

논문 2007-44TC-9-2

# 다중 사용자 OFDM 시스템을 위한 개선된 부반송파 할당 알고리즘

( Improved Subcarrier Allocation Algorithm for Multiuser OFDM  
Systems )

이 재 윤\*, 윤 동 원\*, 박 상 규\*, 현 광 민\*\*

( Jaeyoon Lee, Dongweon Yoon, Sang Kyu Park, and Kwangmin Hyun )

## 요 약

본 논문에서는 제한된 자원 하에서 최대한 많은 사용자의 QoS를 만족시키면서 전체 데이터 전송률 및 스펙트럼 효율을 최대화 하는 부반송파 할당 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 먼저, BER, 사용자의 최소 요구 데이터 전송률, 채널 이득 정보를 이용하여 서비스를 받을 수 있는 사용자들의 후보를 미리 정하여 보다 안정적인 서비스가 이루어질 수 있도록 하였으며, 그 다음, 그 후보 사용자에게 부반송파를 할당하고, 전송 가능한 전체 데이터 율의 감소가 최소화되도록 재 할당한다. 제안된 부반송파 할당 알고리즘은 기존 알고리즘에 비해 더 많은 사용자를 지원하며, 우수한 성능의 스펙트럼 효율 및 전체 데이터 전송률을 갖는다.

## Abstract

In the multiuser OFDM systems, an efficient resource allocation is necessary in order to provide the service to more users. This paper proposes an improved subcarrier allocation algorithm, satisfying each user's QoS under the limited resources, to maximize total transmission data rate and spectral efficiency. The proposed algorithm is divided into two steps. In the first step, users who are eligible for services are determined by using BER, user's minimum data rate requirement, and channel information. In the second step, first, subcarriers are allocated to users on the basis of channel state. And then, reallocation is fulfilled so that the total transmission data rate is maximized and the least reduction in the overall throughput is caused.

**Keywords :** Multiuser OFDM system, Resource allocation, Spectral efficiency, BER

## I. 서 론

주파수 선택적 채널 환경에서의 다중 사용자 OFDM 시스템에서는 사용자들이 각각 독립적인 페이딩을 겪게 된다. 즉, 특정 부반송파에 대해서 모든 사용자가 동시에 깊은 페이딩을 겪게 될 확률은 매우 낮다. 따라서 한

사용자에서 특정 부반송파가 깊은 페이딩을 겪게 되더라도 다른 사용자에 대해서는 그 부반송파가 깊은 페이딩을 겪지 않는다. 결과적으로 좋은 채널 환경에 있는 사용자가 해당 부반송파를 이용하여 데이터를 전송할 수 있게 되어 다중 사용자 다이버시티 효과를 얻을 수 있고, 단일 사용자에 비해 대역폭을 효율적으로 사용할 수 있다.

최근, 이러한 다중 사용자 OFDM시스템에서 전반적인 채널의 상태를 고려하여 각 사용자에게 채널 상황과 전송 속도에 따라 적응적으로 자원을 할당 하는 알고리즘에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[3~7]</sup>. 먼저, 전력 효율에서 이득을 얻기 위하여 Wong은 랑그랑지안

\* 정희원, 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부  
(Dept. of Electronics & Computer Engineering  
Hanyang University)

\*\* 정희원, 강릉대학교 전기정보통신공학부  
(Dept. of Information & Communication  
Engineering, Kangnung National University)

