

# 부호화된 다중 사용자 OFDMA 시스템에서의 전송률 최대화를 위한 효율적인 적응 변조 및 부호화 기법

이두호<sup>o</sup>, 권중형, 변일무, 강민규, 김광순

연세대학교 전기전자공학과

## Efficient Adaptive Modulation and Coding for Throughput Maximization in Coded Multiuser OFDMA Systems

Duho Rhee<sup>o</sup>, Jung Hyoung Kwon, Il Mu Byun, Min-gyu Kang, and Kwang Soon Kim

Department of Electrical and Electronics Engineering, Yonsei University

{dhrhee, goodream, dlfan, kangys8, kskim}@dcl.yonsei.ac.kr

### 요 약

본 논문에서는 부호화된 다중 사용자 하향 링크 직교 주파수 분할 다중 접속 방식(OFDMA) 시스템에서 전송률을 최대화하기 위한 적응 변조 및 부호화 기법을 제안하고 성능을 분석한다. 제안하는 기법은 시스템 복잡도를 고려한 준최적 방법으로써, 제한된 전력 하에서 전송률을 최대화하기 위한 전력 할당 기법이다. 모의 실험을 통해 제안한 기법이, 단말로 전송되는 부가 정보의 양을 줄이면서 전송률을 높일 수 있음을 보였다.

### 1. 서론

무선 이동 통신 시스템에서 고속의 데이터 서비스에 대한 요구가 증가함에 따라 시스템의 전송률을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 차세대 이동통신에서는 다중 경로 감쇄 채널에 유리하고 채널 등화기를 간단히 할 수 있는 등의 장점을 가지는 직교 주파수 분할 다중 접속 방식(OFDMA)이 각광을 받고 있다. OFDMA 시스템은 주파수 선택적 감쇄 채널에서 각 부반송파 또는 부채널 별로 채널 상황에 따라 대역 할당 및 전력 할당이 가능하다는 장점을 가진다 [1]-[3]. 전력 할당은, 대역 할당이 완료된 후 제한된 전체 전력을 최적으로 할당하여 전송률을 최대화하는 것으로써, 워터 필링 (water filling) 방법이 최적이라고 알려져 있다 [4][5]. 그러나 실제 시스템에서는 비트 단위로 할당을 해야 하므로 비트 로딩 방식이 현실적이다 [1]. 그러나 두 방식 모두 최적이라는 장점이 있는 반면 복잡도가 매우 높다는 단점이 있다. 따라서 복잡도를 줄이기 위한 가장 쉬운 방법으로써, 각 대역 별 채널 상태에 관계 없이 동일한 전력을 할당하는 방식이 제안되었다 [2]. 그러나 이 방식은 각 대역 별 채널 상태의 차이가 크지 않을 때는 적합하지만,

각 대역 별 채널 상태의 차이가 클 경우에는 성능의 열화가 생긴다. 또한 기존의 연구들은 부호화되지 않은 시스템을 고려하였거나 채널 용량(channel capacity)만을 고려하였기 때문에 실제 시스템에 적용하기는 힘들다. 따라서 본 논문에서는 부호화된 OFDMA 시스템에서 성능 열화를 줄이면서 복잡도를 줄인 전력 할당 방식을 제안하고 성능을 분석하였다.

### 2. 시스템 모형

본 논문에서 고려하는 시스템의 모형은 그림 1 과 같다. 단일 셀 내에  $K$ 명의 사용자와  $N$ 개의 부대역으로 이루어진 OFDMA 시스템을 고려하였다. 각 부대역은  $M$ 개의 부반송파로 이루어져 있으며, 전체 시스템 대역의 부반송파 개수는  $MN$ 개가 된다. 또한, 한명의 사용자만이 한 개의 부대역을 할당 받을 수 있으며, 각 사용자는 독립적인 감쇄 채널을 겪으며, 이 때의  $k$ 번째 사용자의  $n$ 번째 부대역의 채널 이득은  $h_{k,n}$ 으로 나타내며,  $n$ 번째 부대역 내의 부반송파 가운데 채널 이득의 절대값이 가장 작은 부반송파의 채널 이득으로 정의된다.  $k$ 번째 사용자의  $n$ 번째 부대역의 수신 신호대 잡음비(SNR)은 다음과

