

논문 2008-45TC-1-8

OFDMA 시스템에서 비율적 전송률 분배를 위한 자원 할당

(A New Resource Allocation with Rate Proportionality Constraints in OFDMA Systems)

한 승엽*, 오 은 성*, 한 명 수*, 홍 대 식**

(Seungyoup Han, Eunsung Oh, Myeongsu Han, and Daesik Hong)

요 약

본 논문에서는 직교 주파수 분할 다중 접속 방식 (OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access)에서 전송률의 비율적 제한 조건 (Constraint)이 고려된 자원 할당 방식에 대해 논의한다. 제안된 자원 할당 방식은 비트 오류율, 전송 전력 및 전송 비율 등에 관한 제한 조건 하에서 사용자들이 요구하는 다양한 서비스를 만족하면서 최대의 시스템 전송률을 얻기 위한 최적화 문제를 다룬다. 본 문제에 관한 최적의 해 (optimal solution)는 상당히 복잡하므로 부 채널 할당과 전력 할당을 나누어 복잡도를 낮춘 부 최적 해 (Suboptimal solution)를 제안한다. 먼저, 각 사용자에게 할당될 부 채널의 수를 사용자들의 평균 신호 대 잡음비와 전송률 비율을 기반으로 결정한다. 이어서 사용자에게 할당될 부 채널은 변형된 max-min 알고리즘에 따라 결정되고 이를 기반으로 최적화 문제에 대한 Lagrange dual 문제의 해를 구하는 최적의 전력 할당 방식을 제안한다. 또한 보다 낮은 복잡도를 갖는 전력 할당을 위해 반복적 전송 비율 검출 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 모의실험을 통해 본 논문에서는 제안하는 알고리즘이 사용자 간의 전송률에 관한 공평성 (fairness)을 정확히 만족하면서 시스템의 전송률을 극대화할 수 있음을 분석한다.

Abstract

In this paper, a new adaptive resource allocation scheme is proposed in orthogonal frequency-division multiple access (OFDMA) systems with rate proportionality constraints. The problem of maximizing the overall system capacity with constraints on bit error rate, total transmission power and rate-proportionality for user requiring different classes of service is formulated. Since the optimal solution to the constrained fairness problem is extremely complex to obtain, a low-complexity suboptimal algorithm that separates subchannel allocation and power allocation is proposed. Firstly, the number of subchannels to be assigned to each user is determined based on the users' average signal-to-noise ratio and rate-proportion. Subchannels are subsequently distributed according to the modified max-min criterion. Lastly, based on the subchannel allocation, the optimal power allocation by solving the Language dual problem is proposed. Additionally, in order to reduce the computational complexity, iterative rate proportionality tracking algorithm is proposed for maximizing the capacity together with maintaining the rate proportionality constraint.

Keywords : OFDMA, Resource Allocation, Rate Proportion

I. 서 론

* 학생회원, ** 평생회원, 연세대학교 전기전자공학부
(Departuer of Electrical and Electronic Enginnering,
Yonsei University)

※ 본 과제(결과물)는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실 지원사업의 연구결과임.

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 육성 지원 사업의 연구결과로 수행되었습니다.

접수일자: 2007년9월20일, 수정완료일: 2008년1월15일

최근 차세대 다중 사용자 광대역 통신시스템에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 직교 주파수 분할 다중 접속 방식 (OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 기법은 다중 사용자가 서로 다른 부 채널을 통해 동시에 신호를 전송하는 방식이다. 이 방식은 주파수 선택적 페이딩 현상과 협대역 간섭에 강하고 사용자간 효율적인 자원분배 능력으로 인

해 차세대 광대역 무선 다중 접속 방식으로 제안되고 있다^[1~2]. 특히, OFDMA 기법에서 효율적인 자원 할당은 시스템 성능을 개선할 수 있는 기술 중에 하나로 최근 많은 주목을 받고 있다.

