

논문 2008-45TC-11-2

OFDMA 시스템에서 전송률 향상을 위한 충돌 회피 스케줄링 (Collision Avoidance Scheduling for Capacity Improvement of Adaptive OFDMA Systems)

김 영 주*, 송 형 준*, 권 동 영*, 홍 대 식**

(Youngju Kim, Hyungjoon Song, Dong-Young Kwon, and Daesik Hong)

요 약

본 논문에서는 직교 주파수 분할 다중 접속 방식 (OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access)에서 다중 사용자 다이버시티 이득을 증가시키기 위하여 사용자간 충돌 (collisions)을 피하도록 하는 스케줄링 기법을 제안한다. 제안하는 스케줄링 기법은 각 사용자간 채널 상태의 차이를 조사하여 최소 충돌 조건 (minimum collision criterion)을 만족시키도록 동작한다. 또한 제안된 스케줄링을 사용했을 때 OFDMA 시스템의 전송률을 분석하였는데, 이 분석을 통해 OFDMA 시스템의 전송률이 선택된 사용자들 간의 충돌 횟수에 따라 달라진다는 것을 확인할 수 있다. 모의실험을 통해 제안하는 스케줄링 기법이 사용자 간 충돌의 감소를 통하여 시스템의 전송률을 증대시킬 수 있음을 보인다. 또한 기존의 스케줄링 기법과의 비교를 통해, 제안된 스케줄링 기법이 전송률 측면에서 더 우월하다는 것을 확인한다.

Abstract

In this paper, we propose a collision avoidance scheduling to increase the multiuser diversity gains in the adaptive orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) system. The scheduling policy is based on the minimum collision criterion which investigates the differences of user channels. The paper includes the derivation of capacity expressions for the adaptive OFDMA system with the proposed scheduling. The analysis shows that the capacity of the system depends on the number of collisions between the selected users to be simultaneously served. Numerical results show that the proposed scheduling provides improved capacity performance over existing ones.

Keywords: capacity, OFDMA, adaptive subchannel allocation, collisions, scheduling

I. 서 론

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 방식이

다. 이 방식은 주파수 선택적 페이딩 현상과 협대역 간섭에 강하고 사용자간 효율적인 자원분배 능력으로 인해 차세대 광대역 무선 다중 접속 방식으로 제안되고 있다. 특히, OFDMA 기법에서 채널에 적응적인 자원 할당을 하는 경우 시스템의 성능을 더욱 향상시킬 수 있다^[1-3]. 여기서 자원 할당에는 부반송파, 사용 전력, 비트 할당 등을 모두 포함하며 이중 부반송파의 적응적인 할당에서 주된 성능 향상을 얻을 수 있다. 이에 비해 전송 전력이나 비트의 할당은 덜 유용한데, 이는 적절한 부반송파의 할당을 통해 각 사용자가 겪는 채널이 어느 정도 좋은 상태를 유지하게 되기 때문이다^[2-4]. 자원 할당에 대한 다양한 연구들은 각 사용자의 채널에 적응적인 자원 할당을 통해 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있다는 것을 보여주었다^[1-4]. 다중 사용자

* 학생회원, ** 종신회원, 연세대학교 전기전자공학부 (Yonsei University)

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

※ 이 논문은 한국과학재단이 주관하는 국가지정연구실사업(NRL:R0A-2007-000-20043-0)의 지원을 받아 연구되었음.

접수일자: 2008년2월21일, 수정완료일: 2008년11월14일

다이버시티는 각 사용자들이 겪는 채널의 독립성으로부터 얻어진다. 사용자들의 채널 상태가 비슷한 경우라면 아무리 최적으로 각 사용자들에게 부반송파를 할당하더라도 다중 사용자 다이버시티 이득에 의한 성능 개선은 제한적일 수밖에 없다. 이에 따라 본 논문에서는 더 향상된 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻기 위하여, 각 사용자들 채널의 연관성을 고려하는 스케줄링에 대해 연구하고자 한다.

