

다중 사용자 OFDM 시스템을 위한 적응적 대역폭 및 부반송파 할당 기법의 성능 분석

정회원 임연주*, 박상규*

Performance Analysis of Adaptive Bandwidth and Subcarrier Allocation Scheme for a Multi-user OFDM System

Yeon Ju Lim*, Sang Kyu Park* *Regular Members*

요약

적응형 자원 할당에 대해 낮은 복잡도를 요구하는 이동 채널에서의 다중 사용자 OFDM 시스템을 위해 다중 임계치를 사용하는 자원 할당 알고리즘을 제안한다. 임계치의 내림 차순으로 할당을 수행하며, 각 임계치를 넘어서는 채널값을 갖는 부반송파에 대해서만 할당을 고려한다. 또한, 낮은 채널값을 갖는 부반송파들을 제거하여도 요구 데이터율을 여전히 만족시킬 수 있다면, 현재의 임계치를 이용한 할당 과정에서 해당 부반송파를 제거하여 다음 임계치에 대한 할당 과정에서 다른 사용자들을 위해 재할당되도록 한다. 제안된 대역폭 및 부반송파 할당 알고리즘은 필요 전력과 할당에 소요되는 시간에 대해서 기존의 알고리즘들에 비해 매우 우수한 성능을 가지기 때문에 이동 환경에서 OFDM 시스템의 스펙트럼 효율을 높일 수 있는 기술로 예상된다.

Key Words : OFDM, Subcarrier Allocation, Multi-user, Multi-threshold

ABSTRACT

For a multi-user OFDM system in mobile channels which requires low-complexity in adaptive resource allocations, resource allocation algorithm using multi-threshold is proposed. The allocation scheme, which is performed by the multi-threshold values in descending order, considers only subcarriers over each threshold level. Moreover, some subcarriers with the lowest channel gain can be removed in the present threshold level within the constraint of satisfaction of the required data rate, in order to allocate them to the other users when the allocation process of next threshold is executed. As a result, the proposed bandwidth and subcarrier algorithm has better system performances than the conventional allocation schemes in terms of required power and processing time, which is expected as a technique that improves the spectral efficiency of OFDM systems in a mobile environment.

I. 서론

다중 경로 페이딩 현상을 겪는 무선 채널에서의 ISI(Inter-Symbol Interference) 문제에 대한 해결책으로 많은 관심과 연구가 진행되고 있는 분야가 다

중 반송파를 이용하여 스펙트럼 효율을 높일 수 있는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식이다¹⁻³⁾. 한편, 무선 채널에서는 주파수 대역과 전송 전력과 같은 자원이 제한되어 있어 주어진 주파수 대역폭과 전송 전력내에서 스펙트럼

* 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 (skpark@hanyang.ac.kr) (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2006-01-026, 접수일자 : 2006년 1월 12일, 최종논문접수일자 : 2006년 10월 26일

효율을 높이기 위해 자원에 대한 적응적인 사용이 더욱 크게 요구되고 있다^{4,5}. 이 때, 빠르게 변하는 채널 상태를 갖는 이동통신 환경에 적용되는 OFDM 시스템을 위해서는 요구되는 시스템 성능을 만족하면서 채널에 적응적으로 대처할 수 있는 낮은 복잡도의 적응적 자원 할당 기법이 필요하다.

Rohling은 간단하게 반복되는 greedy 알고리즘을 제안하여 단순하게 이웃한 부반송파들을 블록별로 각 사용자에게 할당하는 OFDMA 시스템보다 우수한 성능을 보여주었고⁶, Wong에 의해 소개된 LR(Lagrangian Relaxation) 방식은 블록 할당이나 인터리빙 할당과 같이 고정된 할당 방식에 비해 소요되는 전력의 양이 훨씬 적은 자원 할당 알고리즘이지만, 계산적으로 복잡하여 구현에 어려움이 따른다⁷. 낮은 복잡도를 달성하는 [8,9]에서의 알고리즘은 이웃한 채널값들의 상관값이 낮은 경우에는 여러 개의 부반송파를 묶어 블록 단위로 할당하는 것이 큰 성능 저하를 초래할 수 있음을 쉽게 예상할 수 있다. 한편, [10,11]에서 제안된 자원 할당 알고리즘들은 Rohling이나 Wong이 제안한 알고리즘들에 비해 낮은 복잡도를 가지면서도 적은 소요 전력을 요구하나, 할당에 필요한 연산량이 시스템에서 사용되는 총 부반송파의 수에 비례하여 증가되므로 여전히 높은 복잡도를 갖는다.