접수일자: 2007년5월7일, 수정완료일: 2007년9월4일

완화법(LR: Lagrangian relaxation)을 제안하였다<sup>[3]</sup>. 랑그랑지안 완화법은 블록 할당이나 인터리빙 할당과 같은 고정된 할당 방식에 비해 소요되는 전력의 양이 적은 자원 할당 방식이지만, 실제 구현하거나 계산하는데 복잡도가 높다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 Kivanc는 비교적 계산이 간단하면서 전송 전력을 최소화 하는 방법을 제안하였다<sup>[4]</sup>. 그러나 할당에 필요한 연산 량이 시스템에서 사용되는 총 부반송파의 수와 사용자 수에 비례하여 증가되므로 여전히 높은 계산 복잡도를 가질 뿐만 아니라 시스템 전송 전력이 제한되는 시스템에 적용할 경우, 사용자가 증가함에 따라 급격한 성능저하가 발생하기 때문에 전송 전력이 제한되는 시스템으로의 적용이 힘들다<sup>[5]</sup>. 최근 들어, 최대 전송 전력이 제한된 시스템에서 Zhang은 사용자의 QoS(Quality of service)를 만족하면서 스펙트럼 효율을 최대화 하여 자원을 할당할 수 있는 알고리즘을 제안하였다<sup>[6]</sup>. Zhang은 전송 가능한 전체 비트율이 최대가 되도록 할당 한 다음, 각 사용자의 최소 요구 데이터 윌에 맞게 재 할당 하였다. 그러나 Zhang의 알고리즘은 각 부반송파에 대해 최대 채널 이득을 갖는 사용자에게 부반송파를 먼저 할당한 후 재 할당이 이루어져 사용자가 많아질수록 재 할당 가능한 여분의 부반송파가 줄어들어 서비스를 받지 못하는 사용자를 증가시킨다. 이로 인해, 서비스를 제공받을 만한 채널 상태에 놓여있지 못한 사용자도 부반송파를 할당받게 되어, 사용자가 증가함에 따라 사용자의 최소 요구 데이터 전송률보다 더 적은 비트를 할당 받은 사용자의 수가 증가하고, 이런 사용자들에게 먼저 할당되었던 부반송파는 낭비되므로 주파수 자원의 비효율적인 사용의 문제가 발생하며, 동일한 사용자에게 반복해서 재 할당을 해야 하는 경우에는 계산 복잡도가 증가한다. [7]에서는 이러한 Zhang 알고리즘의 문제를 해결하기 위한 해결방안을 제시하였으나, 사용자가 적을 경우에도 스펙트럼 효율이 낮아지는 문제를 갖는다.

본 논문에서는 기존 알고리즘이 갖는 문제들을 해결 하면서 제한된 전체 송신 전력 하에서 사용자의 QoS를 만족하면서 전체 데이터 전송률과 스펙트럼 효율을 최대화 하여 자원을 효과적으로 사용하는 알고리즘을 제안한다. 이를 위하여, 먼저, BER, 사용자의 최소 요구 데이터 전송률, 채널 이득 정보를 이용하여 서비스를 받을 수 있는 사용자들의 후보를 미리 정하여 보다 안정적인 서비스가 이루어질 수 있도록 하고, 그 다음, 그 후보 사용자에게 부반송파를 전송 가능한 전체 데이터

율이 최대가 되도록 할당한다. 또한 사용자들의 총 데이터 전송률을 최대 하기 위하여 사용자의 최소 요구 데이터 전송률과 실제 할당받은 부반송파로 보낼 수 있는 데이터 윌과의 차이가 작은 사용자부터 부반송파를 재 할당한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델에 대해서 기술하고 III장에서는 제안된 알고리즘을 설명한다. IV장에서는 모의실험 결과를 통해 제안된 알고리즘과 기존의 알고리즘의 성능을 비교 하여 분석하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는  $N$  개의 부반송파와  $K$  명의 사용자를 갖는 다중 사용자 OFDM 시스템을 고려하며, 전체 전송 전력은 제한되고, 송신단과 수신단에서 완벽한 채널 정보에 대해 알고 있다고 가정한다.

$k$  번째 사용자는 OFDM 심볼 당  $R_{\min}^k$  비트의 최소 요구 데이터 전송률을 요구한다고 가정하고,  $k$  번째 사용자에게 대한  $n$  번째 부반송파의 할당 지시 값으로  $\rho_{k,n}$  을 정의한다.  $k$  번째 사용자에게  $n$  번째 부반송파가 할당되었을 때  $\rho_{k,n} = 1$  이고, 그렇지 않으면  $\rho_{k,n} = 0$  이다. 또한, 한 명 이상의 사용자는 같은 부반송파를 이용하여 데이터를 전송할 수 없기 때문에  $n$  번째 부반송파에 대해서  $\rho_{k',n} = 1$  이면,  $k \neq k'$  인 모든 사용자에게 대하여  $\rho_{k,n} = 0$  이다.  $bit_{k,n}$  을  $k$  번째 사용자가 할당된  $n$  번째 부반송파를 이용하여 전송할 수 있는 데이터 윌로 가정하면,  $k$  번째 사용자에게 의해서 전송되는 전체 데이터 윌은 다음과 같다.

$$R_k^T = \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} bit_{k,n} \quad (1)$$

$k$  번째 사용자에게 할당된  $n$  번째 부반송파의 데이터 윌  $bit_{k,n}$  에 대한 수신 전력은 아래와 같다<sup>[4]</sup>.

$$f(bit_{k,n}) = P_{k,n} |H_{k,n}|^2 \quad (2)$$

여기서  $H_{k,n}$  은  $n$  번째 부반송파를 사용하는  $k$  번째 사용자의 채널 이득 값을 나타내고,  $P_{k,n}$  은  $k$  번째 사용자가  $n$  번째 부반송파를 이용하여  $bit_{k,n}$  비트를 전송하려 할 때 필요한 송신 전력이다.

