다중 사용자 OFDM 시스템의 최적 부채널 및 비트 할당: Dual-Decomposition 방법

정회원 박 태 형*, 임 성 빈**, 서 만 중**

The Optimal Subchannel and Bit Allocation for Multiuser OFDM System : A Dual-Decomposition Approach

Taehyung Park*, Sungbin Im**, Manjung Seo** *Regular Members*

요 약

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송방식의 장점은 높은 주파수 효율, RF간섭에 대한 강인성, 낮은 다중 경로 왜곡 등을 들 수 있다. 다중 사용자 OFDM의 채널용량을 확대하기 위해서는 사용자간의 부채널과 비트 할당의 효율적인 알고리즘을 개발하여야 한다. 본 연구에서는 다중 사용자의 전송요구량을 만족하는 최적 부채널 및 비트 할당 문제를 0-1 정수계획법 모형으로 형성하고, 원래 문제의 선형계획법 완화 (linear programming relaxation)문제를 dual-decomposition과 subgradient 알고리즘을 사용하여 해를 구하는 효과적인 알고리즘을 제시한다. 또한 dual-decomposition으로 구한 목적함수값은 원래 문제의 선형계획법 완화문제의 최적목적함수 값과 동일함을 증명하였다. 모의실험을 통하여 다수의 문제에 대하여 원래 문제의 최적 목적함수값에 대한 dual-decomposition으로 구한 하한의 성능을 제시하였다. MQAM (M-ary Quadrature Amplitude Modulation)을 사용하고 3개의 독립적인 Rayleigh 다중 경로로 구성된 주파수 선택적 채널을 가정한 경우 MATLAB을 사용한 모의실험에서 0-1 정수계획법으로 구한 최적해의 성능을 실험하였다.

Key Words : OFDM, 부반송파 할당, 비트 할당, 정수계획법, dual-decomposition

ABSTRACT

The advantages of the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) are high spectral efficiency, resiliency to RF interference, and lower multi-path distortion. To further utilize vast channel capacity of the multiuser OFDM, one has to find the efficient adaptive subchannel and bit allocation among users. In this paper, we propose an 0-1 integer programming model formulating the optimal subchannel and bit allocation problem of the multiuser OFDM. We employ a dual-decomposition method that provides a tight linear programming (LP) relaxation bound. Simulation results are provided to show the effectiveness of the 0-1 integer programming model. MATLAB simulation on a system employing M-ary quardarature amplitude modulation (MQAM) assuming a frequency-selective channel consisting of three independent Rayleigh multi-paths are carried with the optimal subchannel and bit allocation solution generated by 0-1 integer programming model.

※ 본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.
* 숭실대학교 산업정보시스템 공학과 네트워크 연구실(tpark@ssu.ac.kr)
** 숭실대학교 정보통신공학과 전송보상 연구실(sbi@ssu.ac.kr, baoro33@ssu.ac.kr)
논문번호 : KICS2008-11-505, 접수일자 : 2008년 11월 14일, 최종논문접수일자 : 2008년 11월 20일

Ⅰ. 서 론

본 논문에서는 다중 사용자 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서 부반송파 및 비트의 수를 할당하는 최적화 문제에 대하여 살펴본다. 다중 반송파 기술은 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference; ISI)을 효과적으로 제거할 수 있는 전송방식이다. 모든 사용자의 채널 정보를 전송단에서 알고 있고 적응적 방법이 사용되면 상당한 성능 개선이 이루어질 수 있다는 것이 알려져 있다. 즉, 채널 상황이 좋은 상태에서 더 많은 비트 또는 OFDM 심볼을 전송하고 채널 상황이 좋지 않은 경우에서는 적은 수의 비트나 심볼을 전송한다.