따라서, 이동 통신 환경을 위한 자원 할당 알고리즘이 요구하는 낮은 복잡도와 우수한 성능을 달성하기 위하여 본 논문에서는 요구되는 데이터 전송률을 만족하는데 필요한 전력의 양을 최소화시킬 수 있는 다중 사용자 OFDM 시스템용 적응적 대역폭 및 부반송파 할당 알고리즘에 대해 제안한다.

제안된 할당 알고리즘은 다중 임계치를 적용하여 각 임계치를 넘는 부반송파들에 대해서 한꺼번에 각각의 해당 사용자에게 할당하는 방식으로써, 부반송파 할당시 한 개의 부반송파를 할당하는 기존 방식 대신에 임계치를 넘는 부반송파들이 동시에 할당되기 때문에 할당 처리 시간이 단축될 수 있다. 또한, 사용자의 요구 데이터율을 만족하는 범위내에서 일부 잉여부반송파를 다른 사용자들이 재사용할 수 있도록 양도하기 때문에 요구되는 전력이 기존의 방식들에 비해 매우 적다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 다중 사용자 OFDM 시스템의 모델에 대해 알아보고, III장에서는 최대 채널값과 최대 데이터율값에 기반한 기존의 할당 방식에 대해 설명한다. 또한, IV장에서는 다중 임계치를 적용한 대역폭 및 부반송파 할당

알고리즘을 다중 사용자 OFDM 시스템을 위해 제안한다. 알고리즘들에 대한 시뮬레이션 및 성능 분석은 V장에서 보여지며, 마지막으로 VI장에서는 본 논문의 연구 내용을 정리하며 결론을 맺도록 한다.

II. 시스템 모델

K 명의 사용자, N 개의 부반송파를 갖는 OFDM 시스템의 순방향 전송을 고려한다. 시스템은 모든 K 명의 사용자가 겪는 채널 상태에 대해서 알고 있어야 하고, 하나의 부반송파의 대역은 채널의 대역보다 작으며, 페이딩 채널 상태 정보는 수신기와 송신기에서 완벽하게 알고 있다고 가정한다.

임의의 부반송파가 다수의 사용자에 의해 사용되지 않고, 오직 한 명의 사용자만이 해당 부반송파를 통해 데이터를 전송할 수 있도록 하는 배타적인 부반송파 할당을 고려할 경우, k 번째 사용자의 n 번째 부반송파를 통해 수신된 SNR(Signal to Noise Ratio)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{k,n} = \frac{p_{k,n}\alpha_{k,n}^2}{N_0 W/N} \quad (1)$$

여기서, $p_{k,n}$ 는 k 번째 사용자의 n 번째 부반송파에 할당된 전력으로써, 시스템에 주어진 총 전송 전력을 모든 부반송파에 대해 같은 양으로 분배하는 평전력 할당 방식을 사용한다. $\alpha_{k,n}$ 는 k 번째 사용자의 n 번째 부반송파가 갖는 페이딩 이득을 나타내며, N_0 은 단측 잡음 전력 스펙트럼 밀도 레벨이다. 또한, 시스템에 주어진 총 대역폭을 W 라 하였을 때, 각 부반송파가 갖는 대역폭은 W/N 가 된다.

따라서, 요구되는 시스템 성능을 만족하면서 k 번째 사용자의 n 번째 부반송파를 통해 전송 가능한 비트의 수 $r_{k,n}$ 은 다음과 같다.

$$r_{k,n} = \log_2 \left(\frac{\gamma_{k,n}}{\Gamma} + 1 \right) \quad (2)$$

여기서, Γ 는 요구되는 BER(Bit Error Rate)에 대한 함수로 나타나는 SNR gap으로써, M-ary QAM 변조 기법에 대해 다음과 같다^[12].

$$\Gamma = \frac{[Q^{-1}(BER/4)]^2}{3} \quad (3)$$

여기서,

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

이다. 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 요구되는 BER 성능을 만족하면서 $r_{k,n}$ 개의 비트 수를 전송하기 위해 k 번째 사용자의 n 번째 부반송파가 필요로 하는 수신된 전력은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$f(r_{k,n}) = \frac{N_0}{3} [Q^{-1}(BER/4)]^2 (2^{r_{k,n}} - 1) \quad (4)$$

여기서, $f(r)$ 은 $f(0) = 0$ 이고, r 에 따라 값이 증가하는 convex 함수이다.

