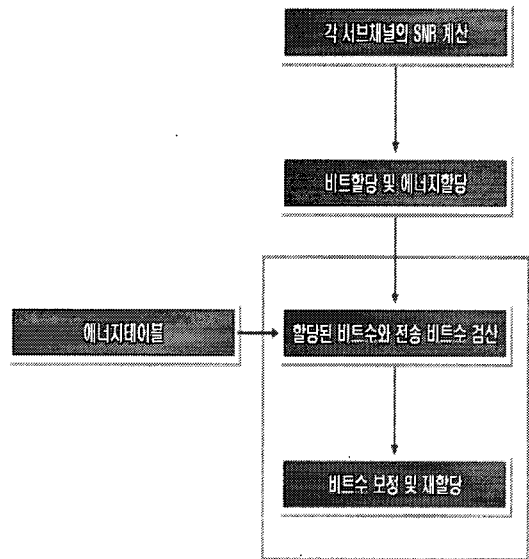


그림 6. 적응비트로딩 시뮬레이션 절차
Fig. 6 The simulation procedure of adaptive bitloading

적용 비트로딩을 위한 시뮬레이션 조건은 표1과 같고 MIMO-OFDM 시스템에서는 송수신 안테나의 수를 1, 2 와 4에 대하여 실행하였으며, 비트 로딩을 적용하지 않은 고정 OFDM과도 비교하였다. 송수신 안테나 개수의 증가는 채널용량을 증가시키므로 BER 관점에서 시스템의 성능이 향상되리라 예상할 수 있다.

표 1. 시뮬레이션 조건
Table. 1 Simulation condition

OFDM 심볼당 데이터 수	128 bit
변조방법	적용비트로딩 M-QAM
채널환경	레이리 페이딩 환경
부가잡음환경	백색 가우시언 잡음
OFDM 서브채널의 수(N)	64
안테나의 수(m×n)	송신안테나 : 1, 2, 4 수신안테나 : 1, 2, 4

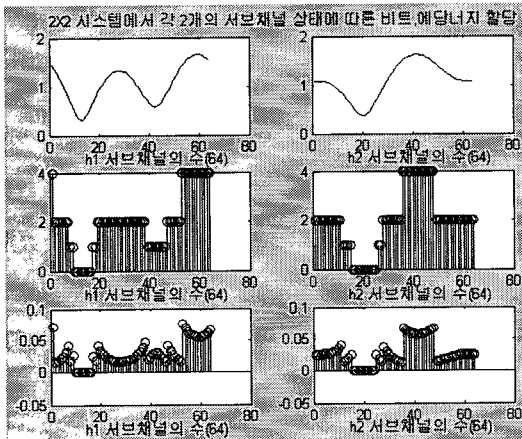


그림 7. 채널 상태에 따른 최적의 비트, 전력 할당
Fig. 7 Adaptive bit, energy allocation according to channel situation

그림 7은 2×2 MIMO 시스템의 각 서브 채널에 대한 채널 주파수 응답, 비트 할당, 에너지 할당값을 보여준다. 그림 7의 왼쪽채널 값은 첫 번째 안테나의 서브 채널의 특성값이며 오른쪽 채널 값은 두 번째 안테나의 특성값이다. 채널 상태가 좋은 곳에 많은 비트와 에너지가 할당되고, 이득이 크게 변하지 않는 구간에서 속도는 고정하므로, 유한의 MQAM 좌표를 사용할 수 있다.

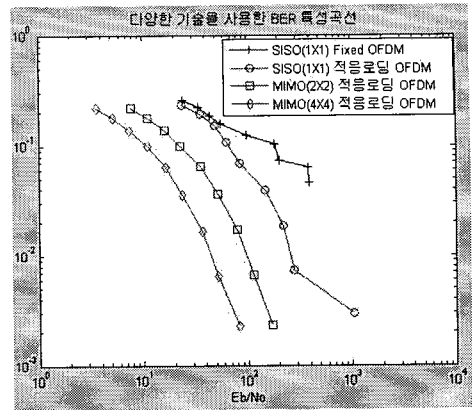


그림 8. 다양한 기술에 따른 BER 특성 곡선
Fig. 8 BER characteristic curves using various technique

그림 8에서는 다양한 기술(SISO, MIMO)을 사용하여 시뮬레이션 한 BER 특성 곡선의 결과를 나타낸 것이다. 먼저 비교를 위해 SISO(1×1)에서 성능이 가장 우수한 고정 2QAM 변조를 OFDM하여 전송한 시스템의 BER 특성을 조사하였다. 그리고 MIMO 시스템에서는 채널의 특성을 고려하여 적용 비트로딩 알고리즘을 적용하였다. 그림 8의 결과와 같이 적용 비트로딩을 사용하면 고정 변조를 사용하는 것보다 BER 특성이 좋게 나타남으로써 시스템의 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

