

# 다중 사용자 OFDM 시스템에서의 효율적인 자원 할당 알고리즘

정희원 이정윤\*, 윤동원\*\*, 종신회원 박상규\*\*

## Efficient Resource Allocation Algorithm for Multiuser OFDM Systems

JungYoon Lee\*, Dongweon Yoon\*\* *Regular Members*, Sang Kyu Park\*\* *Lifelong Member*

### 요 약

최근 고속의 멀티미디어 서비스를 요구하는 추세에 따라 대역폭 효율이 높은 다중 사용자 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서 자원 할당 방법에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 모든 사용자가 각각의 최소 데이터 율과 일정한 오류 확률을 요구하는 멀티미디어 환경에서 시스템 성능을 향상시키기 위해서는 제한된 자원을 얼마나 효율적으로 활용할 수 있는지가 중요하다. 기존 방법에 비해서 서비스를 사용하지 못하는 사용자들에게 할당된 부반송파들을 서비스를 사용할 수 있는 사용자들에게 분배함으로써 부반송파를 더욱 효율적으로 사용할 수 있다. 제안된 자원 할당 방법은 기존의 방법에 비해 실제 사용자가 시스템을 이용할 수 있을 지 없을지 판단하기 위한 임시 저장 공간이 약간 증가하나 결과적으로 부반송파를 효율적으로 사용하여 더 많은 사용자가 시스템을 이용할 수 있다.

**Key Words** : Multiuser, OFDM System, Adaptive Allocation, Subcarrier Allocation, Multimedia

### ABSTRACT

Start after striking space key 2 times. Lately, a lot of researches have been done on the resource allocation for multiuser OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) systems due to its spectral efficiency for high-rate multimedia data services. For multimedia services in which every user is guaranteed to have minimum required bit rate and bit error probability, it is critical to utilize the limited resources efficiently to improve the performance of the system. The introduced allocation method improves spectral efficiency to use the left subcarriers in Zhang's algorithm. By using this method, the system can provide services to more users constantly, except for a bit increasing complexity and memory for deciding the left subcarriers and reallocating the subcarriers.

### I. 서론

최근 초고속 멀티미디어 서비스에서 요구되는 고속의 데이터 전송을 위한 변조 기술로서 여러 개의 반송파를 사용하는 다수 반송파 전송 기법의 일종

인 OFDM 방식이 각광받고 있으며 이 OFDM 방식은 4세대 변조 기술로 채택될 것으로 기대하고 있다. 초고속 멀티미디어 서비스를 위해서는 대역폭을 최대한 효율적으로 사용할 필요가 있으며, 이와 관련하여 적응적 변조 방식에 관련된 연구가 많이

\* 삼성전자 OS사업부 ISM 선형개발G (jungyoon2.lee@samsung.com), \*\* 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 (skpark@hanyang.ac.kr)  
논문번호 : KICS2007-02-074, 접수일자 : 2007년 2월 20일, 최종논문접수일자 : 2007년 3월 30일

이루어져 왔다<sup>[1]</sup>.

주파수 선택적(frequency selective) 페이딩 환경에서 다중 사용자 OFDM 시스템이 단일 사용자 방식에 비해 대역폭을 효율적으로 이용할 수 있다. 기존 단일 사용자 방식에서는 깊은(deep) 페이딩을 겪을 경우 해당 부반송파를 사용하지 않게 되어 결과적으로 주파수 자원의 낭비를 초래한다. 하지만, 다중 사용자 입장에서는 각 사용자마다 채널은 독립적이므로, 모든 사용자가 깊은(deep) 페이딩을 겪을 경우에만 채널이 사용되지 않으므로 상대적으로 대역폭을 효율적으로 사용할 수 있게 된다. 그러므로 다중 사용자 OFDM 시스템에서의 부반송파 및 전력 할당 기법에 관하여 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[2][3]</sup>.