$f(bit_{k,n})$  는  $bit_{k,n}$  에 따라 값이 증가하는 convex 함수이고 보통 M-QAM 시스템에서 아래와 같이 계산된다<sup>[3]</sup>.

$$f(bit_{k,n}) = \frac{N_0}{3} \left[ Q^{-1} \left( \frac{P_e(k)}{4} \right) \right]^2 (2^{bit_{k,n}} - 1) \quad (3)$$

여기서  $P_e(k)$ 는  $k$  번째 사용자가 요구하는 BER이고,  $N_0/2$ 는 가산 백색 가우시안 잡음(AWGN)의 양측 전력 스펙트럼 밀도이며,  $Q(x)$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \quad (4)$$

$bit_{k,n}$ 는 채널 이득 값  $H_{k,n}$ , 전송 전력  $P_{k,n}$ ,  $bit_{k,n}$  비트에 대한 수신전력  $f(bit_{k,n})$ 를 통해서 계산 될 수 있다. 이 때, 본 논문에서는 복잡도를 줄이기 위하여 전체 전송 전력을 모든 부반송파에 대해서 똑같이 분배하며, 분배되는 전송전력  $P_{k,n}$ 는 다음과 같다<sup>[6]</sup>.

$$\text{if } \rho_{k,n} = 1, \text{ then } P_{k,n} = \frac{P_{Total}}{N} \quad (5)$$

따라서  $bit_{k,n}$ 는 부반송파가 사용자들에서 할당되기 전에 모든 부반송파와 사용자에 대해서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$bit_{k,n} = \log_2 \left( \frac{3P_{Total}|H_{k,n}|^2}{NN_0 [Q^{-1}(P_e(k)/4)]^2} + 1 \right) \quad (6)$$

본 논문의 목표는 사용자가 원하는 최소 요구 데이터 전송률과 오류 확률을 만족하면서 전송 가능한 전체 데이터 윌 및 사용자들의 총 데이터 전송률이 최대가 되도록 부반송파 할당 방법을 제시하는 것이다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

i)

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} bit_{k,n} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} bit_{k,n} \geq R_{\min}^k \quad \forall k \quad (8)$$

$$\text{if } \rho_{k,n} = 1, \text{ then } \rho_{k',n} = 0 \quad \forall k \neq k' \quad (9)$$

ii)

$$\max \sum_{k=1}^K R_{\min}^k \varepsilon_{act}(k) \quad (10)$$

$$\text{where } \begin{cases} \varepsilon_{act}(k) = 1, & \text{for } \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} bit_{k,n} \geq R_{\min}^k \\ \varepsilon_{act}(k) = 0, & \text{for } \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} bit_{k,n} < R_{\min}^k \end{cases} \quad \forall k \quad (11)$$

여기서  $\varepsilon_{act}(k)$ 는 모든 부반송파 할당과정이 수행된 후 서비스를 제공받는 사용자(active 사용자), 즉 사용자 요구량이 만족된 사용자의 지시자로서  $\varepsilon_{act}(k) = 1$ 이면 만족됨을,  $\varepsilon_{act}(k) = 0$ 이면 불만족됨을 나타낸다.

### III. 제안된 자원 할당 알고리즘

전송 전력이 제한된 다중 사용자 OFDM 시스템에서 대역폭 효율을 최대화 하도록, [5]에서 제시된 것과 같이 알고리즘을 두 단계로 나누어서 부반송파를 할당한다. 첫 번째 단계에서는 사용자의 QoS, 전체 송신 파워와 채널정보를 동시에 고려하여 서비스를 받을 수 있는 사용자를 결정하고, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 결정된 사용자에게 스펙트럼 효율을 최대화 하도록 각 사용자에게 부반송파를 할당한다.

#### 1. step 1 : 서비스를 제공 받을 수 있는 사용자 결정

Zhang의 알고리즘은 각 부반송파에 대해 최대 채널 이득을 갖는 사용자에게 해당 부반송파를 먼저 할당한 후, 사용자가 요구하는 최소 요구 데이터 전송률이 만족되지 않은 사용자에게 재 할당이 이루어지기 때문에 사용자가 많아질수록 재 할당 가능한 여분의 부반송파가 줄어들어 서비스를 받지 못하는 사용자를 증가시킨다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 서비스 받을 수 있는 사용자를 우선 결정한다.