다음으로 SISO 시스템과 MIMO시스템에 대한 적용 비트로딩 알고리즘을 비교하기 위하여 적용비트로딩 SISO-OFDM 시스템과 적용 비트로딩 MIMO-OFDM 시스템의 BER 특성을 평가하였다. 안테나의 수를 제외한 다른 조건들은 일치시켰다. 그림 8과 같이 MIMO-OFDM 시스템이 SISO-OFDM 시스템보다 더 좋은 BER 특성 결과를 나타냄을 알 수 있다. 마지막으로 송수신 안테나의 수의 증가에 따른 성능 분석을 하였다. 그 결과 2×2 안테나를 사용하는 MIMO-OFDM 시스템보다 4×4를 사용하는 MIMO-OFDM 시스템의 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 이는 같은 MIMO 시스템에서도 안테나의 개수가 증가할수록 채널의 용량을 증가시켜 시스템의 성능이 더욱 향상됨을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 SISO-OFDM 시스템과 MIMO-OFDM 시스템의 성능을 비교 평가 하였으며, 또한 OFDM의 성능을 향상시키기 위하여 적응 비트로딩 알고리즘을 사용하여 그 결과를 확인하였다.

채널의 상태를 고려하지 않고 고정 변조와 고정 전력으로 전송하는 OFDM 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 적응 비트로딩 알고리즘을 시스템에 적용시켰다. 적용한 알고리즘의 유효성을 입증하기 위해 먼저 고정을 SISO 시스템을 시뮬레이션하였다. 그리고 적응 비트로딩 기술을 사용하여 서브 채널의 상태에 따라 최적의 비트 값과 에너지 값을 할당함으로써 최적의 전력제어가 가능함을 확인하였다.

또한 특이치 분해(SVD)를 이용하여, 송수신기에서 precoding과 펄스 성형을 함으로서, 서로 간섭을 주는 다중 송수신 안테나 시스템이 병렬의 비간섭 SISO 채널로 분리가 가능함을 확인하였다.

시뮬레이션 결과 적응 비트로딩 SISO-OFDM 시스템보다 적응 비트로딩 MIMO-OFDM 시스템의 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 적응 비트로딩 MIMO-OFDM 시스템 중에서도 송수신 안테나의 개수를 증가시키면 채널용량이 증가하여 시스템의 성능이 향상됨을 BER 특성 곡선을 통해 확인할 수 있었다.

그러나 본 논문에서는 송수신기간의 채널을 알고 있다고 가정하였으므로 이를 보완하기 위해, 향후 적응 비트로딩 기법에 채널 추정 기술을 적용하여 실제 이동통신 환경에 더욱 적합한 시스템으로 연구 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] P. Chow et al, "A Practical Discrete Multitone Transceiver Loading Algorithm for Data Transmission Over Spectrally Shaped Channels," IEEE Trans. Comm, Vol. 43, No.2, February 1995, Page 773-775.
 [2] K. Wong et al, "Adaptive Spatial-Subcarrier Trellis Coded MQAM and Power Optimization for OFDM Transmission", VTC2000, Page 2049-2053
 [3] A. Bahai, B. Saltzberg, Multicarrier Digital Communications:

Theory and Applications of OFDM. Kluwer Academic, New York, 1999

[4] G. Lebrun et al, "MIMO transmission over a time-varying channel using SVD," Australian Telecommunication Cooperative Research Center, 2001
 [5] Carlo Mutti and Dirk Dahlhaus, "Adaptive power loading for MIMO OFDM systems with perfect channel state Information," Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2003
 [6] P. Viswanath, D. Tse, and V. Anantharam, "Asymptotically Optimal water-filing in vector Multiple Access channels," IEEE Trans. Inform. Theory, vol.47, no.1, pp.241-267, Jan.2001

저자소개

이 민 혁(Min-hyuk Lee)

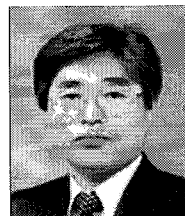


1997년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업
 1999년 2월 동아대학교 대학원 전자공학과 석사

2003년 2월 동아대학교 전자공학과 박사수료
 2000년 12월 ~ 2001년 12월 삼창기업(주) 제어기술연구소
 2001년 12월 ~ 2005년 11월 (주)비앤지로티스, (주)로티스 ITS시스템사업부 차장
 2005년 11월 ~ 현재 동부정보기술(주) 공공건설개발팀 과장

※ 관심분야: CDMA, OFDM, ITS, MIMO

변 건 식(Kuk-sik Byon)



1972년 2월 한국항공대학교 항공전자공학과 졸업
 1980년 2월 동아대학교 대학원 전자공학과 석사

1987년 2월 영남대학교 대학원 전자공학과 박사
 1989년 9월 ~ 1990년 8월 국립 요코하마대학교 전자정보공학과 객원교수
 1980년 2월 ~ 현재 동아대학교 전자공학과 교수
 ※ 관심분야: OFDM, UWB, MIMO