하지만 대부분의 자원 할당에 관한 논의는 시스템 전송률의 극대화 (RA: Rate Adaptive) 또는 송신 전력의 최소화 (MA: Margin Adaptive)라는 두 가지의 내용에 초점을 두어왔다. Jang과 Lee는 송신 전력과 비트 오류율 (BER: Bit Error Rate)에 관한 제한 조건을 두고 시스템의 전송률을 최대화하는 자원 할당 방식을 제안하였다^[3]. 이 논문에 따르면 부 채널 할당에 관해서는 높은 채널 이득을 갖는 사용자에게 해당 부 채널을 할당하여야 하며, 전력 할당은 water-filling 방식^[4]을 이용하는 것이 전송률 극대화를 위해 최적의 방식임을 증명하였다. 하지만 이와 같은 방식은 시스템 내의 사용자들 사이에 공평성 (Fairness)을 고려하지 않기 때문에 다양한 서비스를 음영 지역 없이 제공하려는 차세대 무선 기술로는 적합하지 못하다. Rhee와 Cioffi는 이와 같이 OFDMA 시스템에서 사용자 간 공평성을 유지할 수 있는 자원 할당 방식을 다루었다^[5]. 여기서는 부 채널 할당을 위해 max-min 알고리즘을 사용하며 이는 가장 낮은 전송률로 서비스를 받고 있는 사용자에게 자원 할당의 우선권을 주는 방식으로 모든 사용자가 동일한 전송률을 얻을 수 있도록 한다. 하지만 max-min 알고리즘은 다양한 서비스 품질 (QoS: Quality of Service)을 요구하는 최근의 트렌드에는 부합하지 않는다. 더욱이, 사용자들 사이에 동일한 전송률을 얻기 위해 높은 채널 이득을 갖는 사용자의 스펙트럼 효율을 감소시켜야 함으로 시스템 성능 측면에서 비효율적이다. 따라서 사용자 간의 다양한 QoS를 보장하면서 전송률을 극대화할 수 있는 자원 할당 알고리즘의 개발이 필요하게 된다. 이에 trade-off를 보이는 두 가지 성능 파라미터를 모두 고려한 알고리즘의 개발이 최근에 논의되어지고 있다^[6-7].

본 논문에서는 전송률의 비율적 배분에 관한 제한 조건을 만족하면서 시스템 전송률을 최대화하는 알고리즘을 제안한다. 부 채널 할당은 [5]의 max-min 알고리즘을 이용해 새로운 형태의 알고리즘을 개발한다. 또한, 주어진 부 채널 할당 결과를 바탕으로 두 가지 전력 할당 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 제안된 알고리즘이 사용자 간의 전송률에 관한 공평성을 정확히 만족하면서 시스템의 전송률을 극대화할 수 있음을 분석과 실험을 통해서 증명한다.

II. OFDMA 전송 모델 및 최적화 문제 형성

본 논문에서는 K 명의 사용자가 있는 하향 링크 OFDMA 시스템을 다룬다. 전체 대역폭 B 는 N 개의 협대역 직교 부 채널로 나누어지며 각 부 채널은 서로 다른 사용자에게 공유되어지지 않으며 사용자의 전송 비트는 M-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)으로 변조되어진다. n 번째 부 채널을 갖는 k 번째 사용자의 채널 이득은 $g_k[n]$ 으로 나타내며 수신단에서 가우시안 잡음은 $\sigma^2 = N_0B/N$ 의 분산을 갖는다. 여기서 N_0 는 잡음의 전력 스펙트럼 분포를 나타낸다. 따라서 부 채널의 신호 대 잡음비 (SNR: Signal to Noise Ratio)는 $h_k[n] = g_k[n]^2/\sigma^2$ 이고 k 번째 사용자의 송신 전력이 $p_k[n]$ 일 때, n 번째 부 채널의 수신 SNR은 $\gamma_k[n] = p_k[n]h_k[n]$ 가 된다. 또한 M-QAM의 BER은 수신 SNR $\gamma_k[n]$ 과 전송 비트 수 $c_k[n]$ 의 함수로 나타낼 수 있는데 이는 다음과 같다.

$$BER_{MQAM}(\gamma_k[n]) \approx 0.2 \exp\left[\frac{-1.6\gamma_k[n]}{2^{c_k[n]} - 1}\right] \quad (1)$$

위 식을 $c_k[n]$ 에 대해서 풀면

$$c_k[n] = \log_2(1 + \beta\gamma_k[n]) = \log_2(1 + p_k[n]H_k[n]), \quad (2)$$

여기서, $\beta = -1.6/\ln(5BER)$ 이고 계산되어진 부 채널의 SNR은 $H_k[n] = \beta h_k[n]$ 이다.