서비스를 받을 수 있는 사용자를 결정하기 위해 먼저 사용자당 평균 데이터 윌  $\overline{bit}_k$ 를 식(6)을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\overline{bit}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N bit_{k,n} \quad (12)$$

여기서 [5]에서와는 달리 사용자당 필요한 부반송파의 개수( $M_k$ )를 결정하는데 있어 복잡도를 줄이고 성능 개선을 위하여 다음과 같이 각 사용자의 최소 요구 데이터 전송률  $R_{\min}^k$ 을  $\overline{bit}_k$ 에  $bit_{k,n}$ 의 분산 값( $\sigma_k$ )을 더한 값으로 나누어 구한다.

$$M_k = \left\lceil \frac{R_{\min}^k}{bit_k + \sigma_k} \right\rceil, \quad \forall k \quad (13)$$

이와 같이  $M_k$ 를 결정하는 이유는 [5]에서처럼 한 부반송파에서 전송할 수 있는 최대 데이터 윌을 가지고 필요한 부반송파의 개수를 결정하게 되면 실제 필요한 것보다 더 적게 할당받아 성능이 저하되기 때문이다.

전체 부반송파가  $N$  개로 제한되어 있기 때문에 사용자가 증가하면 각 사용자당 필요한 부반송파 수의 합이 전체 부반송파 수를 넘게 되는 경우가 발생한다. 이 경우 모든 사용자에게 서비스를 제공할 수 없기 때문에 본 논문에서는 각 사용자당 필요한 부반송파 수  $M_k$ 를 더하여 그 합이 전체 부반송파 수  $N$ 을 넘으면 평균 채널 이득 값이 가장 작은 사용자를 서비스를 제공받을 사용자 후보 집합에서 제거한다. 이를 알고리즘으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{while } \sum_{k=1}^K M_k > N \text{ do} \\ & \quad k' = \arg \min H_k \quad \forall k \\ & \quad M_{k'} = 0 \\ & \quad \mathbb{K} = \mathbb{K} - \{k'\} \\ & \text{end while} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $H_k = \sum_{n=1}^N |H_{k,n}|^2 / N$ 으로 사용자당 평균 채널 이득을 나타내고,  $\mathbb{K}$ 는 서비스를 제공받을 사용자 후보 집합이다.

## 2. step 2 : 부반송파 할당

첫 번째 단계에서 서비스를 받을 수 있는 사용자가 결정되었다면, 그 사용자들에게 전송 가능한 전체 데이터 윌이 최대가 되도록 부반송파를 할당한다. 각 부반송파 당 step 1에서 결정된 모든 사용자에 대해  $bit_{k,n}$ 이 가장 큰 사용자를 찾아서 부반송파를 그 사용자에게 할당한다. 만약  $n$  번째 부반송파에 대해서  $k^*$  번째 사용자의 전송 가능한 데이터 윌이 제일 크다면 사용자  $k^*$ 에게  $n$  번째 부반송파를 할당 되고,  $\rho_{k^*,n} = 1$ 이 되며,  $k \neq k^*$ 인 모든 사용자에 대하여는  $\rho_{k,n} = 0$ 이다. 이러한 부반송파 할당 알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{for } n = 1 : N, \text{ do} \\ & \quad k^* = \arg \max (bit_{k,n}) \\ & \quad \rho_{k^*,n} = 1 \text{ and } \rho_{k,n} = 0 \quad \forall k \neq k^* \\ & \text{end for} \end{aligned} \quad (15)$$

위 알고리즘과 같이 할당된 부반송파는 부반송파 당 가장 큰 데이터 윌로 전송할 수 있기 때문에 전송 가능한 전체 데이터 윌이 최대가 된다. 하지만 특정한 사용자에게 많은 수의 부반송파가 할당되는 경우가 생기므로 첫 번째 단계에서 결정된 사용자 중 최소 요구 데이터 전송률을 만족하지 못하는 사용자가 나타난다. 그러므로 각 사용자의 최소 요구 데이터 전송률에 맞게 재 할당을 해야 한다. 일단 재 할당 과정이 수행되면 부반송파 이동으로 인하여 전송 가능한 전체 데이터 윌은 감소하므로 재 할당 과정은 될 수 있는 한 적어야 한다.