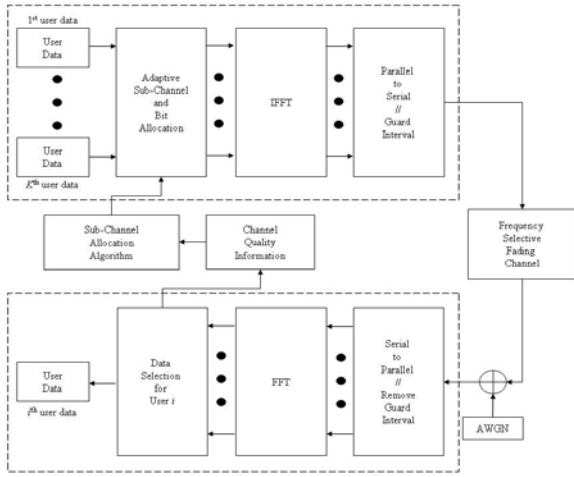


그림 1. 시스템 모형.

같이 정의된다.

$$\gamma_{k,n} = p_{k,n} |h_{k,n}|^2 / N_0 \quad (1)$$

여기서  $p_{k,n}$ 은  $k$ 번째 사용자의  $n$ 번째 부대역의 송신 전력을 나타내고,  $N_0$ 는 부가 백색 정규 잡음(AWGN)의 단방향(single-sided) 전력 스펙트럼 밀도 함수이다.

시스템은 미리 정해진 여러 개의 변조 및 부호화 방식 집합(MCS : Modulation and Coding Set)을 가지고, 정해진 알고리즘에 따라 변조 및 부호화 방식(MCS option)을 결정하고 전력을 할당한다. 만약, 목표 비트 오류율이 정해져 있다면, 각 채널 부호에 대해서 모의 실험을 통해 BPSK를 사용할 때의 패킷 오류율(PER:Packet Error Rate) 곡선을 얻을 수 있고 이를 이용해 특정 채널 부호를 사용할 때의 필요 SNR을 구할 수 있고 이를 미리 테이블화해서 가지고 있다. 특정 부호를 사용했을 때 필요한 SNR을  $\gamma'$ 라 하자. 그러면 특정 MCS에서의 필요 SNR,  $\gamma$ 는 해당 변조 방식에서 성장도의 최단 거리가 BPSK일 때와 같아지도록 추가 전력을 더해줌으로써,

$$\gamma = \gamma' + p_m \quad (2)$$

와 같이 구할 수 있고, 여기서  $p_m$ 은  $m$ 번째 변조 방식을 사용할 때의 필요 추가 전력이다.  $k$ 번째 사용자,  $n$ 번째 부대역에 할당된 변조 방식의 할 심볼 당 비트 수를  $q_{k,n}$ 이라 하면, 해당 부대역에서의 전송률은 할당된 채널 부호의 부호화율  $r_{k,n}$ 을 비트 수에 곱해서 구할 수 있고, 따라서 전체 시스템의 전송률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{k,n} \frac{M r_{k,n} q_{k,n}}{T} \\ &= \frac{\rho B}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{k,n} r_{k,n} q_{k,n} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $c_{k,n}$ 은 부대역 할당 지시자로서  $\{0,1\}$ 의 값을 가지며,  $n$ 번째 부대역이  $k$ 번째 사용자에게 할당되면  $c_{k,n}$ 은 1이고, 그렇지 않으면 0이다. 또한,  $r_{k,n}$ 은  $k$ 번째 사용자,  $n$ 번째 부대역에 할당된 MCS option의 부호화율이고,  $T$ 는 보호구간을 포함한 OFDM 심볼 길이를 나타내며,  $\rho = MN/TB$ 이다. 시스템 전송률을 최적

화하기 위해 다음의 제한 조건 하에서 전체 전송률이 최대가 되는  $Q$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} i) & \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n} \leq P, \quad p_{k,n} > 0, \\ ii) & \sum_{k=1}^K c_{k,n} = 1, \quad \forall n, \\ iii) & \sum_{n=1}^N c_{k,n} = c = \frac{N}{S}, \quad \forall k. \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $P$ 는 전체 송신 전력을 나타내고,  $S$ 는 한 슬롯 당 기지국에서 부대역 할당이 가능한 사용자 수를 나타낸다.