따라서, 요구되는 데이터 전송률을 만족하는데 필요한 총 전송 전력을 최소화하는 최적화 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min P_{tot} = \min \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{1}{\alpha_{k,n}^2} f_k(r_{k,n}) \rho_{k,n} \quad (5)$$

여기서, $\rho_{k,n}$ 는 해당 부반송파에 대해 다른 사용자들의 사용 여부를 나타내는 변수로써 $[0,1]$ 사이의 값을 갖는다. 하나의 부반송파에 대해 사용자 공유 없이 오직 한 명의 사용자만이 해당 부반송파를 사용한다고 하였으므로, $\rho_{k,n}$ 는 0 또는 1의 값을 가진다. 이 때, $r_{k,n}$ 과 $\rho_{k,n}$ 는 총 전력의 최소화 문제를 해결하기 위해 전송 데이터율 R_k 에 대한 다음의 제약 조건을 만족해야 한다.

$$R_k = \sum_{n=1}^N r_{k,n} \rho_{k,n}, \quad \forall k \quad (6-a)$$

$$\sum_{k=1}^K \rho_{k,n} = 1, \quad \forall n \quad (6-b)$$

III. 최대 채널값 및 최대 데이터율 기반 대역폭 및 부반송파 할당 방식

3.1 대역폭 할당 알고리즘

Kivanc가 제시한 대역폭 할당 알고리즘은 요구 데이터율에 비례하여 각 사용자의 대역폭을 정해주

는 방식으로 그림 1과 같이 수행된다. 여기서, R_{\max} 는 한 부반송파가 단위 시간당 전송할 수 있는 최대 비트 수를 나타내고, B_k 는 사용자 k 의 대역폭 값을 말한다. 또한, $H_{avg}^k = \left(\sum_{n=1}^N \alpha_{k,n}^2 \right) / N$ 는 사용자 k 의 평균 채널 전력이다. 할당되는 부반송파의 수가 많을수록 요구되는 전력의 양이 줄어들기 때문에 G_k 는 음의 값을 갖는다. 즉, 모든 대역폭의 합이 총 부반송파의 개수 N 이 되지 않아 부반송파의 수를 조정할 필요가 있게 되는 경우, 한 개의 부반송파를 추가함으로써 감소되는 전력량이 최대가 되는 사용자에게 대역폭의 값을 1씩 증가시킨다.

따라서, 좋은 채널 환경의 사용자와 그렇지 않은 채널 환경의 사용자가 동일한 최소 데이터율 R_{\min}^k 를 만족해야 한다면 전체적인 채널 SNR이 양호한 사용자의 부반송파 수가 더 증가되는 방식이다.

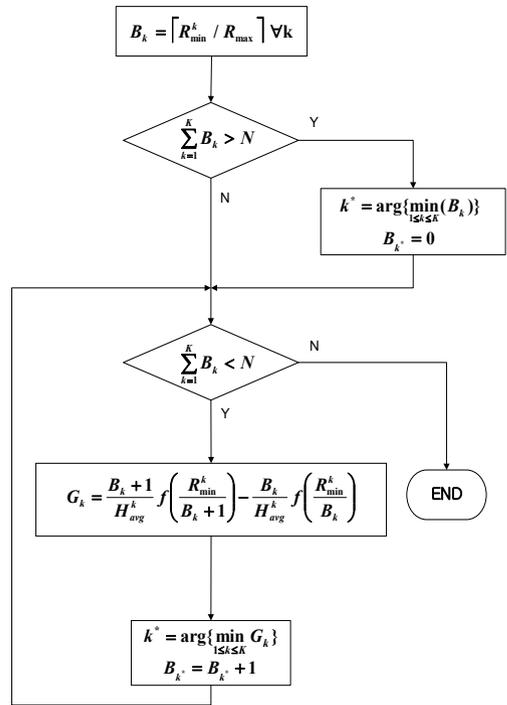


그림 1. 요구 데이터율 기반 대역폭 할당 알고리즘

3.2 부반송파 할당 알고리즘

3.2.1 최대 채널값 기반 할당

III장의 1절에서의 대역폭 할당 알고리즘을 통해 각 사용자의 부반송파 수가 정해지면, 그림 2와 같

이 부반송파 할당을 수행한다.