적응적 부채널 및 비트 할당 문제에 대한 연구는 참고 문헌 [1], [2], [3], [4], [5]에 보고되어 있다. 이러한 연구는 크게 두 분류로 나눌 수 있다. 참고문헌 [2], [5]의 경우 사용자에게 할당되는 비트 할당 문제를 고려하였고, [3], [4]의 경우에는 사용자별 최적 전송용량결정에 필요한 부채널 전력 결정 문제를 고려하였다. 본 논문에서 사용하는 방법은 전자에 속한다. 참고문헌 [2]에서는 총 부채널 전력 제약하의 비트 할당 문제를 0-1 정수계획법문제로 형성할 수 있음을 제시하고, 채널과 비트 할당 문제를 두 개의 문제로 나누어서 접근하고 있다. 이 접근 방법에서는 채널 할당 문제에 대해 모든 사용자에게 균등하게 r개의 부채널을 할당하고 비트 할당 문제에 대해서는 미리 정해진 부채널에 대하여 할당되는 비트수를 greedy 휴리스틱 방법을 사용하여 계산하고 있다. 참고 문헌 [10]에서는 본 연구와 마찬가지로 사용자별 전송수요 제약하의 총 전송전력을 최소화하는 비트 할당 문제를 비선형정수계획법 문제로 형성하고, 단일 사용자의 경우, greedy 휴리스틱 알고리즘을, 다수 사용자의 경우, 사용자간 채널공유 조건을 완화 (relaxation)한 문제에 관해 최적해 조건과 알고리즘을 제시하였다.

참고 문헌 [3]에서는 한 개의 채널을 다수의 사용자가 공유 가능한 경우, 최소전송용량을 극대화하는 Max-Min 문제를 convex 최적화 문제로 형성하고 greedy 휴리스틱 알고리즘을 제시한다. 참고문헌 [4]의 경우에는 [3]에서 제시한 모형에 각 사용자에게 할당된 용량 간에 미리 정한 fairness 비율 제약이 추가된 문제를 고려하였다. 본 논문에서는 각 부채널을 한 명의 사용자만 사용하고 동시에 주어진 특정 정수 비트 수들만을 사용하는 것을 보장하는 0-1 정수계획법 문제로 접근하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 다음 절에서 간단히 본 논문에서 고려하는 OFDM 시스템의 모델을 소개하고 모델과 모의실험에서 사용된 가정들에 대하여 정리한다. Ⅲ절에서는 적응 부채널 및 비트 할당 문제를 0-1 정수계획법 문제로 형성한다. Ⅳ절에서는 원래 문제의 연속적 완화문제에 대한 목적함수의 최적하한을 계산하는 효율적인 dual-decomposition 절차에 대하여 살펴본다. Ⅴ절에서는 몇 가지 예에 대하여 결과들과 모의실험을 통하여 기존 방법과 본 논문에서 제안하는 방법의 비트오율 성능을 비교하고 Ⅵ절에서 본 논문의 결론을 제시한다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 OFDM 시스템의 블록도를 그림 1에 도시하였다.

이 시스템에서는 m명의 사용자를 수용하고 있으며, i번째 사용자의 OFDM 심볼당 데이터 전송율을 R_i라고 가정한다. 전송단에서는 m명의 사용자로부터 데이터가 일렬형태로 부반송파 및 비트 할당 블록으로 입력되고 비트 할당 블록은 각 사용자의 비트를 여러 부채널에 할당한다. 전송단에서는 모든 사용자의 모든 부채널의 실시간 채널 정보를 알 수 있다고 가정한다. 또한 각각의 사용자에게 부채널 및 비트 할당 정보가 별도의 채널로 전송된다고 가정한다. 전송단의 출력으로 나온 복잡한 심볼은 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)를 통하여 시간영역으로 변환된다. 시간영역 샘플의 순환확장

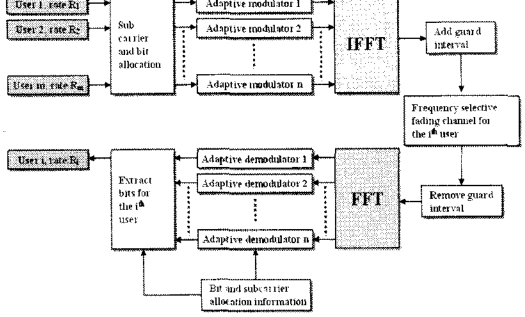


그림 1. 부채널, 비트, 전력 할당을 사용하는 다중 사용자 OFDM 시스템의 블록도
Fig. 1. Block diagram of a multiuser OFDM system with subcarrier, bit, and power allocation

(cyclic extension), 즉 보호구간 (guard interval)은 부반송파간의 직교성이 성립하도록 추가되어 진다. 전송 신호는 각각의 사용자에게 상이한 주파수 선택적 페이딩 (frequency selective fading) 채널로 전달되어 진다.

