논문 2007-44TC-11-3

OFDMA 시스템에서 그리디 방법을 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘의 성능분석

(Performance Analysis of Dynamic Channel Allocation Based on the Greedy Approach for OFDMA Systems)

오 은 성*, 한 승 엽*, 홍 대 식**

(Eunsung Oh, Seungyoup Han, and Daesik Hong)

요 약

본 논문은 직교 분할 다중 반송파 다중 접속 방식(OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access)에서 그리디 방법(GA, Greedy Approach)을 사용한 동적 채널 할당 알고리즘의 성능분석에 관한 것이다. GA를 기반으로 한 동적 채널 할당의 경우 사용자간의 다이버시티 효과를 통하여 성능 이득을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 동적 채널 할당 알고리즘에서 다중 사용자 다이버시티 계수인 할당 가능한 사용자 수(NAU, Number of Allocable Users)를 모델링하고, 이를 통하여 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘의 성능(실패 확률 및 데이터 전송량)을 분석한다. 분석된 결과를 기반으로 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘의 성능을 최대화 할 수 있는 조건을 제시할 수 있다.

Abstract

This paper presents a performance analysis of dynamic channel allocation (DCA) based on the greedy approach (GA) for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) systems over Rayleigh fading channels. The GA-based DCA achieves its performance improvement using multi-user diversity. We analyze the statistics of the number of allocable users (NAU), which represents the multi-user diversity order at each allocation process. The derived statistics are then used to analyze the performance of GA-based DCA. The analysis results show that the number of subcarriers allocated to each user must be equal to achieve the maximum system performance (i.e., based on outage probability and data throughput).

Keywords: Dynamic channel allocation, orthogonal frequency division multiple access, multi-user diversity

I. 서 론

동적 채널 할당은 직교 분할 다중 반송파 다중 접속 방식(OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access)에서 높은 스펙트럼 효율을 얻기 위한 방법으로 연구되고 있다[1~2]. 논문 [1]의 경우 그리디 방법(GA, Greedy Approach)과 반복적인 방법을 이용한 동적 채널 할당 알고리즘을 제안하고 있으며, 논문 [2]의 경우는 반복적인 방법보다 복잡도를 줄일 수 있는 알고리즘을 GA를 기반으로 하여 제안하고 있다. 이와 같이 GA를 기반으로 하는 알고리즘들이 제안되는 이유는, GA 기법이 적은 복잡도로 전송률을 향상시킬 수 있는 방안이기 때문이다. 그러나 지금까지의 연구는 GA 기법의 비선형적인 특징으로 인하여 실험적으로 접

* 학생회원, ** 정회원, 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: 2007년11월16일

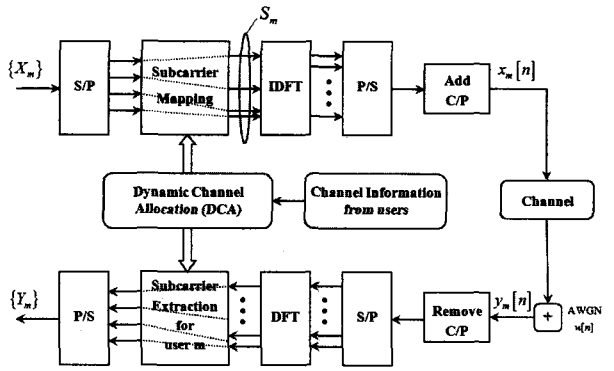


그림 1. OFDMA 시스템 모델
Fig. 1. OFDMA system model.

근하였던 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당의 성능 분석에 관한 내용을 다룬다. 동적 채널 할당의 성능 향상은 다중 사용자 다이버시티를 통하여 얻어지며[3], 동적 채널 할당의 경우 다중 사용자 다이버시티는 각 할당에서의 할당 가능한 사용자 수(NAU, Number of Allocable Users)로 나타난다. 따라서 본 논문에서는 NAU를 계산하고, 이를 통하여 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘의 성능을 분석한다. 또한, 분석된 결과를 통하여 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘의 성능을 최대화 할 수 있는 조건을 제시한다.