최대 채널값 기반 부반송파 할당 알고리즘은 각 부반송파에 대해 최고의 이득을 갖는 사용자를 찾아내어 해당 부반송파를 할당한다. 단계 3에서 볼 수 있듯이, 부반송파의 수 $n(b_k)$ 가 사용자 k 의 대역폭값과 같다면, 할당된 부반송파 이외의 모든 부반송파들의 채널값이 0으로 설정되어 다음 부반송파 할당 과정에서 선택되지 않도록 한다.

3.2.2 최대 데이터율값 기반 할당

최대 데이터율값을 이용하여 부반송파를 할당하는 알고리즘이 그림 3에 나와있다.

최대 데이터율에 기반한 부반송파 할당 알고리즘은 각 부반송파에 대해 최대의 데이터율을 갖는 사용자에게 해당 부반송파를 할당한다. 먼저, 각 사용자에게 할당된 대역폭에 상관없이 최대 데이터율에 기반하여 모든 부반송파들이 할당될 때까지 1차적인 할당을 수행한다. 그런다음, 할당된 대역폭 이상의 부반송파를 할당받은 사용자로부터 할당된 대역폭 미만의 부반송파 수를 할당받은 사용자로 부반송파를 이동시켜 각 사용자의 대역폭을 충족시킨다.

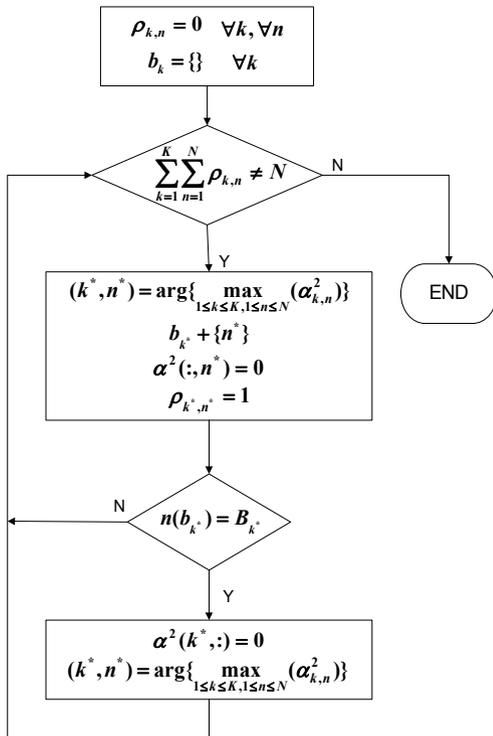


그림 2. 최대 채널값 기반 부반송파 할당 알고리즘

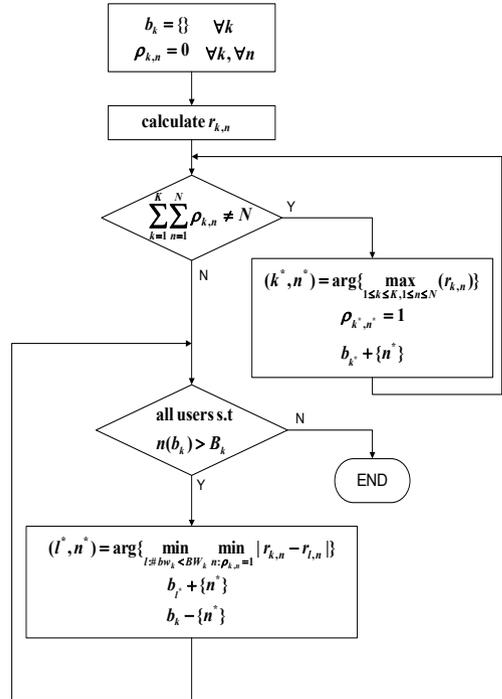


그림 3. 최대 데이터율값 기반 부반송파 할당 알고리즘

이 때, 부반송파의 이동 기준은 요구되는 대역폭 이상을 할당받은 사용자의 부반송파들 중에서 다른 사용자들의 전송 가능한 데이터율과의 차이가 가장 작은 부반송파를 선택한다. 즉, $|r_{k,n} - r_{l,n}|$ 의 값이 작을수록 해당 부반송파를 넘겨주는 사용자의 데이터율만큼 할당된 대역폭 미만의 부반송파 수를 할당받은 사용자의 데이터율 증가가 보장된다.