Ⅲ. 문제 형성

본 논문에서 고려하는 최적화문제는 m명의 사용자와 n개의 부채널로 구성된 OFDM 시스템에서 사용자들의 주어진 데이터 전송율과 미리 정한 QoS (Quality-of-Service)를 만족하는 총 전송전력을 최소화하는 문제이다. 본 논문에서는 채널이득이 1인 경우, 사용자 i가 정해진 비트오율 p_e 범위 내에 x 비트를 안정적으로 받는데 필요한 전송전력을 참고문헌 [5]에서 사용한 동일한 convex 함수 $f_i(x)$로 가정한다. $f_i(x)$는 다음과 같이 정의한다.

$$f_i(x)=\frac{N_0}{3}\left[Q^{-1}(\frac{p_e}{4})\right]^2(2^x-1) \tag{1}$$

위 식에서 p_e는 요구되는 비트오율을 나타내고, $N_0/2$는 AWGN (Additive White Gaussian Noise)의 분산을, 그리고

$$Q(x)=\frac{1}{\sqrt{2}}\int_x^{\infty}e^{-t^2/2}dt. \tag{2}$$

따라서 부채널 j를 통해 x_{ij}비트를 전송할 때 필요한 전송전력은 $f_i(x_{ij})/\alpha_{ij}^2$가 되고, 여기에서 α_{ij}는 사용자 i의 부채널 j의 채널이득을 나타낸다.

각 사용자의 전송율 수요를 모두 만족하여야 하므로, 다음과 같은 제약식이 성립한다.

$$\sum_j x_{ij}=R_i, \quad \forall i \tag{3}$$

변수 x_{ij}는 양의 정수로 각 부채널에서 전송 가능한 최대 심볼당 비트수를 M이라 가정할 때, $x_{ij}\in C\subset\{0,1,2,...,M\}$이라 가정한다. 본 논문에서는 일부 사례를 제외하고 대부분의 경우 $C=\{0,2,4,6\}$으로 가정한다.

각 부채널이 다수의 사용자에 의해 공유될 수 없는 제약을 사용자 i가 부채널 j에 할당된 경우 1, 나머지 경우는 0의 값을 갖는 0-1 변수 y_{ij}를 사용하여 다음 제약식으로 표현할 수 있다.

$$\sum_i y_{ij}\le 1, \quad \forall j \tag{4}$$

사용자 i가 부채널 j에 할당되는 경우 $(y_{ij}=1)$에만 비트수 x_{ij}가 양의 값을 가질 수 있으므로, 다음 제약식이 성립한다.

$$x_{ij}\le My_{ij}, \quad \forall i,j \tag{5}$$

총 전송전력 $\sum_i\sum_j f_i(x_{ij})/\alpha_{ij}^2$를 최소화하고 제약식 (3)-(5)을 만족하는 최적화 문제는 다음과 같은 비선형 정수계획법 문제로 형성된다.

$$\begin{aligned} &\mathit{Minimize} \ \sum_i\sum_j f_i(x_{ij})/\alpha_{i,j}^2 \\ &\mathit{subject\ to} \ \sum_j x_{ij}=R_i, \quad \forall i \\ &\qquad x_{ij}\le My_{ij}, \quad \forall i,j \\ &\qquad \sum_i y_{ij}\le 1, \quad \forall j \\ &\qquad x_{ij}\ge 0 \text{ and } \mathit{integer}, \quad \forall i,j \\ &\qquad y_{ij}\in\{0,1\}, \quad \forall i,j \end{aligned} \tag{6}$$

$m=1$인 경우, 문제 (6)은

$$\begin{aligned} &\mathit{Minimize} \ \sum_j f(x_j)/\alpha_j^2 \\ &\mathit{subject\ to} \ \sum_j x_j=R \\ &x_j\ge 0, \quad \forall j \end{aligned} \tag{7}$$

의 형태를 갖는다. 문제 (7)은 비선형 정수 배낭 (knapsack) 문제이며, 효과적인 알고리즘이 참고 문헌 [6]에 소개되어 있다.

문제 (6)을 0-1 정수계획법 문제로 변환하기 위하여, 변수 x_{ij}를 0-1 변수 x_{ijk}를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &x_{ij}=\sum_k kx_{ijk}, \quad \forall i,j \\ &\sum_k x_{ijk}=1, \quad \forall i,j \\ &x_{ijk}\in\{0,1\}, \quad \forall i,j,k \end{aligned} \tag{8}$$

$x_{ij}\in C=\{0,1,2,...,M\}$이므로, 문제 (6)의 목적함수 $f_i(x_{ij})$의 값 $f_i(x_{ij})\in\{0,f_i(1),...,f_i(M)\}$이다. 계수 $c_{ijk}=f_i(k)/\alpha_{i,j}^2$를 도입하면 문제 (6)의 비선형 목적함수를 $\sum_i\sum_j\sum_k c_{ijk}x_{ijk}$로 선형화할 수 있다.