본 논문에서는 OFDMA 시스템을 위한 새로운 스케줄링 기법을 제안한다. 제안하는 스케줄러는 각 사용자 채널의 연관성을 분석하고, 이를 통해 다중 사용자 다이버시티를 향상시키도록 동작한다. 먼저, 충돌(collision)을 정의하고, 여러 사용자 채널 상태의 유사성을 줄이기 위한 충돌 회피(collision avoidance) 스케줄링을 제안한다. 다음으로는 제안된 스케줄링을 적용하였을 경우에 하향 링크 OFDMA 시스템의 전송률을 분석한다. 전송률의 분석을 통해, OFDMA 시스템의 전송률에 충돌이 미치는 영향과, 그 정도를 정량적으로 나타낸다. 또한, 제안된 스케줄링 기법이 향상된 다중 사용자 다이버시티를 이용하여 OFDMA 시스템의 전송률을 향상시킨다는 것을 분석을 통하여 증명한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 고려하는 하향 링크 OFDMA 시스템 모델을 설명한다. III장에서는 충돌 회피에 기반 한 새로운 OFDMA 스케줄링 기법을 제안하고, 이때의 OFDMA 시스템의 전송률을 분석한다. 분석 결과는 IV장에서 정량적으로 도시되고, 기존의 다른 스케줄링 기법과 성능 비교를 통하여 제안된 스케줄링 기법을 평가한다. 마지막으로, V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 N 개의 부채널(subchannels)을 가지는 하향 링크 OFDMA 시스템을 다룬다. 여기서 부채널은 다수개의 인접한 부반송파로 이루어진 묶음을 가리킨다. 주파수 선택적인 레일리 페이딩 채널을 고려하며, 모든 사용자의 각 부채널에서의 채널 이득은 identically independently distributed (i.i.d.)이고, 각 부채널에서 독립적인 상수로 주어진다. 또한, 모든 부채널에서의 전송 전력은 일정하다.

단일 셀을 고려할 때, 한 셀 내에 전체 K_c 명의 사용자가 있다고 가정한다. k 번째 사용자가 n 번째 부채널에서 겪는 채널 이득을 $h_{k,n}$, $\bar{\gamma}$ 를 평균 수신 신호 대

잡음 비(SNR: signal to noise power ratio)로 한다. $\bar{\gamma}$ 는 모든 사용자가 동일한 값을 갖는다고 가정한다. 이때, k 번째 사용자의 n 번째 부채널에서의 순시적인 수신 SNR은 $\gamma_{k,n} = |h_{k,n}|^2 \bar{\gamma}$ 와 같이 주어진다.

수신단에서는 수신 SNR 값을 바탕으로 피드백(feedback) 정보를 생성하고, 이 정보를 송신단으로 보낸다. 상향 링크로 모든 사용자가 전대역의 부채널에 대한 SNR 정보를 송신단에 알려주는 것은 불가능하므로, 여기서는 각 사용자가 높은 채널 이득을 가지는 일부의 부채널의 인덱스(index)와 SNR 값에 대한 정보만을 송신단에 보내는 부분 피드백 기법을 사용하기로 한다. 부분 피드백 기법 중에서, Best- M 피드백 기법을 사용한다. Best- M 피드백 기법은 각 사용자가 높은 SNR을 가지는 순서대로 상위 M 개의 부채널의 인덱스와 SNR 값을 피드백 한다. 각 사용자들은 높은 SNR을 갖는 부채널을 사용하기 원하고, 또 기지국에서는 최대한 각 사용자에게 좋은 부채널을 할당하도록 동작하기 때문에, 이 피드백 기법은 효과적으로 피드백량을 줄이면서도 필요한 정보를 피드백 할 수 있다^[5]. 송신단에서 받은 피드백 정보는 오차가 없다고 가정하고, 매 시간 슬롯(time slot)마다 갱신된다. 이때, 한 시간 슬롯에서 채널 상태는 그대로 유지되고, 시간 슬롯마다 독립적으로 변한다고 가정한다.