단일 사용자를 위한 이산 위터 필링(discrete water-filling) 방식을 다중 사용자 시스템에 적용한 방법이 제안되었다<sup>[4]</sup>. 하지만 이 방법은 각 사용자마다의 QoS(Quality of Service)를 보장하지 못한다. Wahlqvist는 동적 자원 할당 방식을 제안하여 사용자마다의 QoS를 향상시켰지만 복잡도가 여전히 높다<sup>[5]</sup>. Wong은 라그랑지안 완화법(LR: Lagrangian Relaxation)을 통해 사용자의 QoS를 만족시키면서 동시에 전송 전력을 최소화시키는 방법을 제안하였다<sup>[6]</sup>. 하지만 상대적으로 시변(time-varying) 채널 환경에서 복잡도가 너무 높아 사용하기에는 거의 비실용적이다. Kivanc는 두 단계로 이루어진 할당 방법을 제안하여 기존에 비해 비교적 복잡도가 낮으면서 좋은 성능을 유지하는 방법을 제안하였다<sup>[7]</sup>. Kivanc가 제안한 할당 방법은 첫 번째로 각 사용자들의 요구 데이터 율과 SNR에 근거하여 사용자당 필요한 부반송파를 할당하였고, 그 다음 단계로 각 사용자마다 할당된 부반송파 수를 고려하여 가장 알맞은 채널을 분배한다. 하지만, 제안된 자원할당 방법의 경우에는 주어진 모든 사용자에게 서비스를 제공하기 위하여 부반송파를 전체 사용자에게 나누어 주는데 사용자가 분배가능한 부반송파 수 대비 어느 일정 수를 초과하게 되면 시스템을 이용하지 못하는 사용자의 수가 급감하는 단점이 있다.

그 후 Zhang은 채널당 전송 가능한 비트 수를 가지고 부반송파를 할당하는 방법을 제시하였다<sup>[8]</sup>. 이 알고리즘은 시스템이 최대로 전송할 수 있도록 부반송파를 할당한 뒤, 각 사용자의 최소 요구 데이터 율에 따라서 부반송파를 재할당한다. 채널 이득 값을 전송 가능한 비트 수로 변환해주는 과정에서 각 사용자에게 할당되어질 최적 전력이나 어느 사

용자의 어떤 채널이 사용될지 미리 알 수 없다. 따라서, 부반송파마다 전송될 수 있는 최적의 전송비트 수보다 작게 할당될 수 있지만, 기존 알고리즘들이 채널 이득을 직접 고려해 최적의 할당 조건을 찾는 과정에 비해 빠른 재할당 방법을 제시한다. 또한, 사용자 마다 필요한 부반송파 수가 정해지기 때문에 필요한 부반송파를 할당받은 사용자들은 안정적인 서비스를 받을 수 있다. 즉, 사용자의 수의 증가와 관계없이 할당받은 사용자들이 서비스를 이용할 수 있음에 따라 안정적인 시스템 성능을 유지한다.

본 논문에서는 Zhang 알고리즘의 재할당 과정에서 시스템을 이용하지 않는 사용자들에게 할당된 부반송파들을 재분배하여 시스템이 더 효율적으로 자원을 사용할 수 있도록 한다. Zhang의 재할당 과정은 할당받고 있는 사용자가 요구한 데이터율을 만족하지 못하면, 빠른 계산을 위하여 해당 사용자가 할당받은 모든 부반송파들을 시스템이 사용할 수 없도록 한다. 이렇게 낭비되는 부반송파들을 다른 후보 사용자들에게 재분배함으로써 부반송파 이용 효율을 높였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 이 논문에서 사용되는 OFDM 시스템 모델과 기존 부반송파 할당 알고리즘을 설명하고, 3장에서 제안된 알고리즘을 설명한다. 4장에서 모의실험을 통한 결과를 바탕으로 기존 방법과 비교, 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

## II. OFDM 시스템 모델과 기존 할당 방법

본 논문에서는  $N$ 개의 부반송파를  $K$ 명의 사용자가 사용하는 다중 사용자 OFDM 시스템을 기본 모델로 하며 시스템의 기본 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서 각각의 사용자에게 채널 상태(channel state) 정보와 송신단 사이에서 필요한 부반송파와 비트 할당 알고리즘 등에 관한 정보는 별도의 제어 채널을 통해서 송신단에서 완벽하게 알 수 있다고 가정한다. 또한 사용자들은 부반송파를 공유하여 데이터를 전송하지 않는다.