원래의 비선형정수계획법 문제는 위의 변수치환을 이용하여 다음과 같이 0-1 정수계획법 문제로 변환된다.

$$\text{Minimize } \sum_i \sum_j \sum_k c_{ijk} x_{ijk} \quad (9a)$$

$$\text{subject to } \sum_j \sum_k k x_{ijk} = R_i, \quad \forall i \quad (9b)$$

$$\sum_k k x_{ijk} \le M y_{ij}, \quad \forall i, j \quad (9c)$$

$$\sum_i y_{ij} \le 1, \quad \forall j \quad (9d)$$

$$\sum_k x_{ijk} = 1, \quad \forall i, j \quad (9e)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \ \forall i, j, k \quad (9f)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \quad (9g)$$

$c_{ij0} = f_i(0)/\alpha_{ij}^2 = 0$이므로, x_{ij0}는 제약식 (9b), (9c) 및 목적함수에 나타나지 않는다. 따라서 변수 x_{ij0}를 제거하고 제약식 (9e)를 부등제약식으로 변환한다. 제약식 (9b)-(9g)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_j \sum_{k>0} k x_{ijk} = R_i, \quad \forall i \quad (10a)$$

$$\sum_{k>0} k x_{ijk} \le M y_{ij}, \quad \forall i, j \quad (10b)$$

$$\sum_i y_{ij} \le 1, \quad \forall j \quad (10c)$$

$$\sum_{k>0} x_{ijk} \le 1, \quad \forall i, j \quad (10d)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j, k \ne 0 \quad (10e)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \quad (10f)$$

양변을 M으로 나누면, 제약식 (10b)는 $\sum_{k>0} \frac{k}{M} x_{ijk} \le y_{ij}, \ \forall i, j$이 된다. 변수 y_{ij}가 목적함수에 나타나지 않으므로, 제약식 (10b), (10c), (10f)를 만족하는 한, 변수 y_{ij}에 임의의 값을 부여할 수 있다.

$y_{ij} = \sum_{k>0} x_{ijk}$인 경우, (10d)와 (10e)에 의해, $y_{ij} \in \{0, 1\}$이고, (10c)는

$$\sum_i \sum_{k>0} x_{ijk} \le 1, \ \forall j \quad (11)$$

가 된다.

또한 (10d)에 의해, $\sum_{k>0} \frac{k}{M} x_{ijk} \le \sum_{k>0} x_{ijk} \le 1$이 되고, 제약식 (10b) 와 (10d)는 불필요한 제약식이 된다.

따라서 원래 문제 (9)를 다음의 0-1 정수계획법 문제로 나타낼 수 있다.

$$\text{OFDM: Minimize } \sum_i \sum_j \sum_k c_{ijk} x_{ijk} \quad (12a)$$

$$\text{subject to } \sum_j \sum_k k x_{ijk} = R_i, \quad \forall i \quad (12b)$$

$$\sum_i \sum_{k>0} x_{ijk} \le 1, \quad \forall j \quad (12c)$$

$$x_{ijk} \ge 0, \quad \forall i, j, k \quad (12d)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \ \forall i, j, k \quad (12e)$$

$m = 1$인 경우, 문제 (12)는 GUB (Generalized Upper Bounded) 제약식의 배낭 문제가 되고 참고문헌 [7]에 선형계획법 완화문제를 해결하는 효과적인 알고리즘이 소개되어 있다.

Ⅳ. Dual Decomposition

본 절에서는 OFDM의 선형계획법 완화문제를 dual-decomposition 기법[8]을 이용하여 해결하는 방법을 소개한다. 0-1 정수계획법 문제에서 OFDM의 최적 목적값의 하한은 문제 (12)에서 제약식 (12e)를 제외한 선형계획법 완화문제를 풀어 얻을 수 있다.