### 3. 제안하는 기법

본 논문에서는 3 가지 전력 할당 방식을 제안하고 성능을 분석한다. 각 방식은 채널 부호 방식과 변조 방식을 결정하는 방법에 따라 구분된다.

#### 3.1. 각 부대역 별 다른 부호, 다른 변조 방식

첫 번째 방식은 3 가지 방식 중 가장 간단한 방법으로써, 각 부대역 별로 다른 부호어 길이와 부호화율을 사용하고 다른 변조 방식을 사용하는 방식이고 이를 DD(Different and Different)라 명명한다. 우선 이 방식의 전력 할당 알고리즘은 그림 2와 같다.

for  $n = 1 : N$

$$MCS(n) = 0$$

end

$$P_{sum} = 0$$

while  $P_{sum} < P$  do

for  $1 : N$

$$\Delta P_n = P_n (MCS(n) + 1) - P_n (MCS(n))$$

end

$$n^* = \arg \min_n \Delta P_n$$

$$P_{sum} = P_{sum} + \Delta P_{n^*}$$

$$MCS(n^*) = MCS(n^*) + 1$$

end

그림 2. 각 부대역 별 다른 부호, 다른 변조 방식을 사용하는 전력 할당 알고리즘.

여기서  $n$ 은 부대역을 나타내는 인덱스이고,  $MCS(n)$ 은  $n$ 번째 부대역에 현재 할당된 MCS option을,  $P_{sum}$ 은 전체 사용 전력을,  $P$ 는 시스템에서 사용할 수 있는 한계 전력을,  $\Delta P_n$ 은  $n$ 번째 부대역에서 MCS option을 한 단계 높였을 때 추가되는 전력을,  $P_n(\cdot)$ 은  $n$ 번째 부대역의 해당 MCS option을 사용할 때 필요한 전력을,  $n^*$ 는 현재 루프에서  $\Delta P_n$ 이 가장 작은 부대역을 의미한다. 이 방식에서는, 매 루프마다 각 부대역 별로 MCS option을 한 단계 높였을 때 추가되는 전력이 가장 작은 부대역을 선택해서

MCS option을 올리고 전력을 할당한다.

### 3.2. 각 사용자의 부대역 별 같은 부호, 같은 변조 방식

이 전력 할당 방식은, 한 사용자에게 할당된 부대역 내에서는 같은 채널 부호와 같은 변조 방식을 사용하는 방식이고 이를 EE(Equal and Equal)라 명명한다. 이 방식의 전력 할당 알고리즘은 그림 3 과 같다.

```

for k = 1: K
    MCS(k)=0
end
Psum = 0
while Psum < P do
    for k = 1: K
        Pk,sum = 0
        for n = 1: N
            if (Ak(n)=1)
                ΔPk,n = Pk,n(MCS(k)+1) - Pk,n(MCS(k))
                Pk,sum = Pk,sum + ΔPk,n
            end
        end
        k* = arg mink Pk,sum
        Psum = Psum + Pk*,sum
        MCS(k*) = MCS(k*) + 1
    end

```

그림 3. 각 사용자의 부대역 별 같은 부호, 같은 변조 방식을 사용하는 전력 할당 알고리즘.

여기서  $P_{k,sum}$ 은  $k$ 번째 사용자의 현재 루프에서 전체 부대역에 할당된 전력의 합을 의미하고,  $A_k(n)$ 은  $n$ 번째 부대역이  $k$ 번째 사용자에게 할당되었는지를 나타내는 지시자이고,  $\Delta P_{k,n}$ 은  $k$ 번째 사용자의  $n$ 번째 부대역에서 MCS option을 한 단계 높일 때 추가되는 전력을,  $k^*$ 은 현재 루프에서 추가되는 전력이 가장 작은 사용자를 의미한다. 매 루프마다 각 사용자 별로 MCS option을 한 단계 높였을 때 추가되는 전력을 계산한 후 이 값이 가장 작은 사용자를 선택해서 MCS option을 한 단계 올리고 전력을 할당한다..