위와 같은 가정아래 Zhang은 최대 비트 수로 전송하면서 각 사용자들이 안정적으로 서비스를 사용할 수 있는 부반송파 할당 알고리즘을 제안하였다. Zhang의 부반송파 할당 방법은 우선 시스템이 가장 많은 데이터를 전송할 수 있도록 가장 많은 비트를 전송할 수 있는 부반송파들을 가진 사용자에게 할당한다. 다음 단계에서 각 사용자마다 서비스를 이

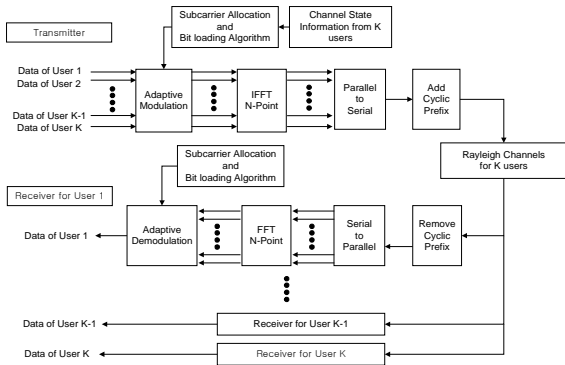


그림 1. 다중 사용자 OFDM 시스템 구조

용하기 위해서 요구하는 최소 데이터율을 만족시켜 주기 위하여 재할당을 해준다. 재할당 단계는 시스템 측면에서는 이미 최대 전송 비트를 위해서 할당 되어진 비트 수가 유지되거나 줄어들기 때문에, 재할당 과정은 감소되는 비트 수가 최소가 되도록 하면서 각 사용자의 최소 요구 데이터율을 만족시켜야한다. 이와 같은 알고리즘은 아래에서 설명한다.

단계 1) 전송 비트수가 최대가 되도록 선택한다.

$$\begin{aligned}
 k_n^* &\leftarrow \operatorname{argmax}(c_{k,n}) \text{ for all } n \\
 \rho_{k_n^*,n} &\leftarrow 1 \\
 \rho_{k,n} &\leftarrow 0 \quad \forall k \neq k_n^*
 \end{aligned} \tag{1}$$

단계 1)에서  $c_{k,n}$  은  $k$  번째 사용자가  $n$  번째 부반송파를 통하여 전송할 수 있는 비트 수이며,  $k_n^*$  은  $n$  번째 부반송파를 통하여 가장 많은 비트를 전송할 수 있는 사용자  $k^*$  를 가리킨다.  $\rho_{k,n}$  은  $k$  번째 사용자가  $n$  번째 부반송파를 사용하는 경우에는 1의 값을 사용하지 않을 때는 0의 값을 갖는다. 이는 사용자들이 한 부반송파를 공유할 수 없음을 뜻한다.

단계 2) 각 사용자의 데이터율을 보장하기 위해 재할당하며 고려되는 조건은 아래와 같다.

- ㄱ) 재할당을 통하여 부반송파를 이동시킬 때는 부반송파를 내어주는 사용자의 데이터율이 최소 요구 데이터율보다 높은 경우에만 가능하다. 즉, 사용자  $k_n^*$  가 부반송파를 내어줄때, 최소 전송 데이터율보다 작게 될 경우에는,  $R_{k_i} - c_{k_i,n} < R_{\min}^{k_i}$ , 재할당은 일어나지 않는다.
- ㄴ) 각 부반송파는 전체 전송 비트수를 가장 최

소로 감소시키는 방향으로 재할당된다.