제약식 (12b)에 Lagrangian multiplier $\mu = (\mu_i)$를 곱하면, Lagrangian dual 함수는 다음의 목적함수와

$$\begin{aligned}&\sum_i \sum_j \sum_k c_{ijk} x_{ijk} - \sum_i \mu_i \Big(\sum_j \sum_k k x_{ijk} - R_i\Big) \quad (13)\\ &= \sum_i \sum_j \sum_k (c_{ijk} - k\mu_i) x_{ijk} + \sum_i \mu_i R_i\end{aligned}$$

제약식 (12c)-(12d)로 형성되고 부채널 j별로 분해됨을 알 수 있다. 따라서 OFDM의 선형계획법 완화문제는 다음의 Lagrangian dual 문제와 동일하다.

$$\text{LD: Maximize}_{\mu} \ \theta(\mu) = \sum_j \theta^j(\mu) + \sum_i \mu_i R_i \quad (14)$$

여기에서,

$$\theta^j(\mu) \equiv \text{Minimize } \sum_i \sum_k (c_{ijk} - k\mu_i) x_{ijk} \quad (15a)$$

$$\text{subject to } \sum_i \sum_{k>0} x_{ijk} \le 1 \quad (15b)$$

$$x_{ijk} \ge 0, \quad \forall i, k \quad (15c)$$

문제 (15)의 특별한 구조를 이용하여 $\theta^j(\mu)$는 다음과 같이 계산되어 진다.

$c_{ijk} - k\mu_i \ge 0 \ \forall i, k$인 경우, $\theta^j(\mu) = 0$이고, 최적해는 $x_{ijk} = 0 \ \forall i, k$이다. $\min_{i,k}\{c_{ijk} - k\mu_i\} < 0$인 경우, $(i(j), k(j)) = \arg\min_{i,k}\{c_{ijk} - k\mu_i\} \ \forall j$로 정의하면,

$\theta^j(\mu) = \min_{i,k}\{c_{ijk} - k\mu_i\}$이고, 최적해는 $x_{i(j),j,k(j)} = 1$, $x_{ijk} = 0, i \neq i(j)$이다. 위의 두 가지 경우를 합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\theta(\mu) &= \sum_j \theta^j(\mu) + \sum_i \mu_i R_i \\ &= \sum_j \min\{\min_{i,k}\{c_{ijk} - k\mu_i\}, 0\} + \sum_i \mu_i R_i\end{aligned} \qquad (16)$$

$\theta(\mu)$가 concave 함수이므로 Lagrangian dual 문제는 제약식이 없는 concave 극대화 문제가 된다.

$$\max_\mu\{\theta(\mu)\} \qquad (17)$$

이때, 함수 $\theta(\mu)$의 subgradient는 문제 (16)의 최적해 $x^*_{ijk}(\mu)$를 이용하여 $\sum_j\sum_k kx^*_{ijk}(\mu) - R_i$로 주어진다. 제약식 (15b)와 (15c)의 모든 extreme point가 정수이므로, Corollary Ⅲ.6.3.3[9]에 의해 문제 LD의 최적 목적함수값 z_{LD}는 OFDM의 선형계획법 완화문제의 최적 목적함수값 z_{LP}와 동일하다. 위의 dual 문제는 convex programming problem 이긴 하나 목적함수가 piecewise linear concave 함수이므로 subgradient 최적화 알고리즘을 사용하여 최적해를 구할 수 있다.

본 논문에서는 사용하는 subgradient 알고리즘으로는 VTVM (Variable Target Value Method)[10]을 사용하였다. VTVM은 알고리즘 구현에서 최적해의 upper bound를 미리 알 필요가 없는 장점을 갖고 있다. 다음 절에서는 OFDM의 선형계획법 완화문제를 Lagrangian dual로 구한 최적 하한의 성능을 제시한다.

V. 모의실험 및 결과

이 절에서는 먼저 OFDM 문제를 상용 정수계획법 패키지인 CPLEX 9.1을 사용하여 구한 결과와 VTVM으로 선형계획 완화문제를 구한 결과를 제시한다. 5개의 OFDM 예제의 모수들로는 5에서 10명의 사용자, 64에서 512개의 부채널, 그리고 4개 내지 5개의 비트값/심볼을 사용한다. 표 1에서는 5개 예제의 각종 입력 자료와 모수를 기록하고 있다. 표 1의 첫 번째 열에서 (m,n,k)는 사용자의 수, 부채널의 개수, 사용된 비트값/심볼의 개수를 나타내고, z_{LP}는 OFDM의 선형계획 완화문제의 목적함수값, z_{IP}는 CPLEX에서 구한 최적 정수 목적함수값, z_{LB}는 Lagrangian dual 문제로부터 구한 목적함수의 하한값, #outer iter.는 VTVM에서 Lagrangian dual의 상한을 변경한 횟수, CPU time (sec)는 VTVM의 CPU 시간을 나타낸다.