기지국에서는 K_c 명의 모든 사용자로부터 피드백 정보를 받고, 그 중 K 명의 사용자를 선택하여, 한 OFDMA 심벌을 통하여 사용자들의 데이터를 동시 전송하도록 한다. 선택된 K 명의 사용자에게는 부채널이 할당되는데, 하나의 부채널은 한 명의 사용자에게만 할당된다^[4]. 이 때, K 값은 1부터 N 사이의 값이 되는데, 본 논문에서는 최대한 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻기 위하여, $K = N$ 인 경우를 고려한다.

III. 충돌 회피 스케줄링 기법

1. 스케줄링 프로토콜(protocol)

OFDMA 시스템의 최대 전송률은 각 부채널에서 가장 높은 채널 이득을 가지는 사용자를 선택해서 서비스할 때 얻어진다. 그러나 이 경우에는 사용자간 공평성에 문제가 생긴다. 각 사용자의 관점에서는 각자에게 가장 높은 채널 이득을 가지는 부채널을 할당했을 때 가장 높은 전송률을 가지게 된다. 본 논문에서는 후자의 관점에서 각 사용자에게 가장 좋은 채널을 할당할 수 있도록 동작하는 스케줄링 기법을 연구한다. 각 사

용자에게 높은 채널 이득을 갖는 부채널을 할당하기 위해서는 모든 사용자들이 할당 받기 원하는 부채널이 서로 달라야 한다. 이와 연관지어, 충돌 (collision)을 다음과 같이 정의한다.

- 충돌은 어떤 사용자에게 가장 높은 채널 이득을 갖는 부채널이 또 다른 사용자에게도 가장 높은 채널 이득을 가지는 부채널이 될 때 발생한다. 즉, 충돌은 $\arg \max_n \gamma_{k,n} = \arg \max_{n'} \gamma_{k',n'}$ for $k \neq k'$ 일 때 발생한다.

어떤 부채널에서 충돌이 발생하면, 사용자는 가장 좋은 부채널을 할당 받지 못하고, 다른 부채널을 할당 받게 된다. 이로 인해 그 사용자의 전송률이 감소하게 되며 또한 할당할 다른 부채널을 선택하는 과정에서 복잡도가 증가한다. 기존의 논문들에서는 충돌이 있더라도, 그 환경에서 최선의 부채널을 할당하는 기법에 대해 연구하고 있다. 본 논문에서는 충돌 자체를 줄이는 스케줄링으로 전송률을 향상시키고자 한다. 다음에서 제안하는 스케줄링 기법을 자세히 설명한다.

- 전체 K_c 명의 사용자 중 K 명의 사용자를 선택할 때, 총 $\binom{K_c}{K}$ 개의 사용자 집합이 있다. 이 사용자 집합은 $U = \left\{ u_j | j = 1, \dots, \frac{K_c!}{K!(K_c - K)!} \right\}$ 와 같이 표현할 수 있다. 이 집합 U 중 하나의 사용자 집합이 스케줄링 기법에 의해 선택된다.
- 모든 사용자들은 Best-1 피드백 기법에 따라, 가장 높은 SNR을 갖는 부채널의 인덱스와 그 SNR 값을 피드백 한다.
- 전송단의 스케줄러는 사용자로부터 받은 피드백을 가지고, 모든 $\binom{K_c}{K}$ 개의 사용자 집합에 해당하는 인덱스 집합을 생성한다. 인덱스 집합은 I_{u_j} 로 표현한다.
- 제안하는 스케줄러는 다음의 기준 (criterion)을 만족하도록 동작한다.
 - 최소 충돌 기준: 가장 충돌을 적게 일으키는 사용자의 집합이 선택된다. 이는 다음과 같이 표현된다.

$$u^* = \arg \max_{u_j \in U} |I_{u_j}| \quad (1)$$

위의 식에서 $|A|$ 는 집합 A 의 크기를 나타낸다. 즉 집합 A 에 있는 원소의 개수를 의미한다.