- ㄷ) 재할당되는 횟수는 부반송파 이동에 따른 계산량 증가를 고려하여 최소화 해야한다. 조건 ㄱ)에 의해서 이 재할당 방법은 발산되지 않고 수렴된다는 것을 알 수 있다. 조건 ㄴ), ㄷ)은 아래와 같은 비용(cost) 함수로 표현할 수 있다.

$$e_{k,n} = \frac{(c_{k_n^*,n} - c_{k,n})}{c_{k,n}} \quad \forall n \tag{2}$$

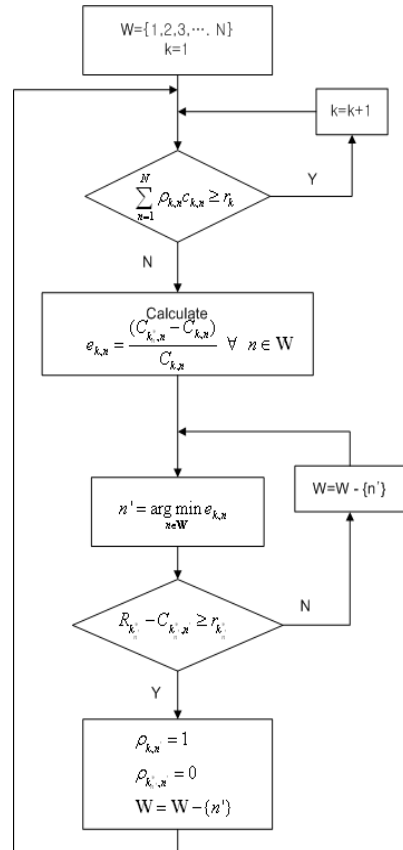


그림 2. Zhang의 재할당 알고리즘

부반송파 재할당은 사용자 순서대로 단계 1)에서 자원을 충분히 할당받지 못한 사용자부터 실행된다. 예를 들어  $k$  번째 사용자가 재할당 받을 경우 최소 cost 함수 값에 해당되는 부반송파  $n'$  을 사용자  $k$  로부터 받을 때 조건이  $R_{k_i} - c_{k_i,n'} > R_{\min}^{k_i}$  의 경우에만 이동된다. 즉, 부반송파 여유가 있는 사용자에게서만 부반송파를 받아온다. 여기서  $R_{k_i}$  는 부반송파

$n'$ 을 할당받은 사용자  $k'$ 가 단계 1)에서 할당 받은 데이터율의 총합이다.  $c_{k',n'}$ 는 사용자  $k'_n$ 가 다른 사용자에게 부반송파  $n'$ 을 전해주면서 감소하는 데이터율이다.  $R_{\min}^{k'_n}$ 는 사용자  $k'_n$ 의 최소 요구 데이터이다. 부반송파 재할당 과정은 재할당 대상자인 사용자  $k$ 가 재할당을 통하여 최소 데이터 율을 만족시키거나 더 이상 재할당할 부반송파가 남아있지 않을 때까지 계속된다. 단계 2는 아래 그림 2의 순서도에서 자세하게 볼 수 있다.

그림 2의 순서도에서  $\mathbf{W} - \{n\}$ 는 집합  $\mathbf{W}$ ,  $\{n\}$ 간의 연산 결과를 집합으로 나타낸 것으로써  $\{x | x \in \mathbf{W} \ \& \ x \notin \{n\}\}$ 을 의미한다.  $\mathbf{W}$ 는 재할당을 위해 선택되는 부반송파 집합이다.

위 알고리즘에서는 부반송파를 할당받았으나 결국 만족시키지 못한 경우  $\mathbf{W} = \mathbf{W} - \{n\}$ 로 다시 되돌려 주지 않고 낭비하게 되는 현상이 발생하며, 사용자의 순서를 고려하지 않음으로 인하여, 자원을 많이 요구하는 하는 특정 사용자로 인하여 전체 시스템 성능이 떨어지게 된다.