이 때, 본 논문에서 다루어질 최적화 문제는 다음과 같이 만들어지게 된다.

$$\max_{P_k[n], \rho_k[n]} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_k[n] \log_2(1 + p_k[n]H_k[n]) \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_k[n] \leq P_{total} \\ p_k[n] \geq 0 \quad \forall k, n \\ \rho_k[n] = \{0, 1\} \quad \forall k, n \\ \sum_{k=1}^K \rho_k[n] = 1 \quad \forall n \\ R_1 : R_2 : \dots : R_K = \alpha_1 : \alpha_2 : \dots : \alpha_K \end{cases}$$

식 (3)에서 첫 번째 제한 조건은 전체 전송 전력 P_{total} 의 상한선을 나타낸다. 세 번째 제한 조건에서 $\rho_k[n]$ 은 0 혹은 1의 값을 갖으며 이 함수는 k 번째 사용자에게 n 번째 부 채널의 할당여부를 나타낸다. 마지막 제한 조건에서 R_k 는 k 번째 사용자의 요구 전송률을

나타내며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log_2(1 + p_k[n]H_k[n]). \quad (4)$$

미리 정해진 전송 비 제한 조건 집합 $\{\alpha_k\}_{k=1}^K$ 은 사용자들 사이에서 비율적으로 공평한 전송률을 보장하기 위해 정해진다. 만약 식 (3)에서 모든 α_k 가 같은 값을 갖는다면 식 (3)의 목적함수는 최소의 capacity를 제공 받는 사용자의 capacity를 최대화^[5]하는 목적함수와 동일하게 된다.

III. 제안된 부 채널 할당과 전력 분배

식 (3)에 대한 최적의 해를 얻기 위해서 부 채널과 송신 전력 할당은 동시에 수행되어야 한다. 그러나 기지국에서 최적의 해를 얻기에는 높은 복잡도의 계산이 요구되며 채널이 바뀔 때마다 이를 수행하기는 어렵다.

그러므로 여기서는 부 채널과 송신 전력 할당을 나누어 수행하여 최적화될 파라미터를 줄임으로써 복잡도를 낮추도록 한다.

1. 부 채널 할당 알고리즘

본 장에서는 사용자간에 전송 비의 제한 조건을 만족하면서 효율적으로 전송률을 최대화할 수 있는 부 채널 할당에 대해 논의한다. 제안된 알고리즘은 [5]의 부 채널 할당을 기반으로 한다. 하지만 [5]와 달리 채널 이득이 높은 부 채널을 갖는 사용자의 전송률에 손

실이 없도록 평균 채널 이득과 현재의 전송률 분포를 고려한다.

가. Step I: 사용자에게 할당될 부 채널의 수 결정

Step I에서는 각 사용자에게 할당될 부 채널의 수 N_k 를 먼저 구한다. k 번째 사용자의 평균 채널 이득이 $H_k = \sum_{n=1}^K |H_k[n]|^2 / N$ 일 때, 정규화 된 k 번째 사용자의 채널 이득을 $\tilde{H}_k = H_k / \sum_{k=1}^K H_k$ 으로 정의하자. 이 때 사용자들에게 할당될 부 채널의 수는 다음과 같이 결정된다.

$$N_k = \lceil \tilde{\alpha}_k \tilde{H}_k N \rceil, \quad \forall k \quad (5)$$

여기서, $\lceil m \rceil$ 은 m 보다 큰 최소의 정수이고, $\tilde{\alpha}_k$ 는 정규화 된 전송 비 $\tilde{\alpha}_k = \alpha_k / \sum_{k=1}^K \alpha_k$ 를 나타낸다. Step I에서는 채널 이득이 높은 사용자 그리고 높은 전송 비 제한 조건을 갖는 사용자가 다음 부 채널을 받을 우선권을 갖는다.

나. Step II: 부 채널 할당 알고리즘

제안하는 부 채널 알고리즘은 그림 1에 정리되어 있다. 식 (3)의 최적화 문제를 보다 간소화하기 위해 여기서는 모든 부 채널에 동일한 전력 할당을 먼저 가정한다. 다시 말해, $p_k[n] = P_{total} / N$ 의 전력을 각 부 채널에 할당한다. 제안하는 부 채널 할당 알고리즘은 높은 수신 SNR을 갖는 부 채널을 사용하며 또한 할당받아야 할 전송률에 비해 가장 적은 전송률로 서비스 받고 있는 사용자에게 부 채널 할당의 우선권을 준다.