### 3.3. 각 사용자의 부대역 별 같은 부호, 다른 변조 방식

이 전력 할당 방식은, 한 사용자에게 할당된 부대역 내에서는 같은 채널 부호를 사용하고 변조 방식은 각 부대역 별로 다르게 할당하는 방식이고 이를 ED(Equal and Different)라 명명한다. 앞의 두 방식과 달리 한 사용자에게 채널 부호가 정해져도 각 부대역 별 변조 방식은 자유롭게 변할 수 있으므로, MCS option에서 변조 방식은 특정 방식으로 고정되지 않고 자유롭게 선택할 수 있도록 하는 것이 특

징이다. 이 방식의 전력 할당 알고리즘은 그림 4 와 같다.

```

for k = 1: K
    i(k) = MCS(0)
    m(k, Ck(r)) = 0
end
Psum = 0
while
    for k = 1: K
        for l = L min(i(k)): L max(i(k))
            M = 0
            Psum,k,l = 0
            d(k, Ck(r), l) = 0    ∀ r
            while M <= M(l) / Nsym do
                for r = N / S
                    ΔPk,Ck(r),l = Pk,Ck(r)(d(k, Ck(r), l) + 2, l, i(k))
                        - Pk,Ck(r)(d(k, Ck(r), l), l, i(k))
                end
                r* = arg minr ΔPk,Ck(r),l
                Psum,k,l = Psum,k,l + ΔPk,r*,l
                d(k, Ck(r*), l) = d(k, Ck(r*), l) + 2
                M = M + 2
            end
        end
        l*(k) = arg minl Psum,k,l
        e(k, Ck(r*)) = d(k, Ck(r*), l*)
    end
    k* = arg mink Psum,k,l*(k)
    Psum = Psum + Psum,k*,l*(k)
    if Psum < P
        Psum = Psum
        i(k*) = i(k*) + 1
        m(k*, Ck*(r)) = e(k*, Ck*(r))    ∀ r
    else
        break
    end

```

그림 4. 각 사용자의 부대역 별 같은 부호, 다른 변조 방식을 사용하는 전력 할당 알고리즘.

여기서  $i(k)$ 는  $k$ 번째 사용자의 정보 길이의 단위를 나타내고,  $Lmin(i(k))$ 는  $i$ 번째 정보 길이를 사용하는 MCS option 중에서 부호어 길이 인덱스의 최소치를 나타내고,  $Lmax(i(k))$ 는  $i$ 번째 정보 길이를 사용하는 MCS option 중에서 부호어 길이 인덱스의 최대치를 나타내고,  $M(l)$ 은 부호어 길이 인덱스가  $l$ 일 때의 부호어 길이를 나타내고,  $N_{sym}$ 은 한 슬롯 당 심볼 수를 나타내고,  $C_k(r)$ 은  $k$ 번째 사용자의  $r$ 번째로 할당된 대역의 위치를 나타낸다.

### 3.4. 각 전력 할당 방식 별 부가정보량

각 부대역에 대해서 MCS option 을 적응적으로 할당하면 이에 대한 정보를 수신단에 알려주어야 하고 이는 부가적인 정보로서 그 양이 적을수록 좋다. 우선 DD 방식의 경우의 한 사용자 당 부가정보량은

$$N_{DD} = N_{par} (\lceil \log_2 N_{MCS} \rceil + N_{pow}) \quad (5)$$

와 같고, 여기서  $N_{par}$ 는 각 사용자에게 할당되는 부대역 수,  $N_{MCS}$ 는 MCS option의 개수,  $N_{pow}$ 는 전력 레벨을 나타내기 위한 비트 수이다. EE 방식의 한 사용자 당 부가정보량은

$$N_{EE} = \lceil \log_2 N_{MCS} \rceil + N_{pow} \quad (6)$$

와 같다. 마지막으로 ED 방식의 부가정보량은

$$N_{ED} = \lceil \log_2 N_{MCS} \rceil + N_{par} \lceil \log_2 N_{Mod} \rceil + N_{pow} \quad (7)$$

와 같고, 여기서  $N_{Mod}$ 는 변조 방식의 개수를 나타낸다.  $N_{MC}=10$ ,  $N_{par}=8$ ,  $N_{Mod}=3$ ,  $N_{pow}=6$  일 때,  $N_{DD}$ 는 80 비트,  $N_{EE}$ 는 10 비트,  $N_{ED}$ 는 26 비트로써, ED방식은 DD 방식보다는 부가정보량이 매우 작지만 EE 방식보다는 많음을 알 수 있다. 각 사용자 별로 할당된 부대역의 위치 정보도 필요하나 이는 각 방식이 모두 같으므로 중요하지 않다.