Ⅱ. 시스템 모델 및 문제 제시

1. 시스템 모델

그림 1과 같이, 본 논문에서는 M명의 사용자에 대하여 N개의 부 반송파를 갖는 OFDMA 시스템을 가정한다. 각각의 사용자는 서로 겹치지 않는 부 반송파를 할당 받으며 이를 부 채널 이라고 정의한다. 각 사용자의 부 채널의 크기,$s_m = |u_m|$, $\Sigma_m s_m = N$,는 BABS(the bandwidth assignment based SNR algorithm[2])와 같은 방법으로 정의되어 있다고 가정한다.

또한 송신단과 수신단에서 채널 정보를 알고 있다는 가정 하에 전송 신호는 레일리 페이딩 채널을 거치게 된다. 따라서 m번째 사용자의 n번째 부 반송파의 수신 신호 대 잡음비(SNR, signal-to-noise ratio)는

$$\gamma_{(m,n)} = \alpha^2_{(m,n)} \frac{E_s}{N_0}, \qquad (1)$$

이며, 여기서 E_s는 신호 전력, N_0는 가산 백색 잡음의 전력 밀도, $\alpha^2_{(m,n)}$는 m번째 사용자의 n번째 부 반송파 채널 이득을 나타낸다. 레일리 페이딩 채널에서 채널 이득은 자유도가 2인 카이스퀘어 분포를 가진다. 따라서 수신 SNR의 확률 밀도 함수 역시 카이스퀘어 분포를 가지며, 이는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$p(\gamma_{(m,n)}) = \frac{1}{\overline{\gamma_{(m,n)}}} e^{-\gamma_{(m,n)}/\overline{\gamma_{(m,n)}}}, \ \gamma_{(m,n)} \geq 0. \qquad (2)$$

이때, $\overline{\gamma_{(m,n)}}$는 평균 SNR을 나타내며, 모든 사용자의 채널 이득이 같다는 가정을 사용하여, 평균 SNR은 $\bar{\gamma}$로 간략화 하여 나타낼 수 있다.

2. 문제 제시

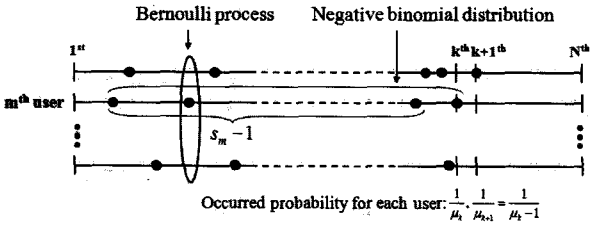
GA를 기반으로 하는 동적 채널 할당 알고리즘은 다음과 같은 과정을 통하여 수행된다.

GA-based DCA Algorithm:
S는 부 반송파, UF는 할당되어야 할 사용자의 집합
초기화: $S = \{1,\cdots,N\}, UF = \{1,\cdots,M\}$
For $k = 1,\cdots,N$, do
  k번째 할당
end
k번째 할당 과정
1) 집합 S에서 랜덤으로 부 반송파 s를 선택
2) s를 할당 가능한 사용자 중 가장 높은 SNR을 갖는 사용자,u_m,에게 할당
3) (S와 UF 갱신)$S = S/\{u_m\}$, 할당된 s가 u_m의 s_m번째 부 반송파 이면 $UF = UF/\{u_m\}$■

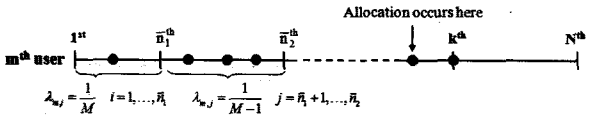
할당 과정의 첫 번째는 각 부 반송파의 독립성을 보장하기 위한 것이며, 두 번째 할당 과정은 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻기 위한 것, 마지막 과정은 할당을 끝낼 수 있는 제한 조건이다.