### III. 새로운 자원 할당 방법

Zhang은 기존 채널 이득 값을 그대로 이용하는 알고리즘에 비해서 전송가능 비트 수를 이용하기 때문에 계산 과정이 상대적으로 간단하다. 또한, Zhang 알고리즘은 서비스를 받는 각 사용자들의 최소 전송 데이터율을 만족시키는 동시에 최대 데이터 전송률로 전송하는 알고리즘임을 2장에서 살펴 보았다.

그러나 재할당 과정에서 부반송파가 낭비되는 경우가 발생하는데 아래와 같다.

CASE I) 재할당 과정에서 낭비되는 부반송파가 존재한다.

그림 2에서 재할당 과정이 진행될 때 한 번 이동된 부반송파는 다시 이동되지 않는다.  $\mathbf{W} = \mathbf{W} - \{n\}$ 의 형태로 전체 이동 가능한 부반송파 집합  $\mathbf{W}$ 에서 재할당된 부반송파  $n$ 을 전체 집합에서 제거해나간다. 그러므로 해당 사용자  $k$ 가 재할당을 통해 최소 요구 데이터율을 만족시키지 못한 경우  $\sum_{n=1}^N \rho_{k,n} + \sum n'$ 의 부반송파가 낭비된다. 여기서

$\sum_{n=1}^N \rho_{k,n}$ 는 사용자  $k$ 가 단계 1)에서 할당받은 부반송파 수이고,  $\sum n'$ 는 재할당 과정을 통하여 할당받은 부반송파 수이다.

CASE II) 재할당 순서가 임의로 시작되어 소수 사용자들에게 자원 할당이 집중되는 경우가 있다.

그림 2에서 재할당은  $k=1$ 로 시작하여  $k=k+1$ 로 증가되면서 순차적으로 재할당이 일어난다. 이때, 채널 상태가 좋지 않은 사용자가 먼저 재할당 과정을 거치면, 이 사용자의 부반송파당 전송 가능 비트 수는 다른 사용자에 비해 적기 때문에 많은 수의 부반송파 이동이 요구된다. 결국 소수 사용자에게 재할당이 집중되어 부반송파 이용 효율이 낮아진다.

본 논문에서는 위와 같은 2가지 문제점을 개선하여 적용함으로써 최적의 부반송파 분배 방법을 제시하였다. 우선 CASE I)의 경우, 해당 사용자가 재할당으로 인해 서비스를 받게 될 경우에만 부반송파 이동을 확정하면 재할당 후 사용자가 서비스를 받지 못하여 낭비되는 부반송파 수를 최소화할 수 있다. 이 부분을 순서도로 표현하면 아래 그림3과 같이 나타낼 수 있다.

CASE II)에서는 요구 자원의 양에 따라 사용자의 순서를 정하는 새로운 방법을 제시함으로써 기존의 문제점을 해결하였다. 실제로 각 사용자당 필요한 부반송파 수는 할당 과정에서 어떤 상태의 부반송파를 할당받느냐에 따라 정해지므로 미리 알기 어렵다. 하지만 몇 가지 가정을 통하여 간략 비교는 가능하다. 즉, 평균 채널이득  $H_k$ 을 이용하여 각 부반송파에 같은 전송전력이 분배될 경우 각 사용자마다 전송할 수 있는 비트 수  $C^*$ 를 구한다. 그 식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$C^* = \log_2 \left( \frac{P_{total}}{N} \cdot \frac{3}{N_0} \cdot \frac{H_k}{(Q^{-1}(BER(k)/4))^2} + 1 \right) \quad (3)$$

$H_k$ 는  $H_k = \left( \sum_{n=1}^N |H_k(n)|^2 / N \right)$ 을 나타내고,  $H_k(n)$ 은  $k$  사용자의  $n$  번째 부반송파의 채널 이득을 나타낸다.  $P_{total}$ 은 전체 전송 전력을 뜻하며,  $N$ 은 전체 부반송파 수를 의미한다.  $N_0$ 는 AWGN의 단방향 전력 스펙트럼 밀도를 의미한다.  $Q^{-1}(x)$ 는