사용자의 전송수요 R_i는 문제 1, 2, 5에서는 짝수 (512)로 정하고 심볼당 비트수도 특정한 짝수값을 사용한 반면, 문제 3, 4에서는 R_i와 심볼당 비트수가 임의의 값을 갖도록 설정하였다. 문제 1과 2의 크기가 작으므로, 선형계획 완화문제도 정수 최적해를 갖는다. 문제 3, 4, 5의 경우에 선형계획 완화문제의 최적해는 실수값이다. 예를 들어, 문제 4의 경우 선형계획법 하한과 정수 최적 목적함수값의 비율이 96.8%이다. 문제 5의 크기가 큼에도 불구하고, 전송수요 R_i값과 심볼당 비트수가 특정한 짝수를 갖는 경우, z_{LP}/z_{IP}는 99.6%이다. 그러므로 전송수요 R_i와 비트수/심볼이 특정한 짝수 값일 경우, 일반적으로 선형계획 완화문제로 구한 하한은

표 1. 문제 (12)에 대한 선형계획법 완화 및 Lagrangian dual 기법의 비교
Table 1. Comparison of OFDM with LP relaxation and Lagrangian dual.

Problem	1	2	3	4	5
size (m, n, k)	(5, 64, 4)	(10, 128, 4)	(10, 128, 4)	(10, 128, 8)	(20, 512, 5)
$\frac{z_{LP}}{z_{IP}}$	100.00%	100.00%	98.45%	96.80%	99.60%
$\frac{z_{LB}}{z_{LP}}$	100.00%	100.00%	99.99%	99.95%	99.99%
# outer iter.	12	13	16	17	21
CPU time (sec)	0.2	0.485	0.5	0.703	3.266
R_i and C	even	even	arbitrary	arbitrary	even
integer sol.	I	I	F	F	F

표 2. 첫 번째 모의실험에서 사용된 파라미터들의 요약
Table 2. Summary of the parameters used in the first simulations.

사용자 k	1			2			3			4			5		
데이터 전송율	192			128			64			64			64		
Power [dB]	0	-3	-3	0	0	-3	0	-3	-3	0	0	-3	0	0	-3
Delay [μs]	0	0.25	0.125	0	0.5	1.0	0	0.25	1.25	0	0.50	1.00	0	0.25	1.25
Doppler 주파수 [Hz]	50			100			10			50			20		
부채널 번호 (개수)	1-32 (32)			33-64 (32)			65-96 (32)			97-112 (16)			113-128 (16)		
고정된 비트수	6			4			3			4			4		

정수 최적 목적함수값에 상당히 근접할 것으로 예상된다.

다음은 모의실험을 통하여 제안한 알고리즘의 성능을 검증하였다. 먼저 제안된 적응적으로 부채널, 비트수, 전력을 할당하는 방식과 기존의 사용자별로 부채널과 비트가 고정된 OFDM-FDMA의 성능을 비교하였다. $D=\{0,2,4,6\}$이 되는 MQAM (M-ary Quadrature Amplitude Modulation) 변조를 사용하는 시스템을 고려하였다. 즉, 심볼당 2, 4, 6 비트를 4-QAM, 16-QAM과 64-QAM의 변조 방식을 사용하여 전송한다고 가정하였다.

첫 번째 모의실험에서는 5명의 사용자를 가정하고, 각 사용자의 데이터 전송율로 OFDM 심볼당 192, 128, 64, 64, 64 비트를 임의로 정하였다. 각 사용자들의 전송 채널은 3개의 독립적인 Rayleigh 다중 경로로 구성되는 주파수 선택적 채널로 가정하고, MATLAB 함수를 사용하여 구현하였다. 표 2에 사용자 별 Doppler 주파수 및 경로별 delay와 경로의 평균이득을 정리하였다. 이러한 전송채널을 사용자 별로 1000개를 발생시켜 이를 사용하여 앞에서 언급된 방식을 사용하여 적응적으로 부채널과 비트, 전송전력을 할당하였다.