IV. 다중 임계치 기반 할당

III장에서 소개된 기존의 최대 채널값이나 최대 데이터율값 기반의 부반송파 할당 알고리즘에서는 한번에 한 개씩의 부반송파를 할당하며, 이를 위해 별도의 대역폭 할당 알고리즘을 사용하여 대역폭을 먼저 할당받은 과정을 거쳐야 하기 때문에 많은 할당 처리 시간이 소요된다. 또한, 각 부반송파에 대해 가장 높은 채널값 또는 데이터율값을 갖는 사용자에게 해당 부반송파를 할당한다는 조건과 미리 할당된 대역폭의 값이 각 사용자의 요구 데이터율을 만족시킨다는 보장이 없다.

특히, 대역폭 할당은 요구되는 데이터율에 비례하여 할당되기 때문에 낮은 채널 전력을 갖는 사용자와 높은 채널 전력을 갖는 사용자가 동일하게 높

은 전송 데이터율을 요구할 경우에는 해당 사용자들에게 동일한 부반송파 수가 할당되므로 요구 데이터율을 만족시킬 확률이 크게 떨어질 수 있다.

따라서, 본 장에서는 채널값을 이용하여 부반송파를 할당하되, 각 사용자들의 요구 데이터율 만족 여부를 알 수 있도록 하는 기준을 마련한다. 즉, 사용자의 요구 데이터율을 만족시킬 수 있는 기준을 생성하는 동시에 할당 처리의 부하를 줄이기 위해서 임계치를 적용한다. 이 때, 사용자의 요구 데이터율 만족 확률을 높이기 위해서는 각 사용자에게 할당되는 대역폭이 세심하게 조정되어야 하므로 여러 개의 임계치를 사용하며, 임계치간의 간격은 최대 임계치에서 멀어질수록 임계치 사이의 간격이 넓어지는 불균등 간격으로 설정한다. 이는 채널값이 높은 양호한 부반송파를 할당할 경우에 요구 데이터율을 만족할 수 있도록 최소의 부반송파 수만을 할당하기 위해서이다.

총 L 개의 임계치를 사용할 때, 최대 임계치는 $\max(H_{avg}^k)$, 최소 임계치는 $\min(H_{avg}^k)$ 가 되며, 임계치가 높은 순서대로 부반송파 할당을 수행한다. 각 임계치를 넘는 부반송파들 중에 한 명의 사용자에게 대해서만 채널값이 임계치를 넘어서는 부반송파들은 한번에 해당 사용자에게 할당된다. 또한, 임계치를 넘어서는 부반송파들 중에 두 명 이상의 사용자에게 동시에 해당되는 부반송파들에 대해서는 요구되는 데이터율이 적은 사용자에게 할당하도록 한다. 높은 데이터율을 가진 경우보다 낮은 데이터율을 가진 경우가 하나의 부반송파 추가로 요구 데이터율을 만족시킬 수 있는 확률이 더 높아지기 때문이다.

이와 같은 할당 방식은 각 임계치를 넘는 부반송파에 대해서 동일하게 적용된다. 이 때, 각 임계치로부터 전송 가능한 데이터율을 식 (2)로부터 계산하고, 현재 할당과정까지 임계치를 넘어서는 모든 부반송파의 수를 임계치에 의한 데이터율값과 곱한 결과 값이 전송 가능한 데이터율이 되어 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{out}^k = D_r \cdot b \quad [bit/sec] \quad (7)$$

여기서, D_r 는 임의의 임계치에 의해 전송가능한 데이터율을 나타내고, b 는 임계치를 넘어서는 모든 부반송파의 수를 말한다. 실제 채널값들은 임계치 이상의 값들이므로, 실질적으로 전송 가능한 데이터율은 요구되는 데이터율 이상의 값을 가지게 된다.

따라서, 요구 데이터율을 넘어서는 사용자에게 대해서는 여전히 요구 데이터율을 만족시킬 수 있는 범위내에서 할당된 부반송파 중에 가장 작은 채널값을 갖는 부반송파를 제거시킨다. 제거된 부반송파는 하위의 임계치를 적용하는 할당 단계에서 요구 데이터율을 만족시키지 못한 다른 사용자들을 위해 재할당된다.