또한 $I_{u_j} \subset \{1, 2, \dots, N\}$ 이다. 선택된 u^* 는 전체 집합 U 의 원소 중에서 선택된 데이터를 전송할 사용자 집합이다.

집합 I_{u_j} 의 크기는 사용자 집합 u_j 에 있는 사용자들이 원하는 부채널이 서로 얼마나 다른가를 나타낸다. 식 (1)에서 제시된 기준에 의하여, 우리는 각 사용자들이 원하는 부채널이 최대한 다른 사용자의 집합을 고를 수가 있고, 결과적으로 가장 충돌이 적은 경우를 선택하게 된다.

- 데이터를 전송할 사용자 집합 u^* 가 선택된 후에는, $|I_{u_j}|$ 명의 사용자가 각자가 원하는 가장 좋은 부채널을 할당받을 수 있다. $|I_{u_j}| < N$ 인 경우, 나머지의 사용자들은 가장 높은 채널 이득을 갖는 부채널 대신 랜덤하게 선택된 부채널을 할당 받아 사용하게 된다.

2. 전송률 분석

이번 장에서는 앞서 제안된 충돌 회피 스케줄링 기법을 적용했을 때, OFDMA 시스템에서의 평균 전송률을 분석한다. 앞서 i.i.d. 레일리 페이딩 채널을 가정했으므로, 수신 SNR은 다음과 같은 확률 밀도 함수 (PDF: probability density function)를 가진다.

$$f(\gamma) = \frac{1}{\gamma} e^{-\gamma/\gamma} \quad (2)$$

또한 수신 SNR의 누적 분포 함수 (CDF: cumulative distributin function)는 다음과 같다.

$$F(\gamma) = 1 - e^{-\gamma/\gamma} \quad (3)$$

사용자들은 각 부반송파에서의 수신 SNR을 바탕으로 N 개의 전체 부반송파 중에서 가장 높은 수신 SNR을 갖는 부반송파를 선택한다. k 번째 사용자의 선택된 부반송파 인덱스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_k = \arg \max_n \gamma_{k,n} \quad (4)$$

k 번째 사용자의 n_k 번째 부반송파에서의 수신 SNR의 확률 밀도 함수는 아래와 같이 유도된다^[6].

$$f_N(\gamma) = N f(\gamma) [F(\gamma)]^{N-1} \quad (5)$$

k 번째 사용자의 n_k 번째 부반송파에서의 단위 대역폭당 전송률 (bits/second/Hz)은 다음과 같다^[7].

$$C_N = \int_0^{\infty} \log_2(1+\gamma) f_N(\gamma) d\gamma$$

$$= M \log_2(e) \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n \binom{N-1}{n} \frac{e^{n+1/\gamma}}{n+1} E_1\left(\frac{n+1}{\gamma}\right) \quad (6)$$

위 식에서 $E_1(\cdot)$ 는 first kind exponential integral 함수이다. 사용자는 N 차수의 선택 다이버시티(selection diversity)를 얻는다.

가. 충돌이 없을 때의 전체 전송률

어느 부반송파에서도 사용자간 충돌이 발생하지 않으면, 모든 사용자는 다른 사용자와 상관없이 각자 자신이 원하는 부채널을 사용할 수 있다. 따라서 이때의 전송률은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$C_{\max} = \sum_{k=0}^{K-1} C_N = K \cdot C_N \quad (7)$$

모든 사용자가 N 차수의 선택 다이버시티를 얻는다. 이는 다중 사용자 다이버시티로 볼 수 있다.