비교의 목적으로 사용된 OFDM-FDMA에서는 위의 데이터 전송율을 만족하도록 사용자별로 부채널에 각각 균등한 전송비트를 할당하고 이에 맞추어 부채널을 블록으로 할당하였다. 이에 대하여 표 2의 하단에 정리하였다. 할당된 비트수와 사용자에 해당되는 채널이득을 사용하여 전송신호전력을 계산하고 이를 전송된 비트수에 대한 평균 신호대잡음비를 계산하였다. 그림 2에 이를 도시하였다. 적응적 방식이 고정된 방식에 대하여 평균적으로 약 2.2dB 정도 우수한 것으로 나타나고 있다.

두 번째 모의실험에서는 사용자의 수를 2명으로 가정하고 사용자 1은 OFDM 심볼당 256 비트를, 사용자 2는 128 비트를 가정하였다. 채널 상황은 앞에서 언급한 표 2에 사용자 1과 2에 해당되며 1000개의 주파수 선택적 채널을 발생시켰다. 고정된 OFDM-FDMA 방식에서는 부채널을 사용자당 64개씩 할당하였으며 사용자 1의 경우 16-QAM 즉 4 비트이며, 사용자 2의 경우 4-QAM을 사용하였다. 성능 비교를 위해 두 개의 비트오율 곡선을 그림 3에 추가하였다. 그림에서 OFDM-FDMA의 경우에는 각 부채널이 동일한 수의 심볼당 비트수를 가지는 반면에, OFDM-ADAPTIVE with only bit의 경우에는 채널에 따른 적응적 전력 할당 알고리즘을 사용하지 않고 비트수만 적응적으로 할당한 경우이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 OFDM-FDMA와 OFDM-ADAPTIVE with only bit는 주파수 선택적

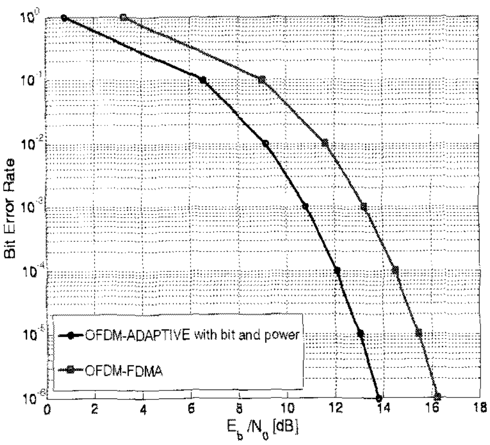


그림 2. 적응적 방식과 고정된 부채널 개수와 비트수를 사용하는 경우 (OFDM-FDMA)에 대하여 비트 오율에 따른 평균 비트에너지대 잡음비 (E_b/N_0)
Fig. 2. Average E_b/N_0 according to bit error rates for the adaptive scheme and the fixed numbers of subchannels and bits (OFDM-FDMA).

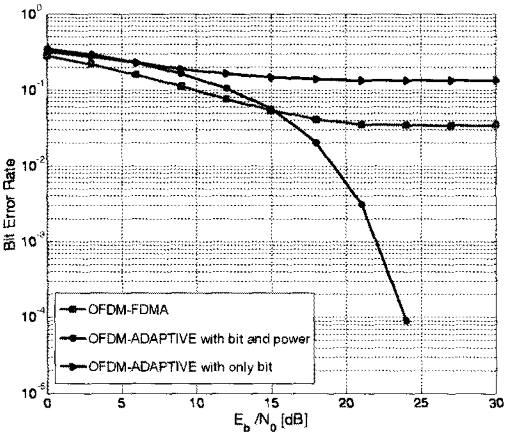


그림 3. 2명의사용자에 대하여 부채널, 비트, 전력 할당을 사용하는 적응적 전송방식과 고정된 OFDM-FDMA 및 비트 할당만 사용한 시스템의 비트 오율 성능
Fig. 3. Bit error rate performances of the adaptive scheme with subchannl, bit and power allocation, the fixed OFDM-FDMA, and the adaptive scheme with only bit allocation.