Zhang의 재 할당 알고리즘은 전송 가능한 데이터 윌의 감소를 최소로 하기 위하여 다음과 같은 비용 함수를 이용하여 그 값이 제일 작은 부반송파를 재 할당하며<sup>[6]</sup>,

$$e_{k,n} = \frac{(bit_{k^*,n} - bit_{k,n})}{bit_{k,n}} \quad (16)$$

첫 번째 단계에서 결정된 사용자를 차례대로 검색하여 최소 요구 데이터 전송률을 만족하지 못하는 사용자부터 실행한다. 그러나 Zhang의 알고리즘은 사용자가 요구하는 서비스를 제공하는데 필요한 부반송파의 수를 고려하지 않기 때문에 정작 적은 부반송파수의 재 할당 만으로도 만족 될 수 있는 사용자가 만족 안 되는 경우가 발생할 수 있다. 또한, 추가적인 한 개의 부반송파를 재 할당 받았을 경우 최소 요구 데이터 전송률을 만족시키지 못하면 또 다시 위 비용함수를 계산하여 최소의 비용 값을 갖는 부반송파를 재 할당받도록 되어 있기 때문에 높은 계산 복잡도를 갖는다. 본 논문에서는 이러한 계산 복잡도의 감소를 위해, 그리고 효율적인 스펙트럼 사용을 위해 재 할당 과정 시작 시 사용자가 원하는 최소 요구 데이터 전송률과 할당된 부반송파로 전송 가능한 데이터 윌 간에 차이가 가장 적은 사용자부터 재 할당 해준다.

먼저 재 할당을 위해 선택될 수 있는 부반송파의 집합  $\mathbb{R}$ 을 설정하고, 할당된 부반송파로 전송 가능한 전체 데이터 윌과 사용자가 원하는 최소 요구 데이터 전송률 간에 차이를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \mathbb{R} = \{1, 2, \dots, N\} \\ & d_k = \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} bit_{k,n} - R_{\min}^k \quad \forall k \in \mathbb{K} \end{aligned} \quad (17)$$

그 다음, 최소의  $d_k$ 를 갖는 사용자( $k^\#$ )부터 재 할당 과정을 수행한다. 여기서 사용자  $k^\#$ 의 차이 값  $d_{k^\#}$ 이

0보다 작다면, 우선, 사용자  $k^\#$ 가 본래 할당 받았던 부반송파를 재 할당 가능한 부반송파 집합  $\mathbb{R}$ 에서 제거시킨 다음, 모든 부반송파에 대해 위 식 (16)의 비용 함수를 이용하여 비용 값을 구한다. 이러한 과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 k^\# &= \arg \min_{k \in \mathbb{K}} d_k \\
 \text{if } d_{k^\#} < 0 \\
 \mathbb{R} &= \mathbb{R} - \{n_{k^\#}^*\} \\
 e_{k,n} &= \frac{bit_{k^*,n} - bit_{k^\#,n}}{bit_{k^\#,n}} \\
 \text{end}
 \end{aligned} \tag{18}$$

다음, 위 식 (18)의 결과로부터 비용 함수 값이 제일 작은 부반송파를 찾아 그 부반송파를 다음과 같이 할당할 수 있는 후보 부반송파로 선택한다.

$$n^\# = \arg \min_{n \in \mathbb{R}} e_{k,n} \tag{19}$$

부반송파를 재 할당하기 위해서는 그 선택된 부반송파의 본래 할당받은 사용자가 그 부반송파를 다른 사용자에게 주어도 본래 사용자의 최소 요구 데이터 전송률을 만족시킬 수 있는지 판단해야 한다. 즉 다음 식이 만족되면 재 할당을 수행한다.

$$\sum_{n=1}^N \rho_{k^*,n} bit_{k^*,n} - bit_{k^*,n^\#} \geq R_{\min}^{k^*} \tag{20}$$

만약 위 식 (20)이 만족되어 부반송파  $n^\#$ 이 재 할당 되면  $k$  번째 사용자에게 대한  $n$  번째 부반송파의 할당 지시 값  $\rho_{k,n}$ 이 다음과 같이 변경되어야 하며,

$$\rho_{k,n^\#} = 1 \text{ and } \rho_{k^*,n^\#} = 0 \tag{21}$$

재 할당된 부반송파는 재 할당 가능한 부반송파 집합  $\mathbb{R}$ 에서 제거되어야 한다. 또한 사용자  $k^\#$ 에 대한 차이 값  $d_{k^\#}$ 도 다음과 같이 새롭게 재 할당된 부반송파로 보낼 수 있는 데이터율이 더해진 값으로 되어야 한다.

$$\begin{aligned}
 \mathbb{R} &= \mathbb{R} - \{n^\#\} \\
 d_{k^\#} &= d_{k^\#} + bit_{k^\#,n^\#}
 \end{aligned} \tag{22}$$

여기서  $d_{k^\#}$ 이 0보다 작으면, 즉 추가적으로 하나의 부반송파를 더 할당 받아도 요구하는 최소 데이터 전송률이 만족되지 않으면, [6]에서 제시되었던 알고리즘과는 다르게 식 (19)에서 다시 최소의 비용 함수 값을 갖는