이와 같은 할당 과정을 통하여 동적 채널 할당 알고리즘은 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻게 되고 시스템 성능을 향상 시킬 수 있다. 따라서 동적 채널 할당 알고리즘의 성능을 분석하기 위해서는 다중 사용자 다이버시티 이득을 계산하여야 한다. 동적 채널 할당 과정에서는 NAU가 다중 사용자 다이버시티 계수로 작용하므로, NAU를 계산함으로써 동적 채널 할당 알고리즘의 성능을 분석할 수 있다.

k번째 할당에서의 NAU는 k번째 할당에서 할당 가능한 사용자 수로 정의된다. 이는, 동적 채널 할당 알고리즘의 세 번째 과정을 통하여 k번째 할당에서의 NAU는



(a) 음의 이항 확률 분포(Negative binomial distribution)



(b) 푸아송 분포(Poisson distribution)

그림 2. GA를 기반으로 한 동적 채널 할당에서의 $p_{fin,(m,k)}$ 모델링

Fig. 2. $p_{fin,(m,k)}$ modeling for GA-based DCA.

전체 사용자 M에서 k번째 할당 이전에 할당이 끝난 사용자 수를 빼줌으로 해서 얻을 수 있다.

$$u_k = M - \sum_{m=1}^{M} \sum_{l=s_m}^{k-1} p_{fin,(m,l)}. \tag{3}$$

여기서 $p_{fin,(m,l)}$은 m번째 사용자가 l번째 할당 과정에서 할당이 끝날 확률을 나타낸다.

III. GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘의 성능 분석

NAU는 각 사용자의 s_m에 따른 비선형 함수이다. III-1절에서는 k번째 할당에서 NAU의 확률 모델링을 수행하고, III-2절에서 이를 이용하여 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘의 성능(실패 확률 및 데이터 전송량)을 분석한다.

1. NAU의 계산

GA를 기반으로 한 동적 채널 할당의 경우, 첫 번째 할당 과정을 통하여 각 할당 과정의 독립성이 보장된다. 또한 모든 사용자의 평균 SNR이 같다는 가정을 통하여, 할당 과정에서 각각의 사용자가 선택될 확률이 균일 분포를 갖는다. 이와 같은 두 가지 성질을 통해서 k번째 할당 과정에서 사용자가 할당될 확률은 그림 2-(a)와 같이 $1/\mu_k$ 확률을 갖는 베르누이 분포가 된다. 따라서 전체 할당 과정에 대한 $p_{fin,(m,k)}$의 분포는 아래와 같이 음의 이항 확률 분포를 나타낸다[4].

$$p_{fin,(m,k)} = {}_{k-1}C_{s_m-1}\left(\frac{1}{\tilde{\mu}}\right)^{s_m}\left(1-\frac{1}{\tilde{\mu}}\right)^{k-s_m} \tag{4}$$

여기서 ${}_aC_b = a!/(a-b)!b!$이다. 음의 이항 확률 분포는 복원 확률 분포이다. 이는 수식 (4)에서 발생 확률 $1/\tilde{\mu}$이 상수여야 함을 의미한다. 그러나 수식 (4)에서 발생 확률 분포는 각 할당 과정에서 변수로 나타나며, 따라서 $p_{fin,(m,k)}$는 수식 (4)를 통하여 구할 수 없다. 이를 해결하기 위하여 푸아송 근사화가 적용된다.