그림 1의 a)에서 모든 변수들은 초기화 된다. K 는 전체 사용자의 집합을 나타내며 a)과정에서 공집합으로 초기화된다. 집합 K 의 원소의 개수는 $N(K)$ 로 표시되며 현재 iteration에서 k 번째 사용자의 전송률과 부 채널 할당 집합은 각각 R_k 와 A_k 로 각각 표현된다. 초기 할당에서 가장 높은 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있으므로 b)와 c)에서 사용자들은 최대의 채널 이득을 갖는 하나의 부 채널을 각각 할당받는다. d)에서 g)까지의 단계에서는 매 iteration마다 주어진 전송 비 제한 조건에 비해 가장 낮은 전송률로 서비스 받고 있는 사용자가 최대의 채널이득을 갖는 부 채널을 할당받을 우선권을 갖는다.

부 채널 할당 알고리즘은 동일 전력 할당의 가정에서 시작되었으므로 각 사용자들은 대강의 전송 비 제한조

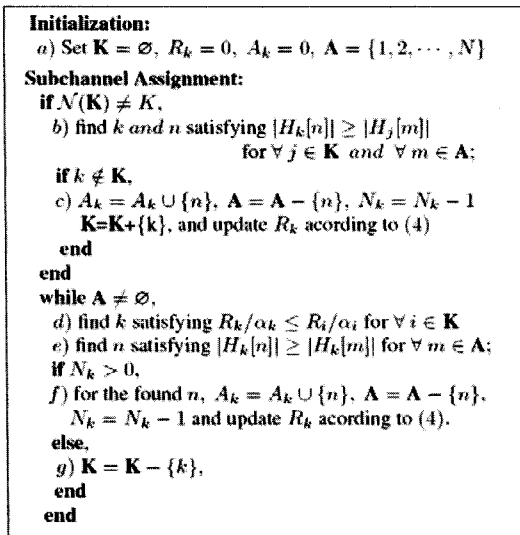


그림 1. 부 채널 할당 알고리즘.
Fig. 1. Subchannel allocation algorithm.

건만을 만족하게 된다. 따라서 보다 정확한 제한 조건을 만족하기 위해 본 논문에서는 두 가지의 전력 할당 알고리즘을 제안한다.

2. 전력 할당 알고리즘

가. Lagrange dual problem를 이용한 알고리즘

부 채널 할당 후, 식 (3)의 최적화 문제는 주어진 constraint를 만족하면서 시스템 전송률을 최대화할 수 있는 변수 $p_k[n]$ 을 구하는 것으로 다음과 같이 간략화 된다.

$$\max_{p_k[n]} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n \in A_k} \log_2(1 + p_k[n]H_k[n]) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K \sum_{n \in A_k} p_k[n] \leq P_{total} \\ A_1, A_2, \dots, A_K \text{ are all disjoint} \\ A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_K = \{1, 2, \dots, N\} \\ R_1 : R_2 : \dots : R_K = \alpha_1 : \alpha_2 : \dots : \alpha_K \end{cases}$$

식 (6)의 최적화 문제는 다음의 Lagrange dual problem과 동가이므로 식 (6)을 최대화 하는 것은 다음을 최대화하는 것과 동일하다.

$$L = \sum_{k=1}^K \sum_{n \in A_k} \frac{1}{N} \log_2(1 + p_k[n]H_k[n]) \quad (7)$$

$$+ \lambda_1 \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n \in A_k} p_k[n] - P_{total} \right)$$

$$+ \sum_{k=2}^K \lambda_k \left(\sum_{n \in A_1} \frac{1}{N} \log_2(1 + p_1[n]H_1[n]) \right.$$

$$\left. - \frac{\alpha_1}{\alpha_k} \sum_{n \in A_1} \frac{1}{N} \log_2(1 + p_k[n]H_k[n]) \right)$$

여기서 $\{\lambda_i\}_{i=1}^K$ 는 Lagrange 상수이다. 식 (7)을 미분하여 $p_k[n]$ 에 관하여 미분하고 이를 0으로 놓으면 다음을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial L}{\partial p_1[n]} = \frac{1}{Nn2} \frac{H_1[n]}{1 + p_1[n]H_1[n]} + \lambda_1 \quad (8)$$

$$+ \sum_{k=2}^K \lambda_k \frac{1}{Nn2} \frac{H_1[n]}{1 + p_1[n]H_1[n]} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_k[n]} = \frac{1}{Nn2} \frac{H_k[n]}{1 + p_k[n]H_k[n]} + \lambda_1 \quad (9)$$

$$+ \frac{\alpha_1}{\alpha_k} \lambda_k \frac{1}{Nn2} \frac{H_k[n]}{1 + p_k[n]H_k[n]} = 0$$