$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$  에서 유도되며, 실제 계산량 때문에 Look-up Table이나 근사화하여 계산량을 줄인다. (7)(8)

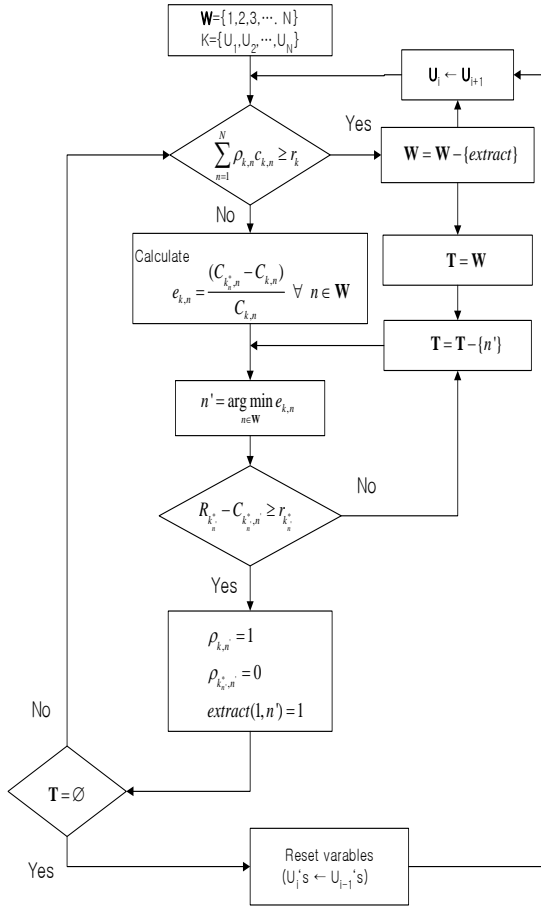


그림 3. 제안된 부반송파 할당 알고리즘

각 사용자당 요구하는 최소 데이터율  $R_{min}^k$  을 이용해 각 사용자마다 필요한 평균 부반송파를 구함으로써 적은 자원을 필요로 하는 사용자 순서를 결정할 수 있다.

$$M^k \leftarrow \left\lceil \frac{R_{min}^k}{C^k} \right\rceil \quad \text{if } C^k \neq 0$$

$$M^k \leftarrow N \quad \text{if } C^k = 0 \quad (4)$$

$$U \leftarrow \text{Sort}(M^k)$$

U에는 평균적으로 적은 부반송파 수를 필요로 하는 사용자 순으로 정렬이 되므로 소수 사용자 때

문에 전체 시스템 성능이 떨어지는 단점도 보완할 수 있으며 아래 그림 3에서 표현된다. 그림 3에서  $U_i$ 's  $\rightarrow U_{i-1}$ 's 은 현재 변수들의 값을 그 사용자가 서비스 받기 전의 상태로 되돌림을 의미한다.  $k = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\}$ 는 적은 부반송파를 필요로 하는 사용자 순서대로 정렬되었음을 뜻한다. 또한 T는 임시 저장소로써 사용자가 서비스를 받는 경우에만 실제 이동가능 부반송파 집합 W에서 이동된 부반송파를 제거한다.

본 논문에서 제시한 새로운 재할당 알고리즘은 낭비되는 부반송파를 활용함으로써 부반송파 이용 효율을 높였으며, 사용자 순서를 고려하여 서비스를 제공함으로써 몇몇 사용자들로 인하여 전체 시스템의 자원이 비효율적으로 쓰이는 현상도 해결하였다. 그러므로 Zhang의 알고리즘에 비하여 많은 수의 사용자에게 서비스를 제공하며, 더 많은 비트를 전송할 수 있다. 4장의 모의실험을 통하여 Zhang의 알고리즘과 성능을 비교, 분석해 보았다.