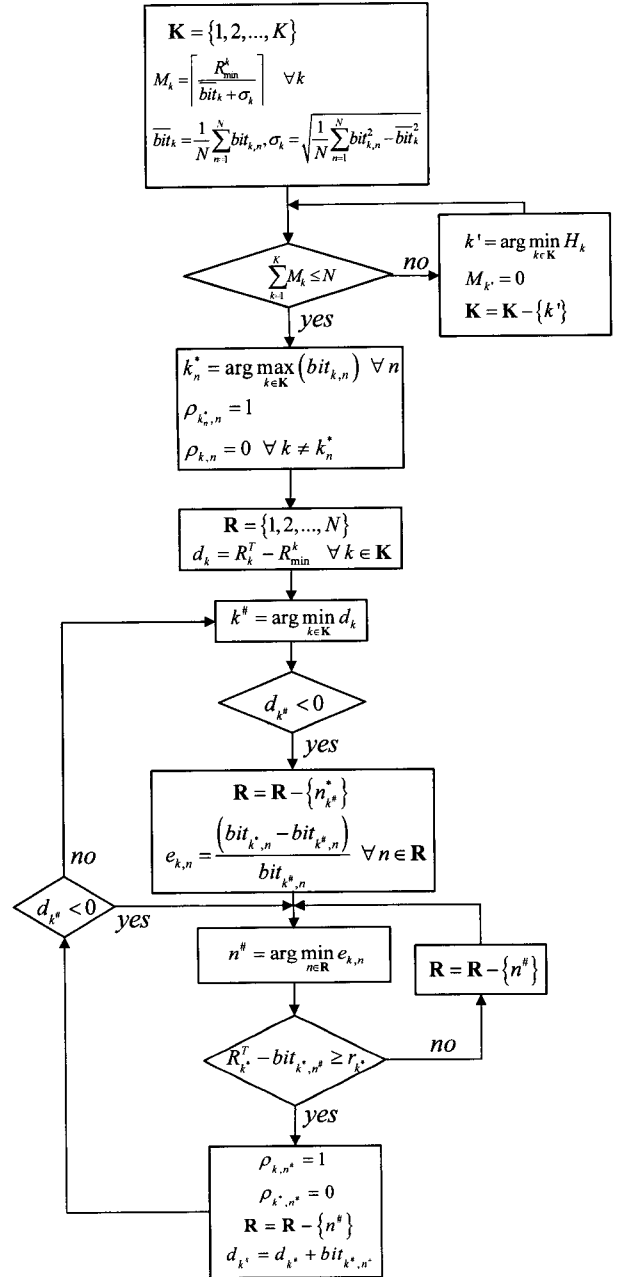


그림 1. 효율적인 부반송파 할당 알고리즘  
Fig. 1. Flow chart of the proposed algorithm.

부반송파를 찾아 재 할당하기 때문에 비용 함수 계산이 필요하지 않으므로 계산 복잡도를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 차이가 적은 사용자부터 재 할당 과정을 수행함으로써 본 논문에서 목적으로 하는 전송 가능한 전체 데이터율 및 사용자들의 총 데이터 전송률이 최대가 되도록 부반송파를 할당할 수 있다.

그림 1에는 본 논문에서 제안되는 효율적인 부반송파 할당 알고리즘을 나타내고 있다.

IV. 모의실험 결과

본 장에서는 제안된 알고리즘과 기존 Zhang의 알고리즘, 그리고 [7]에서 제시된 알고리즘에 대한 성능을 모의실험을 통해 비교·분석한다. 여기서 송신단과 수신단은 채널 정보를 완벽하게 알고 있다고 가정한다. 모의실험에서 사용자가 원하는 서비스는 voice, data, video 서비스로 가정하고, 각각의 최소 요구 데이터는 16, 32, 48bits/OFDM symbol로 설정한다. 또한 각 서비스를 원하는 사용자의 비율은 랜덤하게 분포되고, 동일한 비교를 위해 모든 사용자의 BER은  $10^{-6}$ 라고 가정한다. 모의실험에 사용된 파라미터는 다음의 표 1과 같다.

그림 2는 전체 사용자 중 서비스를 받지 못하는 사용자의 비, outage 확률을 보여주고 있다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 더 적은 최소 요구 데이터 전송률을 가진 사용자부터 부반송파를 재 할당 해주는 Lee의 알고리즘이 가장 좋은 성능을 보이고, 제안된 알고리즘은 Lee의

표 1. 모의실험 파라미터  
Table 1. Parameters for simulation.