### 4. 모의실험 결과

제안한 방식의 전송률 성능을 알아보기 위해 모의실험을 실시하였다. 모든 모의 실험은 ITU-R vehicular A 채널을 가정하였고, 레일리(Rayleigh) 감쇄 채널을 가정하였다. 각 사용자는 독립적이고 동등한 분포(i.i.d)의 채널 감쇄를 겪고, 96 개의 부대역 중 8 개의 부대역을 할당 받으며, 기지국에서 선택하는 사용자의 수는 12 명이다.

각 부대역 별로 다른 부호와 다른 변조 방식을 사용하는 방식에서 사용된 MCS 는 표 1 과 같다.

MCS Option	Mod.	Codeword Length (N)	Info. Length (K)	Code Rate
MCS0	No Tx	No Tx	No Tx	No Tx
MCS1	4-QAM	256	48	0.19
MCS2	4-QAM	256	92	0.36
MCS3	4-QAM	256	180	0.70
MCS4	16-QAM	512	268	0.52
MCS5	16-QAM	512	356	0.70
MCS6	16-QAM	512	444	0.87
MCS7	64-QAM	768	532	0.69
MCS8	64-QAM	768	620	0.81

표 1. 각 부대역 별 다른 부호, 다른 변조 방식을 사용하는 방식에서 사용된 MCS.

이 방식에서는 각 부대역 별로 다른 부호를 사용하

기 때문에 부호어의 길이가 짧은 것을 알 수 있다.

각 사용자의 부대역 별 같은 부호, 같은 변조 방식을 사용하는 방식에서 사용된 MCS 는 표 2 와 같다.

MCS Option	Mod.	Code Length (N)	Info. Length (K)	Code Rate
MCS0	No Tx	No Tx	No Tx	No Tx
MCS1	4-QAM	2048	384	0.19
MCS2	4-QAM	2048	736	0.36
MCS3	4-QAM	2048	1440	0.70
MCS4	16-QAM	4096	2144	0.52
MCS5	16-QAM	4096	2848	0.70
MCS6	16-QAM	4096	3552	0.87
MCS7	64-QAM	6144	4256	0.69
MCS8	64-QAM	6144	4960	0.81

표 2. 각 사용자의 부대역 별 같은 부호, 같은 변조 방식을 사용하는 방식에서 사용된 MCS.

이 방식에서는 한 사용자에게 할당된 전체 부대역에 대해서 하나의 채널 부호를 사용하기 때문에 부호어의 길이가 앞의 방식에 비해 길어진 것을 알 수 있다.

각 사용자의 부대역 별 같은 부호, 다른 변조 방식을 사용하는 방식에서 사용된 MCS 는 표 3 과 같다.

MCS Option	Mod.	Code Length (N)	Info. Length (K)	Code Rate
MCS0	No Tx	No Tx	No Tx	No Tx
MCS1	No Tx 4-QAM 16-QAM 64-QAM	2048	736	0.36
MCS2		3072	736	0.24
MCS3		2048	1440	0.70
MCS4		3072	1440	0.47
MCS5		3072	2144	0.70
MCS6		4096	2144	0.52
MCS7		4096	2848	0.70
MCS8		5120	2848	0.56
MCS9		4096	3552	0.87
MCS10		5120	3552	0.69
MCS11		5120	4256	0.83
MCS12		6144	4256	0.69
MCS13		6144	4960	0.81

표 3. 각 사용자의 부대역 별 같은 부호, 다른 변조 방식을 사용하는 방식에서 사용된 MCS.

각 변조 방식 별로 BPSK 일 때의 필요 SNR 에 더해주어야 하는 추가 전력은 표 4 와 같다.

변조방식	4-QAM	16-QAM	64-QAM
추가전력	3 dB	10 dB	16.23 dB

표 4. 변조 방식 별 추가 전력.