#### IV. 모의실험 결과

본 장에서는 다중 경로 레일레이(Rayleigh) 페이딩 환경에서 다중 사용자 OFDM 시스템을 구현하고 기존 방법과 제안된 방법 간의 성능을 모의실험을 통해 비교, 분석한다. 시스템의 기본 환경은 표 1과 같다. 수신단에서 채널 상태 정보(channel state information)를 완벽하게 알고 있다고 가정하며 기존 알고리즘과의 비교를 위해 BER을 모두  $10^{-6}$ 으로 고정하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

종류	값
사용자 수	1 - 100 명
부반송파 수	256 개
변조 방식	BPSK - 64QAM
채널 환경	4 path 레일레이 환경
도플러 주파수	200 Hz
데이터 종류	16, 32, 48 bits/unit time
BER	$10^{-6}$

그림 4에서 outage 확률은 전체사용자 중 서비스를 받지 못하는 사용자의 확률이다. 모의실험에서 16, 32, 48 bits/unit time의 각각 사용자 비율은 45, 27.5, 27.5 %의 비율로 랜덤하게 분포하도록 하였다. 한 부반송파가 최대로 전송할 수 있는 비트 수는 6비트로 가정하였다. 모의실험 결과는 채널 상

태가 랜덤하게 주어지는 100번의 모의실험을 통하여 실험의 평균값을 보여주고 시스템 한계 전력 PT 은 신호대 잡음비가 41 dB가 되도록 고정한다.

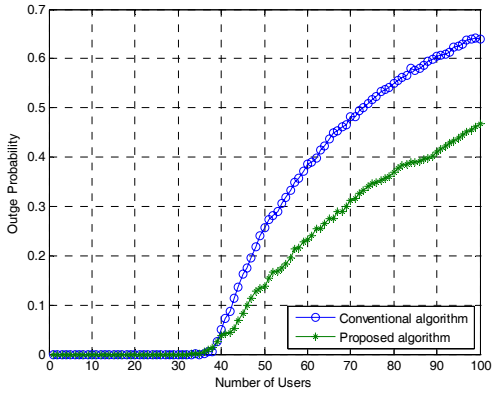


그림 4. 알고리즘 간의 outage 확률 비교

그림 4는 Zhang의 알고리즘과 제안한 알고리즘 간의 outage 확률 비교를 보여준다. 모의실험 결과를 통해 볼 수 있듯이 사용자수가 적을 경우에는 거의 유사한 성능을 보이다가 증가함에 따라 제안된 알고리즘이 더 많은 사용자를 지원함을 알 수 있다. 단순히 잉여 subcarrier를 재사용함에 따라서 40명이상 사용하는 상황에서부터 조금씩 성능차이가 나타나기 시작하여 100명의 사용자가 존재하는 시스템의 경우 약 15% 정도 더 많은 사용자에게 서비스를 제공함을 알 수 있다. 20%의 target outage 확률로 비교해 보았을 때 기존 알고리즘과 제안되는 알고리즘 사이에는 약 10명 더 많은 사용자 환경에서 제안된 알고리즘이 서비스를 제공함을 알 수 있다.

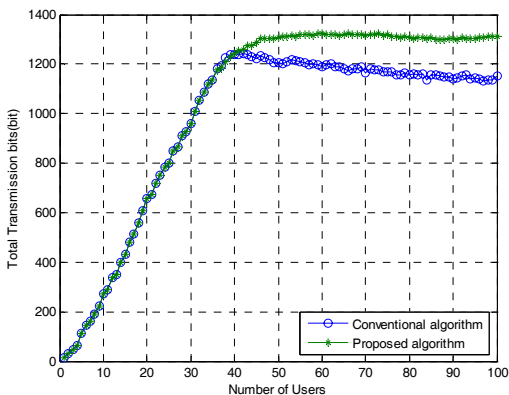


그림 5. 알고리즘 간 전체 전송 비트 비교

그림 5에서 알고리즘 간 전체 전송 비트 수를 비교하였다. 기존 Zhang의 알고리즘이 최대 전송 비트를 고려하였지만, 본 논문은 기존 알고리즘에서 낭비되는 부반송파를 이용함으로써 인하여 더 많은 데이터를 전송함을 볼 수 있다. 사용자가 100명인 시스템에서 약 10% 정도 많은 데이터 전송이 가능함을 확인할 수 있으며, 결국 같은 자원을 더 효율적으로 사용함을 알 수 있다.