많은 수의 수행을 반복하는 음의 이항 확률 분포는 푸아송 분포로 근사화 할 수 있다[4]. 부 반송파의 개수가 충분히 많다고 가정하면, 채널 할당 과정은 여러 번 반복되게 된다. 따라서 음의 이항 확률 분포는 그림 2-(b)에서 보는 것과 같이 비 균일 밀도를 갖는 푸아송 분포로 모델링 되며, 아래와 같이 표현된다.

$$p_{fin,(m,k)} \simeq \frac{1}{C_m}\frac{s_m}{k}\frac{\lambda^{s_m}}{s_m!}e^{-\lambda_m}. \tag{5}$$

이때 C_m은 m번째 사용자의 정규화 값이고, λ_m은 푸아송 밀도이다. 푸아송 분포는 k에 대하여 무한대의 범위를 갖지만, $p_{fin,(m,k)}$에서 k는 부 반송파 개수 N까지이다. 따라서 정규화 값 $C_m = \frac{M}{M-1}\sum_{k=1}^{N} p_{fin,(m,k)}$이 적용된다. 수식 (5)를 통하여 푸아송 밀도 λ_m을 계산함으로써 $p_{fin,(m,k)}$을 계산할 수 있다.

비 균일 밀도를 갖는 푸아송 분포의 푸아송 밀도는 기댓값으로 계산된다[4]. 포아송 밀도 λ_m은 m번째 사용자가 단위 할당 과정에 할당되는 횟수를 의미한다. 이를 이용하여 m번째 사용자가 부 채널을 할당 받을 평균 할당 횟수는 다음과 같이 계산된다.

$$\overline{n_m} = s_m\lambda_m. \tag{6}$$

$s_m(s_1 \le s_2 \le \cdots \le s_{M-1} \le s_m)$을 오름차순으로 정렬하면, 수식 (6)을 이용하여 포아송 밀도 λ_m은 아래 수식 (7)과 같이 구해진다. 수식 (7)에서 λ_m은 각 사용자의 s_m에 따라서 결정된다. 이를 통하여 수식 (5)의 $p_{fin,(m,k)}$가 사용자 간의 상관관계를 통하여 결정되는 것을 알 수 있으며, 이러한 사용자 간의 상관관계가 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당의 비 선형성을 만들어낸다.
수식 (5)와 (7)을 이용하여, 수식 (4)로부터 NAU를 다음과 같이 계산할 수 있으며,

$$\begin{aligned}\lambda_m &= E(\lambda_{(m,k)}) \\ &= \frac{1}{N}\left\{\left(\frac{1}{M}-\frac{1}{M-1}\right)\overline{n_1}+\cdots+\left(\frac{1}{M-(m-2)}-\frac{1}{M-(m-1)}\right)\overline{n_{m-1}}+\frac{N}{M-(m-1)}\right\} \\ &= \frac{1}{M-(m-1)}+\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{m-1}\left(\frac{1}{M-(i-1)}-\frac{1}{M-i}\right)\overline{n_i}.\end{aligned} \tag{7}$$

$$\mu_k \simeq M-\sum_{m=1}^{M}\sum_{l=s_m}^{n-1}\frac{1}{C_m}\frac{s_m}{l}\frac{\lambda^{s_m}}{s_m!}e^{-\lambda_m}, \tag{8}$$

NAU를 계산함에 따라서 동적 채널 할당의 성능을 분석할 수 있다.

2. 실패 확률 및 데이터 전송량 분석

실패 확률은 SNR 조건을 만족하지 못하여 할당을 실패할 확률로 정의된다. 따라서 k번째 할당에서의 실패 확률은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}p_{out,k} &= p(SNR_k < \gamma_{th}) \\ &= p(\gamma_{(1,n)},\gamma_{(2,n)},\cdots,\gamma_{(\mu_k,n)} < \gamma_{th}) \\ &= \prod_{i=1}^{\mu_k} p(\gamma_{(i,n)} < \gamma_{th}) = \left(1-e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}}\right)^{\mu_k}.\end{aligned} \tag{9}$$

여기서 γ_{th}는 SNR 제한 조건이다. 수식 (9)를 통해 평균 실패 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}p_{out} &= \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} p_{out,k} \\ &= \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(1-e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}}\right)^{\mu_k}.\end{aligned} \tag{10}$$

데이터 전송량은 실패 없이 전송된 데이터 량을 의미한다. 따라서 m번째 사용자의 데이터 전송량은 아래와 같이 계산된다[5].