사용자 수	1~50 명
부반송파 수	128 개
채널 환경	다중 경로(4 path) 레이레이 (Rayleigh) 채널 환경
사용자의 최소 요구 데이터 율	16, 32, 48 bits/OFDM symbol
변조 방식	MQAM
BER	$10^{-6}$

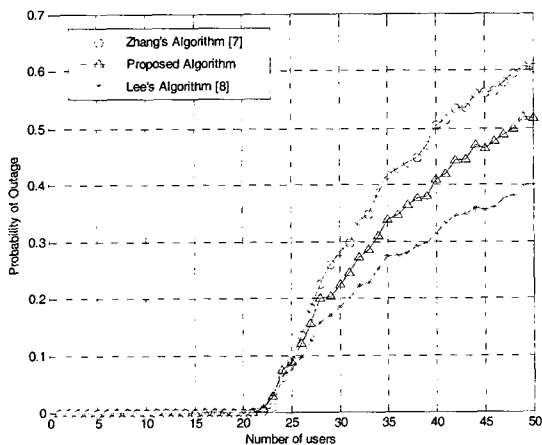


그림 2. outage 확률 비교  
Fig. 2. Comparison of outage probability.

알고리즘 보다는 못하지만 Zhang의 알고리즘보다 더 많은 사용자에게 서비스를 제공할 수 있다.

그림 3은 Zhang의 알고리즘과 제안된 알고리즘 간의 스펙트럼 효율을 보여준다. 여기서 스펙트럼 효율은 다음과 같이 구하였다.

$$S.E. = T/N \tag{23}$$

여기서  $T = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} bit_{k,n}$  이며, 전송 가능한 전체 데이터 율을 의미한다. 그림 3에서 알 수 있듯이 Zhang의 알고리즘은 사용자가 증가할수록 스펙트럼 효율이 점점 떨어지며, Lee의 알고리즘은 일정한 스펙트럼 효율을 유지하나 사용자가 적은 경우에 Zhang의 알고리즘보다 떨어지는 단점을 갖는다. 그러나 제안된 알고리즘은 결정된 사용자에게 부반송파의 낭비 없이 가능한

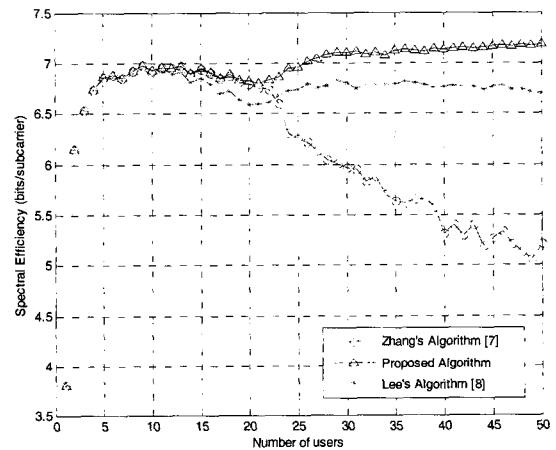


그림 3. 스펙트럼 효율 비교  
Fig. 3. Comparison of spectral efficiency.

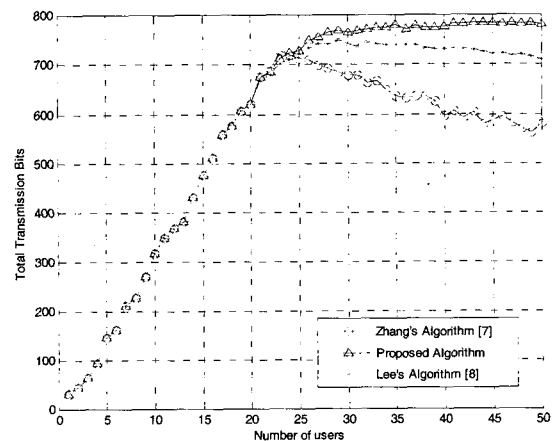


그림 4. 전체 전송 비트 수 비교  
Fig. 4. Comparison of total transmission bits.

전체 데이터율이 최대가 되도록 부반송파를 할당 및 재 할당하기 때문에 우수한 스펙트럼 효율을 일정하게 유지할 수 있고, outage 확률이 더 높은 경우에도 더 우수한 스펙트럼 효율을 나타낼 수 있다. 즉 다중사용자 다이버시티 효과를 극대화 할 수 있다.