V. 시뮬레이션 및 성능분석

다중 사용자 시스템에 적용할 총 부반송파 수는 $N = 320$ 이고, 변조 방식은 최대 64QAM 기법을 사용하며, 사용자별로 요구되는 전송 데이터의 양은 16비트, 32비트 그리고 48비트를 고려한다. 또한, 도플러 주파수가 160인 4개의 다중 경로를 갖는 레일레이 페이딩 채널 환경을 사용한다. 요구되는 비트 오류율은 10^{-4} 이고, 사용자 수는 최대 100명을 고려하도록 한다. 또한, 시스템에 주어진 신호 전력 대 잡음 전력의 비는 7dB이다. 이 때, 3.0GHz CPU 속도를 갖는 윈도우 XP 환경에서 Matlab 프로그램을 이용하여 실험한다.

그림 4는 기존의 할당 알고리즘과 제안된 방식에 대해 동일한 outage 확률 $P_{out} = 0.4$ 를 달성하기 위해 요구되는 전력의 양을 비교한 결과를 나타낸다. 이 때, outage 확률은 각 사용자에게 할당된 부반송파들을 통해 전송 가능한 데이터율이 요구되는 데이터율을 넘어서지 못하는 확률로 정의된다. 본 논문에서는 10개의 임계치를 사용하도록 한다. 사용자의 수가 많아질수록 요구되는 전력의 양은 점차 많아지며, 임의의 사용자 수에 대해서 제안된 알고리즘이 가장 낮은 전력을 요구한다는 것을 알 수 있다. 기존의 알고리즘들은 사용자 수가 70명 이상일 경우에 사용자당 할당되는 대역폭의 값이 매우 작아 지므로 많은 양의 전력을 분해하여도 0.4의 outage 확률을 획득하는 것이 어렵다. 따라서, 알고리즘간의 성능 비교를 위하여 요구되는 outage 확률이 달성가능한 60명의 사용자 수 까지만 고려한다.

제안된 알고리즘을 수행하는 데 있어서 필요한 루프의 수는 적용된 다중 임계치의 수이다. 또한, 임계치를 넘어서는 부반송파에 대해서 오직 한 명의 사용자만이 해당될 때에는 임계치를 넘어서는 부반송파들이 동시에 해당 사용자에게 할당되어 할당 과정에 드는 시간을 단축시킬 수 있다. 10개의 임계치가 적용된 대역폭 및 부반송파 할당 알고리

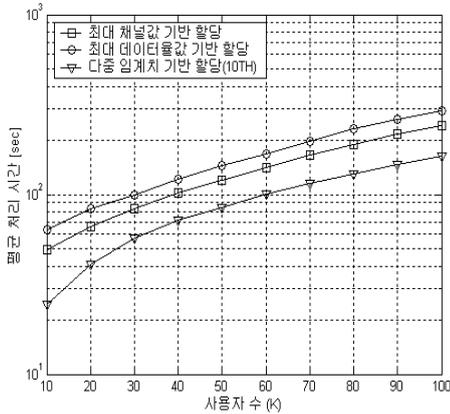


그림 4. 사용자 수에 따른 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘들의 필요 전력

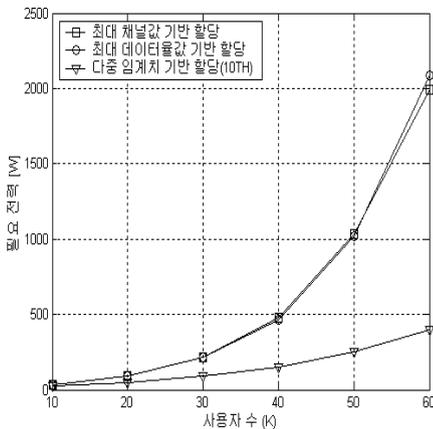


그림 5. 사용자 수에 따른 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘들의 평균 CPU 처리 시간

들을 100번 수행하는데 소요되는 평균 CPU 처리 시간이 그림 5에 나와 있다. 제안된 알고리즘이 요구되는 반복 루프의 수가 가장 작기 때문에 가장 적은 할당 처리 시간을 필요로 한다. 최대 데이터율 값 기반의 부반송파 할당 알고리즘은 최대 데이터율값에 기반하여 각 사용자에게 부반송파를 모두 할당한 후, 각 사용자의 대역폭을 만족시키기 위해 사용자간의 부반송파 이동 절차가 추가적으로 요구되므로 할당 과정에 소요되는 시간이 가장 크다.