나. 충돌이 있을 때의 전체 전송률

K 명의 사용자의 최고 SNR 갖는 부채널 인덱스를 모아보면, 전체 부채널이 N 개가 있으므로 총 N^K 개의 인덱스 집합이 만들어 질 수 있다. 모든 인덱스 집합은 동일한 확률로 발생한다. 인덱스 집합은 다음과 같이 표시된다. $I_{u_j} \in \{\{1\} \dots \{N\} \dots \{1, 2, \dots, N\}\}$

인덱스 집합의 크기를 i 라 할 때, i 는 1에서 N 사이의 정수이다. 이는 $|I_{u_j}| = i$ ($1 \leq i \leq N$)와 같이 나타난다. i 가 N 보다 작을 때 즉, 어떤 부채널에서 사용자 간 충돌이 발생했을 때를 $N-i$ 번의 충돌이 일어났다고 정의한다. $N-i$ 번의 충돌이 일어나는 경우의 수를 분석해 보면 다음과 같이 주어진다.

$$d(N-i) = \binom{N}{i} \sum_{j=1}^i \binom{i}{j} j^N (-1)^{i-j} \quad (8)$$

위 식에서 모든 경우는 같은 확률을 가지므로, $N-i$ 번의 충돌이 일어날 확률은 다음과 같다.

$$P_{d(N-i)} = \frac{d(N-i)}{N^K} \quad (9)$$

$N-i$ 번의 충돌이 발생하면, i 명의 사용자는 원하는 부채널을 할당받을 수 있지만, $N-i$ 명의 사용자는 원

하는 부채널이 아닌 다른 빈 부채널을 할당받아야한다. 이는 랜덤하게 발생하므로, $N-i$ 명의 사용자는 평균 SNR을 갖는 부채널을 할당받는다고 가정할 수 있다. 이때, 이들 사용자는 평균적인 전송률을 얻을 수 있다 ($C_{avg} = \int_0^{\infty} \log_2(1+\gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma$). 따라서 $N-i$ 번의 충돌이 발생할 때의 전송률은 다음과 같이 얻어진다.

$$C_{d(N-i)} = i \cdot C_N + (N-i) \cdot C_{avg} \quad (10)$$

위 식에서의 전송률은 i 가 작아짐에 따라 식 (7)에서 얻었던 전송률보다 감소하였다. 충돌이 일어남에 따라 다중 사용자 다이버시티 이득 또한 감소하였다. 모든 사용자들이 전대역의 채널 상태에 대해 피드백을 한다면, 충돌이 일어났을 때에도 나머지 빈 부채널 중에서 가장 좋은 부채널을 선택함으로써, 평균 전송률보다 더 높은 전송률을 얻을 수 있지만, 식 (10)에서는 충돌이 일어났을 때 전체 전송률이 감소하는 경향을 보여주고 있다.

다. 제안된 스케줄링을 사용했을 때 전체 전송률 제안된 충돌 회피 스케줄링을 사용했을 때, 전체 전송률을 구하면 다음과 같다.

$$C_p = C_{d(N-i)}(N-|I_{u^*}|)$$

$$= |I_{u^*}| M \log_2(e) \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n \binom{N-1}{n} \frac{e^{n+1/\gamma}}{n+1} E_1\left(\frac{n+1}{\gamma}\right) + (N-|I_{u^*}|) \log_2(1+\bar{\gamma}) \quad (11)$$

제안된 충돌 회피 스케줄링 기법으로 전송률의 향상을 피할 수 있다. $|I_{u^*}| = N$ 인 경우에는 충돌이 전혀 발생하지 않는 식 (7)과 같은 전송률을 얻을 수 있다.

IV. 모의실험 결과

본 논문에서는 하향 링크 OFDMA 시스템을 다룬다. 주파수 선택적인 레일리 페이딩 채널을 고려하고, 이때 채널 프로파일은 1로 정규화 시킨다. 모든 사용자의 각 부채널에서의 채널 이득은 i.i.d.이고 평균 0, 분산 1의 복소 가우시안 랜덤 변수로 모델링된다. 또한, 모든 부채널에서의 전송 전력은 일정하고 평균 SNR은 5dB로 한다.