위 식 (8)과 (9)를 정리하면

$$\frac{H_k[m]}{1 + p_k[m]H_k[m]} = \frac{H_k[n]}{1 + p_k[n]H_k[n]} \quad (10)$$

여기서 모든 사용자와 해당 사용자의 부 채널 집합 A_k 에 대해 $H_k[1] \leq H_k[2] \leq \dots \leq H_k[N_k]$ 이라 가정하면 식 (10)은 다음과 같이 정리된다.

$$p_k[n] = p_k[1] + \frac{H_k[n] - H_k[1]}{H_k[n]H_k[1]} \quad (11)$$

식 (11)은 k 번째 사용자의 n 번째 부 채널에 할당되어질 전력을 나타낸다. 여기서 k 번째 사용자에게 할당되어질 전체 전력을 $P_{k,total}$ 이라고 정의하면 모든 사용자에게 대해서 다음이 성립한다.

$$P_{k,total} = \sum_{n=1}^{N_k} p_k[n] = N_k p_k[1] + \sum_{n=2}^{N_k} \frac{H_k[n] - H_k[1]}{H_k[n]H_k[1]} \quad (12)$$

$\{P_{k,total}\}_{k=1}^K$ 이 구해지면 식 (11)과 (12)를 이용하여 전력 할당을 수행할 수 있게 된다. 따라서 여기서는 식 (6)에서의 전체 전력 및 전송률의 비율에 관한 제한 조건을 이용하여 $\{P_{k,total}\}_{k=1}^K$ 를 구하도록 한다. 식 (10)과 (12)를 이용하면 식 (6)의 전송률의 비율에 관한 제한 조건은 모든 사용자에게 대해서 다음과 같이 정리된다.

$$\alpha_1 : \alpha_k = \frac{N_1}{N} \left(\log_2 \left(1 + H_1[1] \frac{P_{1,total} - B_1}{N_1} \right) + \log_2 C_1 \right) \quad (13)$$

$$: \frac{N_k}{N} \left(\log_2 \left(1 + H_k[1] \frac{P_{k,total} - B_k}{N_k} \right) + \log_2 C_k \right)$$

여기서, $B_k = \sum_{n=2}^{N_k} (H_k[n] - H_k[1]) / (H_k[n]H_k[1])$ 이고 $C_k = \left(\prod_{n=2}^{N_k} H_k[n] / H_k[1] \right)^{1/N_k}$ 이다.

추가로, 전체 전력 제한 조건은 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^K P_{k,total} = P_{total} \quad (14)$$

식 (13)과 (14)를 통해 총 K 개의 식에 K 개의 변수 $\{P_{k,total}\}_{k=1}^K$ 를 찾아야 하는 K 원 1차 방정식으로 모델링된다. 일반적으로 위의 해를 구하는 것은 Newton - Raphson 방식과 같은 비 선형문제를 푸는 수식적 방식이 요구된다.

나. 순환적 전송 비 검출 방식을 이용한 전력 할당 알고리즘

본 논문은 위의 Lagrangian dual 방식을 이용한 전력 할당 알고리즘의 해를 구하는 데 요구되는 복잡도를 간소화하기 위하여 다음과 같은 저 복잡도 알고리즘을 제안한다. 이미 부 채널 할당에서 모든 부 채널마다 동일한 전력을 할당하였으므로 전력 할당 알고리즘을 수행하기 전에는 각 사용자가 할당된 부 채널의 수에 비례만큼의 전력을 할당받고 있다. $\tilde{R}_k = R_k / \sum_{k=1}^K R_k$ 로 각 사용자마다 정규화 된 전송률을 정의하자. 본 전력 할당 알고리즘은 사용자들 사이에 정규화 된 전송률 \tilde{R}_k 를 $\tilde{\alpha}_k$ 와 동일하게 유지시키는데 그 목적이 있다.