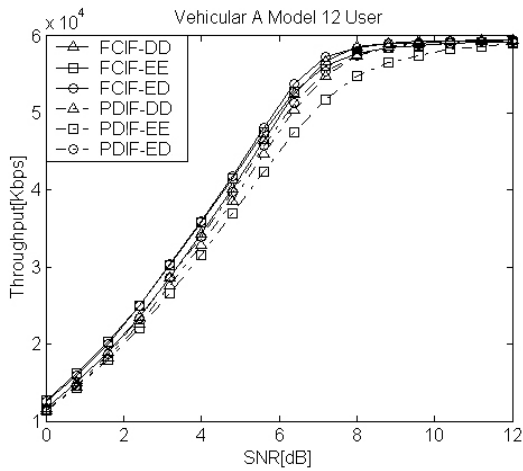


그림 5. 각 전력 할당 방식 별 전송률 성능.

각 방식 별 전송률 성능은 그림 5 와 같다. 여기서 FCIF(Full Channel Information Feedback)는 전체 부대역의 채널 정보를 모두 케환해서 부대역을 할당하는 것을 의미하고, PDIF(Partial and Distance Information Feedback)은 부분적 채널 정보만을 케환하는 부대역 할당 알고리즘으로써, [6]에서 제안된 방식이다.

우선 FCIF 방식에서 3 가지 전력 할당 알고리즘의 성능을 알아보면, ED, EE, DD 방식 순으로 성능이 나빠진다. DD 방식은 알고리즘의 복잡도가 낮다는 장점이 있으나, 각 부대역 별로 다른 부호를 사용하기 때문에 부호어의 길이가 짧아져서 부호화 이득을 많이 얻지 못하기 때문에 성능이 나빠진다. EE 방식은 DD 방식에 비해 부호어 길이가 길어져서 성능이 좋아지나, 각 부대역 별 채널 상황을 고려하지 않고 모두 같은 변조 방식을 사용하기 때문에 채널 상황이 나쁜 부대역에서 전력의 낭비를 가져오고 ED 방식에 비해 성능이 떨어지게 된다. ED 방식은 부호어 길이도 길고 부대역의 채널 상황에 맞게 변조 방식을 결정하게 되므로 가장 좋은 성능을 나타내게 된다.

부분적 채널 정보를 케환하는 PDIF 방식의 경우 ED, DD, EE 순으로 성능이 나빠지는 것을 볼 수 있다. ED 가 제일 좋은 것은 FCIF 에서와 같으나, DD 와 EE 의 순서가 바뀌었는데, 이는 전체 대역의 채널 알지 못하기 때문에 한 사용자에게 할당된 부대역 간의 채널 상태에 차이가 날 확률이 높기 때문이다.

ED 방법의 경우 두 가지 대역 할당 방식 모두에서 가장 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 또한 PDIF 방식에서는 FCIF 에서보다 성능이 떨어지는데 이는 앞서 설명한 것처럼 PDIF 방식에서 각 부대역 별 채널 상태의 차이가 클 확률이 높기 때문이다.

따라서 ED 방식이 부가 정보의 양도 적으면서 가장 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 부호화된 OFDMA 시스템에서 전송률을 최대화하기 위한 효율적인 전력 할당 기법을 제안하고 성능을 분석하였다. 제안한 ED 방법이 부가 정보의 양은 적으면서 가장 좋은 전송률 성능을 나타냄을 보였다.

## 6. 참고문헌

- [1] C.Y. Wong, R.S. Cheng, K.B. Letaief, and R.D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 17, pp. 1747-1758, Oct. 1999.
- [2] J. Jang and K.B. Lee, "Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems," *IEEE J. Select. Areas. Commun.*, vol. 21, pp. 171-178, Feb. 2003.
- [3] D. Kivanc, G. Li, and H. Kiu, "Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, pp. 1150-1158, Nov. 2003.
- [4] T.M. Cover and J.A. Thomas, *Elements of Information Theory*, Wiley, NY 1991.
- [5] A.J. Goldsmith and S.G. Chua, "Adaptive coded modulation for fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, pp. 595-602, May 1998.
- [6] 권중형, 이두호, 변일무, 김광순, 황금찬, "다중 사용자 OFDMA 시스템에서 케환 비트량을 줄일 수 있는 사용자 선택 및 부대역 할당 알고리즘," *한국통신학회 추계종합학술발표회 논문집*, 2005년 11월.