VI. 결론

다중 사용자 OFDM 시스템을 위한 자원 할당 알고리즘을 위해 채널값을 이용하여 부반송파를 할당시키되, 다중 임계치를 적용함으로써 사용자가 요

구하는 데이터를 만족에 대한 기준을 생성하였다. 그 결과, 동일한 사용자 요구 데이터를 만족 확률을 달성하기 위해 제안된 할당 알고리즘이 가장 적은 소요 전력을 요구함을 알 수 있었다.

또한, 제안된 할당 알고리즘에서는 한 명의 사용자에 대해서만 채널값이 임계치를 넘어서는 부반송파들은 한번에 해당 사용자에게 할당되고, 주된 루프의 수가 적용된 임계치 수가 되기 때문에 시스템에 주어진 총 부반송파 수만큼 루프의 수를 요구하는 기존의 알고리즘들에 비해 훨씬 작은 처리 시간을 가진다.

따라서, 제안된 부반송파 및 대역폭 할당 알고리즘은 최대 채널값 또는 최대 데이터율값에 기반하여 대역폭과 부반송파 할당을 분리한 기존의 알고리즘들에 비해 필요 전력과 할당 처리에 소요되는 시간에 대해서 훨씬 우수한 성능을 가지므로, 이동통신 환경의 OFDM 시스템에 실제 적용 가능하더라도 스펙트럼 효율을 향상시킬 수 있는 기술이라 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 28, pp. 5-14, May 1990.
- [2] R. V. Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Boston: Artech House, 2000.
- [3] M. Engels, *Wireless OFDM Systems: How to Make Them Work?*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [4] L. Li and A. J. Goldsmith, "Capacity and optimal resource allocation for fading broadcast channels part II: outage capacity," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 47, pp. 1103-1127, Mar. 2001.
- [5] W. Web and R. Steele, "Variable rate QAM for mobile radio," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 43, pp. 2223-2230, Jul. 1995.
- [6] H. Rohling, K. Bruninghaus, and R. Grunheid, "Performance comparison of different multiple access schemes for the downlink of an OFDM communication system," in *Proc. IEEE VTC'97*, vol. 3, pp. 1365-1369, May 1997.

- [7] 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.
- [8] K. D. Cheo, Y. J. Lim, and S. K. Park, "Subcarrier allocation with low- complexity in multiuser OFDM systems." in *Proc. IEEE MILCOM'04*, vol. 2, pp. 822-826, Nov. 2004.
- [9] K. D. Cheo, Y. J. Lim, and S. K. Park, "Subcarrier adaptation for multiuser OFDM systems," in *Proc. IEEE GLOBE COM'04*, vol. 2, pp. 1230-1233, Dec. 2004.
- [10] D. Kivanc, G. Li, and H. Liu, "Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 2, no. 6, pp. 1150-1158, Nov. 2000.
- [11] Y. J. Zhang and K. B. Letaief, "Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 3, no. 5, pp. 1566-1575, Sept. 2000.
- [12] P. S. Chow, J. M. Cioffi, and J. A. C. Bingham, "A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 43, pp. 773-775. Feb./Mar./Apr. 1995

임 연 주 (Yeon Ju Lim)

정회원



1998년 2월 대구대학교 정보통신공학 공학사
 2000년 2월 한양대학교 전파공학 공학석사
 2006년 2월 한양대학교 전자통신전파공학 공학박사
 <관심분야> 디지털통신, 확산대역통신, OFDM, Adaptive Modulation

박 상 규 (Sang Kyu Park)

정회원



1974년 2월 서울대학교 전기공학 공학사
 1980년 5월 Duke Univ. 통신공학 공학석사
 1987년 5월 University of Michigan 통신공학 공학박사
 1976년 7월~1978년 10월 국방과학연구소
 1990년 8월~1991년 8월 University of Southern California 객원교수
 1987년 3월~현재 한양대학교 공과대학 전자통신컴퓨터공학부 교수
 <관심분야> 디지털통신, 확산대역통신, 부호이론, IMT-2000, OFDM, MIMO, Adaptive Modulation