그림 2를 통해서 확인할 수 있듯이 \tilde{R}_k 와 $\tilde{\alpha}_k$ 의 최대 차이가 ϵ 보다 작을 때까지 제안된 전력 할당 알고리즘은 수행된다. 그림 2의 b)를 통해서 현재 자신의 전송 비율 제한 조건에 비해서 가장 많은 전송률로 서비스를 받게 되는 사용자 (k_{max})와 가장 적은 전송률로 서비스를 받고 있는 사용자(k_{min})를 각각 정한다. 이 때, 그림

Initial Power Allocation
 a) $p_k[n] = P_{total}/N$ for $\forall n \in \mathbf{A}$
 (already allocated in subchannel allocation)

Rate Proportionality Tracking
while $\max_k \|\tilde{R}_k - \tilde{\alpha}_k\| \geq \epsilon$,
 b) $k_{max} \leftarrow \arg \max_{k \in \mathbf{K}} (R_k / \alpha_k)$
 $k_{min} \leftarrow \arg \min_{k \in \mathbf{K}} (R_k / \alpha_k)$
 c) $\Delta R_{dec} \leftarrow R_{k_{max}}(p_{k_{max}}[n]) - R_{k_{max}}(p_{k_{max}}[n] - \Delta p)$
 $n_{min} \leftarrow \arg \min_{n \in \mathbf{A}} (\Delta R_{dec} / \Delta p)$
 $\Delta R_{inc} \leftarrow R_{k_{min}}(p_{k_{min}}[n] + \Delta p) - R_{k_{min}}(p_{k_{min}}[n])$
 $n_{max} \leftarrow \arg \max_{n \in \mathbf{A}} (\Delta R_{inc} / \Delta p)$
 d) update $p_{k_{max}}[n_{min}] \leftarrow p_{k_{max}}[n_{min}] - \Delta p$,
 $p_{k_{min}}[n_{max}] \leftarrow p_{k_{min}}[n_{max}] + \Delta p$
 update $R_{k_{max}}, R_{k_{min}}$ according to (4).
end

그림 2. 순환적 전송 비 검출방식을 이용한 전력 할당 알고리즘.

Fig. 2. Power allocation algorithm with rate proportion tracking.

표 1. 정규화 된 전송률 비율 및 오차 (K=8)

Table 1. Normalized rate constraint deviation (K=8).

index (m)	0	1	2	3	4	5	6
$\alpha_1 = 2^m$	1	2	4	8	16	32	64
$\alpha_1 = \dots = \alpha_K$	1	1	1	1	1	1	1
전력할당 II	0.0023	0.0026	0.0022	0.0018	0.0021	0.0015	0.002
전력할당 I	0.0021	0.0028	0.0013	0.0011	0.0024	0.0017	0.0015
Capa-Maximization [3]	0.8848	0.7825	0.2247	0.3867	0.5453	0.6633	0.7377

2의 c)를 통해 k_{max} 에게 Δp 에 해당하는 전력을 k_{min} 에게 재 할당하게 된다. 이와 같은 전력 재 할당을 통해 전송률을 극대화하기 위해서 k_{max} 에게 전송률 감소가 되는 부 채널 n_{min} 을 선택하여 이 부 채널에서 Δp 의 전력을 k_{min} 의 전송률 증가가 최대가 되는 부 채널 n_{max} 로 재 할당하게 된다.

이와 같은 과정은 그림 2의 d)에 제시되어 있다.

IV. 모의실험 결과

본 논문에서는 지수 함수적으로 감소하는 주파수 선택적인 레일리 (Rayleigh) 다중 경로 페이딩 채널을 사용한다. 전체 전송 전력은 1W, 1MHz 대역폭 환경에서 총 64개의 부 채널을 갖는 OFDMA 시스템을 고려한다. 최소 비트 오류 요구치는 10^{-3} 이며 두 번째 전력 할당 알고리즘에서 사용하는 Δp 는 10^{-3} W로 사용한다. 모든 실험 결과는 5×10^4 번의 채널을 발생시켜 평균을 취하였다. 또한, 본 논문에서 제안된 전력 할당 방식 중 Lagrangian dual 방식을 이용한 첫 번째 알고리즘은 power allocation I로 전송률 비 검출 알고리즘은 power allocation II로 표시한다.

그림 3은 제안된 자원 할당 방식이 얻을 수 있는 전송률 이득을 표 1에 제시된 서로 다른 전송률 비 인덱스 (m)의 변화에 따라 다양한 자원 할당 방식과 비교하였다. 그림에 제시된 TDMA 시스템에서는 각 사용자가 모든 부 채널을 할당받게 되며 각 부 채널에는 동일한 전력을 전송하게 된다. 8명의 사용자 환경에서 2번

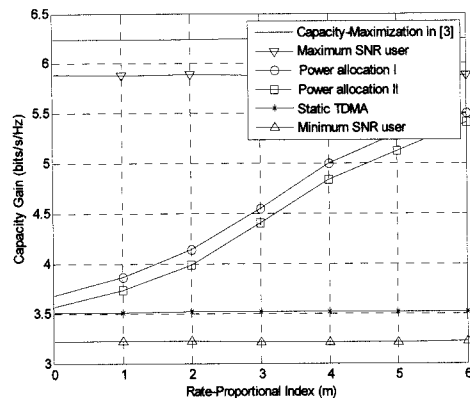


그림 3. 전송률 비율 constraint 인덱스 (m)에 따른 전송률 이득.