$$\eta_m = \zeta_m\left(1-\frac{1}{s_m}\sum_{n\in U_m} p_{out,n}\right). \tag{11}$$

여기서 ζ_m은 m번째 사용자의 데이터 도착율이다. 이를 통해 전체 데이터 전송량은 수식 (12)와 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}\eta &= \sum_{m=1}^{M}\eta_m \\ &= \sum_{m=1}^{M}\zeta_m\left(1-\frac{1}{s_m}\sum_{n\in U_m} p_{out,n}\right).\end{aligned} \tag{12}$$

Ⅱ-2절의 문제 제시에서 보였던 것과 같이, 동적 채널 할당 알고리즘의 성능은 NAU를 계수로 갖는 다이버시티 형태로 나타난다.

Ⅳ. 모의실험

모의실험에 사용된 환경에 대해서는 표 1에 정리되어 있다. 각 사용자가 요구하는 부 반송파의 개수는 아래와 같이 가정하였다.

$$\text{경우 1}: s_m = N/M, \text{ for } m=1,\cdots,M$$

$$\text{경우 2}: s_m = \begin{cases}3N/2M, & \text{for } m=1,\cdots,M/2 \\ N/2M, & \text{for } m=M/2+1,\cdots,M\end{cases}$$

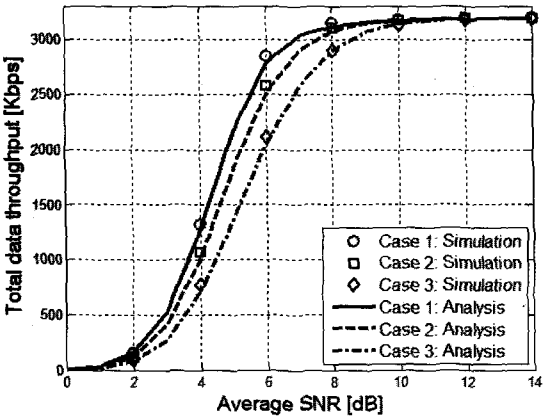
$$\text{경우 3}: s_m = \begin{cases}21N/8M, & \text{for } m=1,\cdots,M/4 \\ 7N/8M, & \text{for } m=M/4+1,\cdots,M/2 \\ 3N/8M, & \text{for } m=M/2+1,\cdots,3M/4 \\ N/8M, & \text{for } m=3M/4+1,\cdots,M.\end{cases}$$

그림 3은 경우 1, 2, 3에 대한 실패 확률과 전체 데이터 전송량을 보여준다. 그림 3-(a)는 실패 확률에 대한 결과이다. 10% 실패 확률에서 경우 1이 경우 2에 대하여 *1dB*, 경우 3에 대하여서는 *2dB*의 성능 이득이 있음을 알 수 있다. 그림 3-(b)는 전체 데이터 전송량을 보여주는데 그림 3-(a)와 마찬가지로 경우 1이 가장 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 그림 2의 실선은 수식 (10)과 수식 (12)를 그린 것으로, 분석 결과가 실험 결과와 일치함을 알 수 있다.

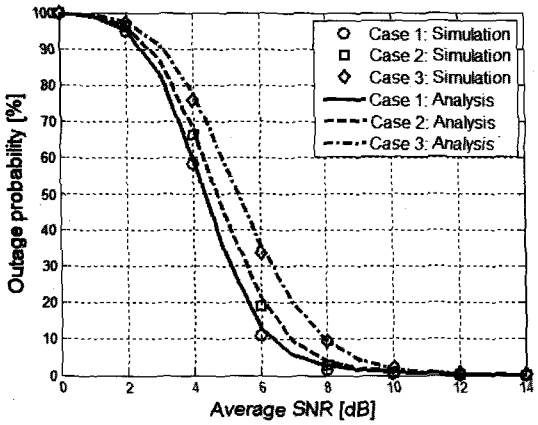
경우 2와 3과 같이 각 사용자가 요구하는 부 반송파의 개수가 다른 경우, 요구하는 부 반송파의 개수가 적은 사용자가 할당의 초기 과정에서 할당 완료 된다. 이와 같은 이유로 그림 4에서 보는 것과 같이 각 사용자가 서로 다른 수의 부 반송파의 개수를 요구하는 경우

표 1. 모의실험 환경
Table 1. Simulation parameters.