채널로 인한 error floor effect를 보여준다. 제안된 알고리즘의 경우에는 높은 E_b/N_0에 대하여 나머지 두 개의 알고리즘에 비해 우수한 성능을 보여준다. OFDM-ADAPTIVE with only bit의 성능이 OFDM-FDMA의 성능보다 열악한 이유는 OFDM-FDMA에서는 고정된 비트로 2와 4 비트만을 사용하는 반면에 비트 할당에서는 6 비트 즉, 64-QAM을 사용하여 잡음에 대하여 민감도가 상대적으로 높기 때문이다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 다중 사용자 OFDM 환경하의 적응적 부채널 및 비트 할당문제를 0-1 정수계획법 문제로 형성하고, 원래 문제의 선형계획법 완화문제에 대하여 부채널별로 분할 가능하고 선형계획법 완화문제와 동등한 하한을 갖는 Lagrangian dual 문제를 개발하였다. 단순한 piecewise linear concave 함수로 표현된 Lagrangian dual 문제는 subgradient 알고리즘을 사용하여 목적함수값을 계산하였다. 사용자 및 부채널의 수가 작은 문제의 경우 전송수요값 R_i와 허용 가능한 심볼당 비트수가 특정한 짝수 값을 갖는 경우, Lagrangian 여미의 하한은 원래문제의 최적 목적함수값과 일치하였다. 또한 모의실험에서 고려한 5문제의 경우 Lagrangian dual의 하한이 원래문제의 목적함수값에 대하여 95% 이상의 성능을 보여주었다.

또한, 제안된 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 비트 오율을 계산하는 모의실험을 수행한 결과, 제안된 알고리즘이 비트수와 부채널이 고정된 방식을 사용한 경우보다 높은 E_b/N_0에 대하여 우수한 성능을 나타내었다.

참 고 문 헌

[1] A. Aggarwal, and T. H. Meng, "A convex interior-point method for optimal OFDM PAR reduction," *Proc. IEEE International Conference on Communications*, Vol.3, pp.1985-1990, 2005.

[2] I. Kim, H. L. Lee, B. Kim, and Y. H. Lee, "On the use of linear programming for dynamic subchannel and bit allocation in multiuser OFDM," *Proc. IEEE Global Communications Conf.*, Vol.6, pp.3648-3652, 2001.

[3] W. Rhee and J. M. Cioffi, "Increasing in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation," *Proc. IEEE Int. Vehicular Tech. Conf.*, Vol.2. pp.1085-1089, 2000.

[4] Z. Shen, J. G. Andrews, and B. L. Evans, "Optimal power allocation in multiuser OFDM systems," *Proc. IEEE Global Communications Conf.*, Vol.1, pp.337-341, 2003.

[5] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.17, pp.1747-1758, 1999.

[6] D. S. Hochbaum, and J. G. Shanthikumar, "Convex separable optimization is not much harder than linear optimization," *Journal of the ACM*, Vol.37, pp.843-862, 1990.

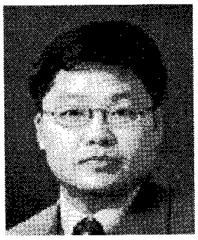
[7] E. L. Johnson, and M. W. Padberg, "A note on the knapsack problem with special ordered sets," *Operations Research Letters*, Vol.1, pp.18-22, 1981.

[8] S. Boyd, and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004.

[9] Nemhauser, G. L, and L. A. Wolsey, *Integer*

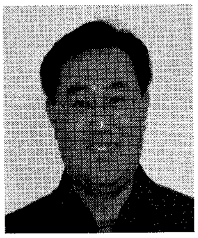
and Combinatorial Optimization, Wiley, 1996.
〔10〕 H. D. Sherali, G. Choi, and C. H. Tuncbilek, "A variable target value method for nondifferentiable optimization," *Operations Research Letters*, Vol.26, pp.1-8, 2000.

박 태 형 (Taehyung Park) 정회원



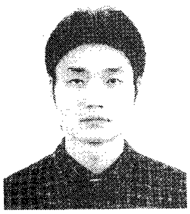
1986년 2월 고려대학교 산업공학과 학사
1989년 2월 고려대학교 산업공학과 석사
1998년 6월 Virginia Tech 산업시스템공학과 박사
2001년~현재 숭실대학교 산업정보시스템공학과 부교수
<관심분야> 정수계획법, 비선형계획법, 통신네트워크

임 성 빈 (Sungbin Im) 정회원



1986년 2월 서울대학교 전자공학과 학사
1988년 2월 서울대학교 전자공학과 석사
1994년 12월 University of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터공학과 박사
1995년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 정교수
<관심분야> 비선형 신호처리, 통신 시스템, 디지털 방송 시스템

서 만 중 (Manjung Seo) 정회원



2005년 6월 한국교육개발원 정보통신공학과 학사
2007년 8월 숭실대학교 정보통신공학과 석사
2007년 9월~현재 숭실대학교 정보통신공학과 박사과정
<관심분야> OFDM PAPR 감소기법, DVB-T 시스템, Super-RENS 시스템, 비선형 신호처리