Fig. 3. Capacity gains according to the rate-proportional constraints index (m).

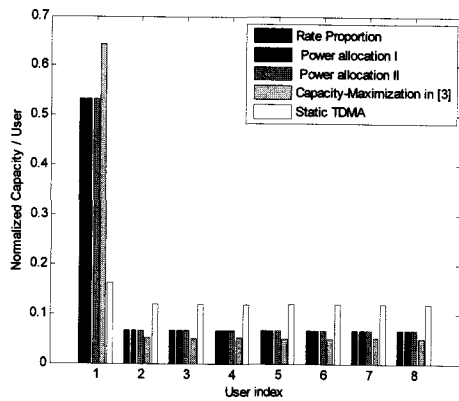


그림 4. 사용자들의 정규화 된 전송률 분포
($K=8, \alpha_1=8, \alpha_2=\dots=\alpha_8=1$)

Fig. 4. Normalized capacity distribution among users.
($K=8, \alpha_1=8, \alpha_2=\dots=\alpha_8=1$).

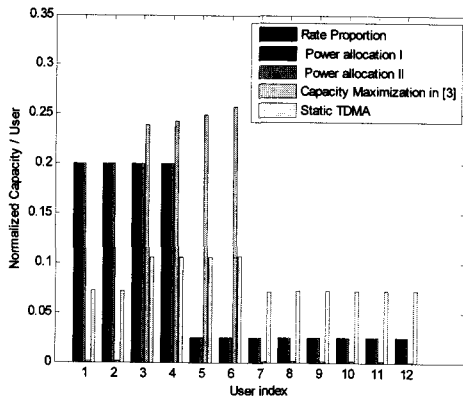


그림 5. 사용자들의 정규화 된 전송률 분포
($K=16, \alpha_1=\dots=\alpha_4=8, \alpha_8=\dots=\alpha_{12}=1$)

Fig. 5. Normalized capacity distribution among users.
($K=16, \alpha_1=\dots=\alpha_4=8, \alpha_8=\dots=\alpha_{12}=1$)

제 사용자에서부터 마지막 8번째 사용자의 평균 채널 이득은 동일한 반면 첫 번째 사용자의 평균 채널 이득은 다른 7명의 사용자에 비해 10dB 높은 환경에서 실험하였다. 그림 3을 통해서 확인 할 수 있듯이 [3]에서 제안된 시스템 전송률 최대화 알고리즘은 높은 채널 이득을 갖는 사용자에게 보다 많은 자원을 할당하므로 가장 높은 전송률 이득을 얻게 된다. 하지만 [3]의 알고리즘이 전송비에 관한 제한 조건이 존재할 경우, 이에 적응적으로 자원을 할당하지 못하고 항상 일정한 전송률 이득을 나타낸다. 이에 반해 제안된 알고리즘은 전송률 비 인덱스 (m)가 변화함에 따라 제한 조건을 만족하면서 효율적으로 자원을 할당하고 있음을 확인할 수 있다. 한편 power allocation I은 power allocation II에 비해 약 0.2 bits/s/Hz의 전송률 이득을 얻고 있는데 이는 제안된 부 채널 할당 알고리즘에 대해 최적화된 전력을

할당하고 있기 때문이다.

그림 4는 인덱스 m 이 3일 때 정규화 된 전송률 분포를 나타내고 있다. 제안된 알고리즘은 [3]의 알고리즘과 달리 전송비에 관한 제한 조건을 정확히 유지하고 있다. 전송비에 대한 정확도를 측정하기 위해 다음과 같이 실제 각 사용자의 전송률과 정의 된 전송 비의 제한 조건의 정규화 된 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$D = \sum_{k=1}^K |\bar{R}_k - \bar{\alpha}_k| / \max \sum_{k=1}^K |\bar{R}_k - \bar{\alpha}_k| \quad (15)$$

위의 식을 통해 얻은 정규화 된 오차를 표 1 정리하였다. [3]의 알고리즘은 매우 큰 오차를 나타내고 있는 반면 제안된 자원 할당 알고리즘은 전송비에 관한 제한 조건을 10^{-3} 의 범위 내에서 만족하고 있다.