매개 변수	값
전체 부 반송파 (N)	1024
사용자 수 (M)	32
채널 모델	32 경로 레일리 페이딩
다중 경로 파일	균일
SNR 제한 (γ_{th})	10dB
데이터 도착율 (ζ_m)	100Kbps



(a) 평균 SNR에 따른 실패 확률



(b) 평균 SNR에 따를 전체 데이터 전송량

그림 3. GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘에서 경우 1, 2, 3에 대한 실패 확률 및 전체 데이터 전송량

Fig. 3. Outage probability and system throughput of GA-based DCA at case 1, 2 and 3.

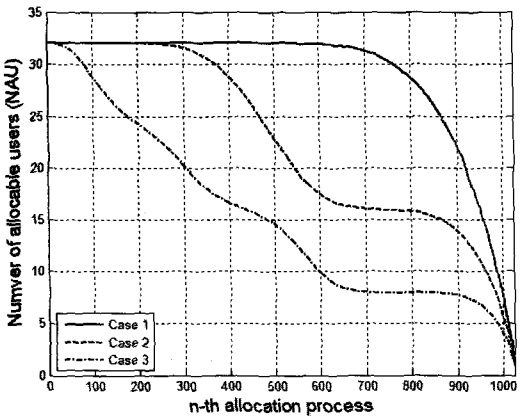


그림 4. GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘에서 경우 1, 2, 3에 대한 NAU

Fig. 4. NAU of GA-based DCA at case 1, 2 and 3.

가 동일한 개수의 부 반송파를 요구하는 경우에 비하여 NAU가 적어진다. NAU의 감소는 다중 사용자 다이버시티에 따른 이득을 줄여서, 결과적으로 사용자가 서로 다른 수의 부 반송파를 요구하는 경우가 같은 수의 부 반송파를 요구하는 경우보다 성능이 저하된다. 따라서 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘이 최대의 성능을 얻으려면 부록에 증명되어 진 것과 같이 모든 사용자가 동일한 개수의 부 반송파를 요구하여야 한다.

V. 결 론

본 논문은 OFDMA환경에서 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘의 성능을 분석하였다. 먼저 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘의 성능 분석 문제를 다중 사용자 다이버시티 분석으로 재해석하여 다중 사용자 다이버시티 계수인 NAU를 계산하였다. 계산된 NAU를 사용하여 GA를 기반으로 한 동적 채널 할달 알고리즘의 성능(실패 확률 및 데이터 전송량)을 분석하고, 동적 채널 할당 알고리즘이 최대의 성능을 얻을 수 있는 경우가 모든 사용자가 동일한 수의 부 반송파를 요구하는 경우라는 것을 증명하였다. 이와 같은 결과는 시스템 디자인과 사용자 관리의 비교 지표로 사용될 수 있다.

부 록

[증명] 모든 사용자가 동일한 수의 부 반송파를 할당 받을 경우 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘은 최대의 성능을 얻는다.

동적 채널 할당의 성능 이득은 다중 사용자 다이버시티를 통하여 얻어지며, NAU는 이러한 다중 사용자 다이버시티 계수이다. 따라서 동일한 수의 부 반송파를 할당 받는 경우의 NAU가 최대의 값을 갖는다면 이 경우의 동적 채널 할당 알고리즘의 성능이 최대가 된다고 할 수 있다.

수식 (3)에서 NAU는

$$u_k = M - \sum_{m=1}^{M} \sum_{l=s_m}^{k-1} p_{fin,(m,l)}, \tag{13}$$

이다. NAU를 최대화 하는 것은 수식 (13)의 두 번째 항을 최소화 하는 것으로 해석할 수 있다.