그림 1에서는 $N=K=8$ 일 때, 사용자 간 충돌 횟수의 분포를 나타낸다. 일반적으로, 여러 사용자들이 있을

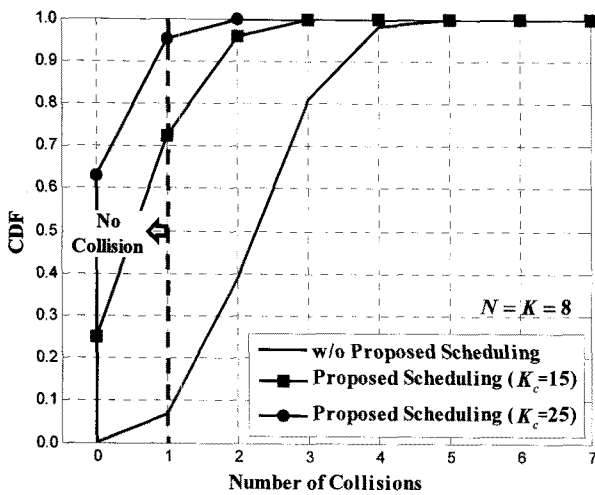


그림 1. 제안된 스케줄링을 사용했을 때의 부반송파에서 사용자 간 충돌 횟수의 누적 분포 함수 ($N=K=8, K_c=15,25$)
 Fig. 1. CDF of the number of collisions with $N=K=8$ using the proposed scheduling ($K_c=15,25$).

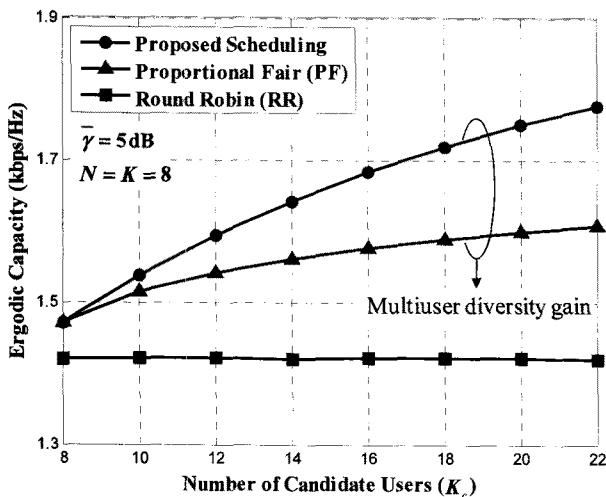


그림 2. 기존 스케줄러인 PF, RR과 제안된 스케줄러의 평균 전송률 성능 비교 ($N=K=8$)
 Fig. 2. Ergodic capacity comparisons between the proposed scheduling, PF and RR with $N=K=8$.

때 부반송파에서 사용자 간 충돌은 피할 수 없다. 그림 1의 CDF를 통해서 이를 확인할 수 있다. 그러나 제안된 충돌 회피 스케줄링을 사용하면, 사용자 간 충돌을 줄일 수 있다. K_c 가 클수록 충돌이 없는 사용자 집합을 고를 확률이 더 높아지므로, 그림 1의 결과를 얻는다.

그림 2는 제안된 스케줄링 기법의 평균 전송률 성능을 기존의 스케줄링 기법인 round robin (RR)과 proportional fair (PF)의 전송률 성능과 비교해서 보여주고 있다^[8-9]. 공정한 비교를 위하여 같은 순서 채널을

사용하여 비교하였다. 그림 2에서 전송률은 K_c 에 대해 나타내었다. RR은 다중 사용자 다이버시티를 얻지 못하고 PF는 다중 사용자 다이버시티를 얻지만, 부반송파에서 사용자 간 충돌이 있는 상태에서 전송을 하기 때문에, 제한적인 다이버시티를 얻는다. 반면에 제안된 스케줄러는 사용자 간 충돌을 줄임으로써 다중 사용자 다이버시티 이득을 높인다.