그림 5는 사용자의 전송률 비가 $\alpha_1=\dots=\alpha_4=8$ 와 $\alpha_5=\dots=\alpha_{12}=1$ 으로 총 12명의 사용자 환경에서 제안된 알고리즘의 정규화 된 전송률 이득을 나타내고 있다. 그림 4와 달리 3번째 사용자에서 6번째 사용자까지의 평균 채널이득이 다른 사용자들보다 10dB 높은 환경을 고려하였다. 첫 번째 사용자와 2번째 사용자는 낮은 평균 채널 이득을 갖는 환경임에도 불구하고 높은 전송률을 요구하고 있다. 반면 5번째 사용자와 6번째 사용자는 높은 평균 채널 이득을 갖고 있음에도 불구하고 낮은 전송률을 요구한다. 이와 같은 비대칭적인 채널 이득 환경에서도 제안된 알고리즘은 전송 비율에 관한 제한 조건을 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 전송 비율에 관한 constraint가 있는 OFDMA 시스템에서 효율적인 자원 할당 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 자원 할당 알고리즘은 평균 채널 이득과 전송 비율에 관한 constraint를 기반으로 각 사용자에게 할당될 부 채널의 수를 구한다.

이에 따라 지정된 제한 조건에 비해 가장 적은 전송률로 서비스 받고 있는 사용자에게 자원 할당의 우선권을 주는 방식으로 부 채널 할당을 수행한다. 또한 Lagrangian dual 방식을 이용한 최적의 전력 할당 방식과 전송 비 검출 알고리즘을 이용한 방식의 두 가지 전력 할당 알고리즘을 제안한다. 제안된 전력 할당 방식은 사용자간의 사용자 간의 정확한 전송 비를 유지함과 동시에 전송률을 최대화할 수 있도록 자원 할당을 수행한다. 실험 결과를 통해서 제안된 알고리즘은 다양한

제한 조건 환경에서 효율적으로 자원을 분배할 수 있으며 전송률과 사용자 간의 공평한 분배에 있어 적절한 균형을 맞출 수 있음을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] E. Lawrey, "Multiuser OFDM," in *Proc. Int. Symp. Signal Processing and Its Applications*, Brisbane, Australia, pp. 761-764, 1999.

[2] 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.

[3] 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.

[4] R. G. Gallager, "Information Theory and Reliable Communication," New York: Wiley, 1968.

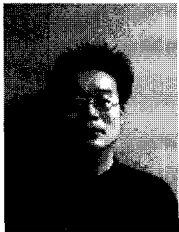
[5] W. Rhee and J. M. Cioffi, "Increase in Capacity of Multiuser OFDM System Using Dynamic Subchannel Allocation," in *proc. IEEE Veh. Tech. Conf.*, Tokyo, Japan, pp. 1085-1089, May 2000.

[6] Z. Shen, J. G. Andrews, and B. L. Evans, "Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional fairness," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, pp. 2276-2737, Nov. 2005.

[7] C. Mohanram and S. Bhashyam, "A sub-optimal joint subcarrier and power allocation algorithm for multiuser OFDM," *IEEE Commun. Letters*, vol. 9, pp. 685-687, Aug. 2005.

[8] X. Qiu and K. Chawla, "On the performance of adaptive modulation in cellular systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, pp. 884-895, Jun. 1999.

저 자 소 개



한 승 엽(학생회원)
2002년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.
2004년 연세대학교 전기전자 공학과 석사 졸업.
2004년~현재 연세대학교 전기전자공학자공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 이동 통신, 간섭 제거, UWB, 다중 반송파 시스템>



한 명 수(학생회원)
1994년 해군사관학교 기계공학과 학사 졸업
2003년 연세대학교 전기전자 공학과 석사 졸업
2005년~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 통신신호처리, Ad-Hoc, MMR>



오 은 성(학생회원)
2003년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.
2006년 연세대학교 전기전자 공학과 석사 졸업.
2006년~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 이동 통신, 자원 할당, 다중 반송파 시스템>



홍 대 식(정회원)
1990년 Purdue University Electrical Engineering 박사 졸업.
1991년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수.

<주관심분야 : 디지털 통신, 통신 신호 처리, 4G 시스템, 다중 반송파 시스템>