$f(m)=\sum_{l=s_m}^{n-1} p_{fin,(m,l)}$이라고 하면, $f(m)$은 확률의 합임으로 양수가 된다. 양수에 대한 산술, 기하평균에 대한 부등식을 이용하면, $f(m)$은 아래와 같이 표현되며[6]

$$\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} f(m) \geq \sqrt[M]{\prod_{m=1}^{M} f(m)}, \quad (14)$$

이는, 다시

$$\sum_{m=1}^{M} f(m) \geq M\sqrt[M]{\prod_{m=1}^{M} f(m)}, \quad (15)$$

이다.

수식 (15)의 좌측 항은 수식 (13)의 두 번째 항과 같고, 우측 항은 좌측 항의 하한 값이다. 이때 좌측 항과 우측 항이 같아지는 경우는 모든 m에 대하여 $f(m)$이 같은 값을 갖는 경우이다. 수식 (7)과 (8)을 통하여, s_m이 같은 값을 갖는 경우 $f(m)$이 모든 m에 대하여 동일한 값이 되는 것을 알 수 있다. 이는 각 사용자가 동일한 수의 부 반송파를 할당 받는 경우 수식 (13)의 두 번 째 항이 최소가 되어 NAU가 최대가 됨을 의미한다. 이를 통하여 모든 사용자가 동일한 수의 부 반송파를 할당 받는 경우 GA를 기반으로 한 동적 채널 할당 알고리즘의 성능이 최대가 됨이 증명된다.

참 고 문 헌

[1] C. Y. Wong, C. Y. Tsui, R. S. Cheng, and K. B. Lataief, "A real-time sub-carrier allocation scheme for multiple access downlink OFDM transmission," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, vol. 2, Sep. 1999, pp. 1124 - 1128.

[2] D. Kivanc, L. Guoqing, and H. Liu, "Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, pp. 1150 - -1158, Nov. 2003.

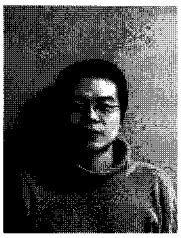
[3] G. Song and Y. Li, "Adaptive subcarrier and power allocation in OFDM based on maximizing utility," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, vol. 2, Apr. 2003, pp. 905 - 909.

[4] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, random variables, and stochastic processes*. Avenue of the Americas, NY: McGraw-Hill, 2002.

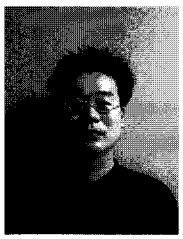
[5] G. Li and H. Liu, "Dynamic resource allocation with finite buffer constraint in broadband OFDMA networks," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, vol. 2, Mar. 2003, pp. 1037 - 1042.

[6] M. R. Spiegel, *Mathematical Handbook of Formulas and Tables*. Avenue of the Americas, NY: McGraw-Hill, 1999.

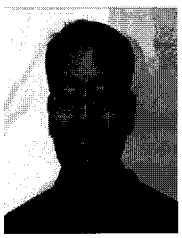
저 자 소 개



오 은 성(학생회원)
2003년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.
2006년 연세대학교 전기전자 공학과 석사 졸업.
2006년~현재 연세대학교 전기 전자공학과 박사 과정.
<주관심분야 : 이동 통신, 자원 할당, 다중 반송파 시스템>



한 승 엽(학생회원)
2002년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.
2004년 연세대학교 전기전자 공학과 석사 졸업.
2004년~현재 연세대학교 전기 전자공학과 박사 과정.
<주관심분야 : 이동 통신, 간섭 제거, UWB, 다중 반송파 시스템>



홍 대 식(정회원)
1990년 Purdue University Electrical Engineering 박사 졸업.
1991년~현재 연세대학교 전기 전자공학과 교수.
<주관심분야 : 디지털 통신, 통신 신호 처리, 4G 시스템, 다중 반송파 시스템>