## V. 결론

다중 사용자 OFDM 시스템에서는 한정된 자원을 가지고 더 많은 사용자들이 시스템을 사용하거나 더 많은 데이터를 전송하는 것이 곧 시스템의 성과와 연결된다. 사용자들이 안정적으로 시스템을 이용하는 동시에 최대 데이터 전송이 가능한 시스템을 위한 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘은 재할당 과정에서 시스템을 사용하지 않는 사용자들에 할당된 부반송파를 재분배하여 부반송파 이용 효율을 증가시켰다. 그리하여 더 많은 사용자에게 서비스를 제공할 수 있는 동시에 시스템 측면에서는 기존 알고리즘보다 부반송파를 더욱 효율적으로 사용할 수 있게 되어 더 많은 데이터를 전송할 수 있다. 이를 위해서 임시 저장 공간이 추가적으로 필요하나 부반송파 이용 효율을 높일 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서 제안된 방법은 BER이 서로 다른 다중 사용자 환경에도 쉽게 적용될 수 있으며, 서비스 혹은 사용자간 우선순위가 정해진 환경에도 쉽게 적용 가능하다. 그러므로 다중 사용자 OFDM 시스템에서 효율적인 부반송파 할당 방법이다.

## 참고 문헌

- [1] R. Prasad, *OFDM for Wireless Communications Systems*, Artech House, 2004.
- [2] P. Trifonov, E. Costa, and E. Schulz, "Adaptive user allocation, bit and power loading in multi-carrier systems", *In Proceedings of the 9th International OFDM-Workshop, Dresden, 2004*.
- [3] L. Hnazo, M. Munster, B. J. Choi, Thomas Keller, *OFDM and Mc-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting*, John Wiley & Sons, 2003.

- [4] H. Rohling, K. Bruninghaus, and R. Grunheid, "Comparison of multiple access schemes for an OFDM downlink system," in *Multi-Carrier Spread Spectrum*, K. Fazel and G. Fettweis, Eds. Norwell, MA: Kluwer, 1997, pp.23-30.
- [5] M. Wahlqvist et al., "Capacity comparison of an OFDM based multiple access system using different dynamic resource allocation," in *Proc. Vehicular Technology Conf. (VTC '97)*, vol. 3, pp. 1664-1668.
- [6] 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. 1747-1757, Oct. 1999.
- [7] 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.
- [8] Ying Jun Zhang, Khaled Ben Letaief, "Multiuser Adaptive Subcarrier-and Bit Allocation With Adaptive Cell Selection for OFDM Systems," *IEEE Trans. wireless commun.* vol. 3, NO. 5, September 2004.

**이 정 윤 (Jung Yoon Lee)**

정회원



2004년 2월 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부 졸업  
 2006년 2월 : 한양대학교 전자통신전파공학과 석사  
 2006년 3월~현재 : 삼성전기 OS사업부 근무 중  
 <관심분야> 이동통신

**윤 동 원 (Dongweon Yoon)**

정회원



1989년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 공학사  
 1992년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 공학석사  
 1995년 8월 : 한양대학교 전자통신공학과 공학박사  
 1995년 3월~1997년 8월 : 동서대학교 정보통신공학과 조교수

1997년 9월~2004년 2월 : 대전대학교 정보통신공학과 부교수  
 2004년 3월~현재 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 부교수  
 <관심분야> 디지털 통신, 무선통신

**박 상 규 (Sang Kyu Park)**

중신회원



1974년 2월 : 서울대학교 전기공학과 공학사  
 1980년 5월 : 듀크대학교 전기공학과 공학석사  
 1987년 1월 : 미시건대학교 전기공학과 공학박사  
 1987년 3월~현재 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 디지털 통신, 확산대역통신, MIMO, OFDM 시스템