그림 4는 Zhang의 알고리즘과 제안된 알고리즘 간의 전체 데이터 전송률을 비교한 것이다. 여기서 전체 데이터 전송률은  $b_{Total} = \sum_{k=1}^K R_{min}^k$  와 같이 서비스를 받

는 사용자들의 최소 요구 비트율의 합으로 계산된다. 그림 4에서 보듯이 Zhang의 알고리즘은 사용자가 증가할수록 전체 데이터 전송률이 떨어지는 반면 제안된 알고리즘은 일정한 전송률을 유지시켜주며, Lee의 알고리즘 보다 더 우수한 성능을 보인다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 제한된 전체 송신 전력 하에서 사용자의 QoS를 만족하면서 전체 데이터 전송률과 스펙트럼 효율을 최대화 하여 자원을 효과적으로 사용하는 알고리즘을 제안하였다. 이를 위하여 BER, 사용자의 최소 요구 데이터 전송률, 채널 이득 정보를 이용하여 서비스를 받을 수 있는 사용자들의 후보를 미리 정하여 보다 안정적인 서비스가 이루어질 수 있도록 하였으며, 그 후보 사용자에게 부반송파를 전송 가능한 전체 데이터 전송률이 최대가 되도록 할당하였다. 또한 전송 가능한 전체 데이터율의 감소가 최소화되도록 재 할당하였다.

제안된 알고리즘은 서비스를 받을 수 있는 사용자들 고려하여 부반송파를 할당하기 때문에 사용자가 증가하더라도 일정한 성능을 유지 할 수 있고, 미리 정해진 사용자에게 전체 데이터율이 최대가 되도록 부반송파를 할당함으로써 해서 부반송파의 낭비를 방지할 뿐만 아니라 전체 데이터 전송률과 스펙트럼 효율을 안정적으로 가져갈 수 있다. 따라서 제안된 알고리즘은 다중 경로 페이딩 채널에서 동작 하는 실제 시스템으로의 적용 시 우수한 성능을 나타낼 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. V. Nee, R. Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communication, Artech House, 2000.
- [2] R. Knopp and P. A. Humblet, "Information

- capacity and power control in single-cell multiuser communications," in Proc. IEEE ICC'95, vol. 1, PP. 331-335, Jun. 1995.
- [3] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief and R. D. Murch, "Multiuserwith adaptive subcarrier, bit and power allocation," IEEE J. Select. Areas commun., vol. 17. pp. 1747-1757, Oct. 1999.
- [4] D. Kivanc, G. Li, and H. Liu, "Computationally Efficient Bandwidth Allocation and Power Control for OFDMA," IEEE Trans. Wireless Commun., vol 2, no. 6, pp. 1150-1158, Nov. 2003.
- [5] J. Y. Lee, J. Lee, S. Cho, D. Yoon, S. K. Park, "Stable Subcarrier Allocation Algorithm of OFDM Systems for Multiuser Multimedia service," in Proc. ITC-CSCC 2006, vol. 3, pp. III-53-56, Chiang Mai, Thailand, July, 2006.
- [6] Y. J. Zhang, K. B. Letaief, "Multiuser Adaptive Subcarrier-and-Bit Allocation With Adaptive Cell Selection for OFDM System," IEEE Trans. wireless commun., vol. 3, no. 5, Sep. 2004.
- [7] 이정운, 윤동원, 박상규, "다중 사용자 OFDM 시스템에서의 효율적인 자원 할당 알고리즘," 한국통신학회 논문지, 무선통신, vol. 32, no. 4, pp. 334-350, 2007. 4.

## 저 자 소 개



**이 재 윤(정회원)**  
 2002년 대전대학교 정보통신  
 공학과 학사 졸업.  
 2004년 대전대학교 정보통신  
 공학과 석사 졸업.  
 2004년~현재 한양대학교  
 전자통신컴퓨터공학부  
 박사과정.

<주관심분야 : 디지털통신, OFDM 시스템>

**윤 동 원(정회원)**  
 대한전자공학회 논문지  
 제 43권 TC편 제 11호 참조

**박 상 규(정회원)**  
 대한전자공학회 논문지  
 제 43권 TC편 제 9호 참조



**현 광 민(정회원)**  
 1989년 한양대학교 전자통신  
 공학과 학사 졸업.  
 1995년 한양대학교 전자통신  
 공학과 석사 졸업.  
 2004년 한양대학교 전자통신  
 전파공학과 박사 졸업.

1995년~1996년 (사) 고등기술연구원

1997년~2001년 (주) 케이엠더블유

2004년~2005년 인텔 코리아

2005년~2006년 국립원주대학 정보통신과  
 전임강사

2007년~현재 강릉대학교 전기정보통신공학부  
 전임강사

<주관심분야 : 디지털통신, 이동통신, 통신신호처리>