V. 결 론

본 논문에서는 하향 링크 OFDMA 시스템에서 다중 사용자 다이버시티를 향상시킬 수 있는 충돌 회피 스케줄링 기법을 제안하였다. 충돌 회피 스케줄링은 하나의 부반송파를 다수의 사용자들이 할당받기를 원할 때, 발생하는 사용자 간 충돌을 줄이기 위해 충돌이 가장 적은 사용자 집합을 찾아 이 사용자들이 같은 시간 슬롯에 전송할 수 있도록 한다. 이를 통해 부반송파에서의 사용자 간 발생하는 또한 충돌 횟수를 줄임으로써, 다중 사용자 다이버시티 이득과 OFDMA 시스템의 평균 전송률을 향상시킨다.

또한 본 논문에서는 하향링크 OFDMA 시스템의 평균 전송률을 여기서 정의된 충돌 횟수에 대해 수식적으로 분석하였다. 분석을 통해 OFDMA 시스템의 평균 전송률이 충돌 횟수의 증가에 따라 감소하게 된다는 것을 보였고, 제안된 충돌 회피 스케줄링을 통해 사용자 간 충돌을 줄이는 것이 OFDMA 시스템의 전송률을 향상시킨다는 것을 수식적으로 확인하였다. 또한, 모의실험을 통해 기존의 스케줄링과 비교했을 때 전송률 측면에서 제안된 스케줄러가 더 우수하다는 것을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] C. Y. Wong, C.Y. Tsui, R. S. Cheng, and K.B. Letaief, "A real-time sub-carrier allocation scheme for multiple access downlink OFDM transmission," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2, pp. 1124 - 1128, 1999.
- [3] D. Kivanc, G. Li, and H. Liu, "Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 2, pp.

1150 - 1158, Nov. 2003.

[4] 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.

[5] Jaap van de Beek, "Channel quality feedback schemes for 3GPP's Evolved-UTRA downlink," in Proc. IEEE GLOBECOM, pp. 1 - 5, Nov. 2006.

[6] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. McGraw Hill, 1991.

[7] C.-J. Chen, and L.-C. Wang, "A unified capacity analysis for wireless systems with joint multiuser scheduling and antenna diversity in Nakagami fading channels," IEEE Trans. Commun., vol. 54, pp. 469 - 478, Mar. 2006.

[8] E. L. Hahne, and R. G. Gallager, "Round robin scheduling for fair flow control in data communication networks," in Proc. IEEE Int. Conf. Commun., pp. 103 - 107, June 1986.

[9] J. M. Holtzman, "Asymptotic analysis of proportional fair algorithm," in Proc. IEEE Symp. PIMRC, pp. F33 - F37, 2001. May 23.

저 자 소 개



김 영 주(학생회원)
 2002년 연세대학교
 전기전자공학과 학사졸업
 2004년 연세대학교
 전기전자공학과 석사졸업
 2004년~현재 연세대학교
 전기전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 이동통신시스템, MIMO, 다중반송파 시스템>



송 형 준(학생회원)
 2003년 연세대학교
 전기전자공학과 학사졸업
 2005년 연세대학교
 전기전자공학과 석사졸업
 2005년~현재 연세대학교
 전기전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 이동통신시스템, MIMO, 멀티홉 시스템>



홍 대 식(중신회원)
 1990년 Purdue University
 Electrical Engineering
 박사 졸업
 1991년~현재 연세대학교
 전기전자 공학과 교수

<주관심분야 : 디지털통신, 통신신호처리, 4G시스템, OFDM 시스템>



권 동 영(학생회원)
 2007년 연세대학교
 전기전자공학과 학사졸업
 2007년~현재 연세대학교
 전기전자공학과 석사과정
 <주관심분야 : 이동통신시스템,
 MIMO, 멀티홉 시스템>